

AÑO 2024 | NUMERO 1 | ISSN: EN TRÁMITE



ALCONPAT MÉXICO

DOI: <https://doi.org/10.21041/XICNAM2024>

 CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT
MÉXICO 2024
20 AÑOS
de Congresos Alconpat México



 CONGRESO NACIONAL
ALCONPAT
MÉXICO 2024
20 AÑOS
de Congresos Alconpat México

MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MÉXICO



RNC

SHERROZINC
FARMACIUM



ALCONPAT INTERNACIONAL



EDITORES 2024:

Prisciliano F. de Jesús Cano Barrita
Elia Mercedes Alonso Guzmán
Tezozómoc Pérez López
Pedro Castro Borges

XI Congreso Nacional de ALCONPAT México
20 años de Congresos Nacionales de Alconpat México
del 10 al 12 de septiembre de 2024
Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.



MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MÉXICO

Editorial: Alconpat México

Editores 2024: Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Elia Mercedes Alonso Guzmán

Tezozómoc Pérez López

Pedro Castro Borges

PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA

ISSN: [EN TRÁMITE]

DOI: <https://doi.org/10.21041/XICNAM2024>



Compilación de trabajos presentados dentro del XI CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MÉXICO (XICNAM), realizado del 10 al 12 de septiembre de 2024 en Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

Presentación

Es un honor presentar las memorias del XI Congreso Nacional de Alconpat México 2024, un evento que ha reunido a destacados profesionales, investigadores y académicos del ámbito del control de calidad, patología y recuperación de las construcciones. Este congreso, celebrado en la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México, ha sido un espacio de intercambio de conocimientos, experiencias y avances tecnológicos que contribuyen al desarrollo y sostenibilidad de nuestras construcciones.

A lo largo de estas memorias, encontrarán una recopilación de las ponencias que se llevaron a cabo durante el congreso. Cada artículo refleja el compromiso y la dedicación de los participantes por mejorar las prácticas en la construcción y conservación de edificaciones y estructuras, así como por promover la innovación en el sector.

Queremos agradecer a todos los ponentes, asistentes y patrocinadores que hicieron posible este evento. Su participación y apoyo fueron fundamentales para el éxito de este congreso y para el avance continuo de nuestra disciplina. Esperamos que estas memorias sean una fuente valiosa de información y un referente para futuras investigaciones y proyectos. Que el conocimiento compartido aquí inspire nuevas ideas y soluciones para los desafíos que enfrentamos en la construcción, patologías y recuperación de la construcción. Agradecemos su interés y les invitamos a seguir colaborando y participando en futuras ediciones del Congreso de Alconpat México.

Por el Comité Organizador

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Presidente del Comité Organizador
Elia Mercedes Alonso Guzmán, Presidente del Comité Científico
Tezozómoc Pérez López, Presidente de Comité de Premiación
Pedro Castro Borges, Presidente del Comité de Financiamiento



Cintillo Legal

MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT MÉXICO, Año: 2024, No.1, es una Publicación bianual editada por ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN - DELEGACIÓN MÉXICO ALCONPAT - MÉXICO, Calle 21 Núm. 310D, Colonia Roma, 97218 Mérida, Yucatán, México.

Sitio web: <https://mx.alconpat.org>

Correo electrónico: alconpatmex@gmail.com

Editor Responsable de la Serie: Pedro Castro Borges.

Reserva de Derechos uso exclusivo No. 04-2024-070513370900-203, ISSN EN TRÁMITE, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, calle Puebla 143, Col Roma, Delegación Cuauhtémoc. C.P. 06700.

Responsable de la última actualización de este número: Pedro Castro Borges.

Fecha de la última modificación 29 de noviembre de 2024

Publicación Oficial de Alconpat México

Primera Edición: septiembre del 2024

Derechos Reservados © 2024

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de la presente publicación, siempre y cuando se otorgue el debido crédito a los autores y a la publicación, incluyendo la dirección electrónica de la publicación.

Con el apoyo de 2024:

- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
 - Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
 - Centro de Investigaciones en Corrosión - Universidad Autónoma de Campeche
 - CIIDIR Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional
 - Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León
 - Instituto Politécnico Nacional
 - Alconpat Internacional
-

Agradecimientos:

A todos los participantes, conferencistas, y patrocinadores que hicieron posible este congreso.

Contacto para Solicitudes de Permisos y Reproducciones:

Correo Electrónico: alconpatmex@gmail.com

Diseño y Diagramación:

- Elizabeth Sabido Maldonado
- Alexia Xiomara Zozaya Ortiz

Distribución:

Difusiones periódicas con Difusión digital

Sitio de descarga: <https://mx.alconpat.org/xicnam2024/>



Alconpat México

Para más información, visite nuestro sitio web:

<https://mx.alconpat.org>



Junta Directiva de Alconpat México 2024 - 2026

Presidente:

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Presidente de Honor:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Vicepresidente:

Dr. Carlos Enrique Peña Ramos

Presidente Fundador:

Dr. Pedro Castro Borges

Secretario:

M. en C. Frank Manuel León Martínez

Tesorero:

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Vocales:

Primero: Ing. Carlos Alberto Estrella Escalante

Segundo: Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Tercero: Dr. Francisco Javier Olgún Coca





Comité Organizador de XICNAM 2024

Presidente del Comité Organizador 2024:

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN.

Presidente del Comité Científico 2024:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, UMSNH, Michoacán.

Miembros del Comité Organizador 2024:


- Dr. Alejandro Durán Herrera, FIC UANL
- Dr. Tezozómoc Pérez López, Centro de Investigación en Corrosión de la UACAM
- Dr. Pedro Castro Borges, Cinvestav del IPN Unidad Mérida

Staff de Apoyo 2024:

- Dr. Baldomero H. Zárate Nicolás, Director del CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN
- M. en C. Frank Manuel León Martínez, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN
- Dr. Pedro Montes García, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN
- Dr. Francisco Castellanos León, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN
- Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN
- Lic. Justo César Marcial Aguilera, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Jefe de la Unidad de Informática
- Ing. Ángel Rosales Torres, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social
- Lic. Elinora Orozco Arango, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Jefa del Departamento de Servicios Educativos
- Lic. Paulo Sergio Nava Arellanes, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Encargado del Área de Difusión y Comunicación Social
- Joao Valdir Salinas Camargo, Transmisión del evento via Zoom.

Comité de Desarrollo Tecnológico y Diseño Digital

Miembros 2024:

- Ing. Natanael de Jesús León Chan, ALCONPAT Internacional
 - MSc. Alexia Xiomara Zozaya Ortiz, ALCONPAT Internacional
 - Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, ALCONPAT Internacional
- 

Comité Científico 2024

Presidente 2024:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, UMSNH, Michoacán.

Miembros del Comité Científico 2024:

- Dr. Tezozómoc Pérez López, Centro de Investigación en Corrosión de la UACAM, Campeche
- Dr. Pedro Castro Borges, Cinvestav del IPN Unidad Mérida, Yucatán
- Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, Tecnológico de Monterrey, Querétaro
- Dr. José Iván Escalante García, Cinvestav Unidad Saltillo, Coahuila
- Dr. Alejandro Durán Herrera, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Nuevo León
- Dr. José Alberto Guzmán Torres, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Antonio Zaldívar Cadena, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Nuevo León
- Dr. Eduardo Sadot Herrera Sosa, Tecnológico de Monterrey, Querétaro
- Dr. Edgar Onofre Bustamante, CICATA IPN, Unidad Altamira, Tamaulipas
- Dr. Arturo Emanuel Ramírez Ortiz, TecNM, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- Dr. Rafael Alavez Ramírez, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Marco Antonio Maldonado García, TecNM, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- Dr. Pedro Montes García, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Mauricio Arreola Sánchez, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Magdaleno Caballero Caballero, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- M. en I. Rosalía Ruiz Ruiz, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Víctor Alberto Franco Luján, TecNM, Instituto Tecnológico del Valle de Etna, Oaxaca
- M. en I. Valentín Juventino Morales Domínguez, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Eddisson Francisco Hernández, Universidad Americana, Nicaragua
- Dr. Adriá Sánchez Calvillo, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Marco Antonio Navarrete Serás, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Emilio Hernández Bautista, TecNM, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- Dr. Luis Osorio Flores, Instituto de Ingeniería, UNAM, CDMX
- Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. César Antonio Juárez Alvarado, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Nuevo León
- Dr. Jorge Alberto Briceño Mena, CONAHCYT, Cinvestav del IPN, Unidad Mérida
- Dr. Floriberto Díaz Díaz, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dra. Ana Cecilia Espíndola Flores, CICATA IPN, Unidad Altamira, Tamaulipas
- Dr. Esteban López Vásquez, TecNM, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- M. en C. Gladis Fabiola Gómez Luna, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- M. en C. Andy Alfonso Olivera, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Sergio Enrique Solís Nájera, Facultad de Ciencias, UNAM, CDMX
- M. en C. Frank Manuel León Martínez, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Arturo Zalapa Damián, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Hugo Luis Chávez García, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. Ángel Adrián Bacelis Jiménez, CICORR-Universidad Autónoma de Campeche, Campeche
- M. en C. Samuel Ramírez Arellanes, TecNM, Instituto Tecnológico del Valle de Etna, Oaxaca
- M. en I. Rebeca Visairo Méndez, TecNM, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- Dr. Francisco Castellanos León, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca
- Dr. Wilfrido Martínez Molina, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Michoacán
- Dr. José Manuel Mendoza Rangel, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Nuevo León
- Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, CIIDIR Unidad Oaxaca del IPN, Oaxaca

viii



INTRODUCCIÓN

ix



MENSAJE DE BIENVENIDA

x



AGRADECIMIENTOS

S1



**SECCIÓN 01
CONTROL DE CALIDAD DE LAS
CONSTRUCCIONES**

S2



**SECCIÓN 02
PATOLOGÍA DE LAS
CONSTRUCCIONES**

S3



**SECCIÓN 03
RECUPERACIÓN DE LAS
CONSTRUCCIONES**

xi



**PATROCINADORES Y
COLABORADORES**

TABLA DE CONTENIDO

Estimados participantes,

Los congresos de Alconpat Delegación México se han realizado ininterrumpidamente cada dos años, en año par, destacando las siguientes sedes: Santiago de Querétaro, Querétaro (2004); Tampico, Tamaulipas (2006); Chihuahua, Chihuahua (2008); Xalapa, Veracruz (2010); Los Mochis, Sinaloa (2012); Monterrey, Nuevo León (2014); Pachuca, Hidalgo (2016); Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (2018); San Francisco de Campeche, Campeche (2020); Telchac, Yucatán (2022); y ahora, por primera vez, en la histórica y culturalmente rica ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, se realizó el XI Congreso Nacional de Alconpat México 2024.

Este evento reunió a los más destacados expertos en patología de la construcción y tecnología aplicada para compartir conocimientos y avances que fortalecerán nuestro campo. Este año, estamos celebrando un hito muy especial: 20 años de congresos de Alconpat México. Estos 20 años de congresos se celebraron con una obra alusiva del reconocido pintor mexicano Guido Farina que embellece este libro de memorias. Desde la primera edición en 2004 en Santiago de Querétaro, Querétaro, hemos recorrido un largo camino, con sedes en distintas partes del país, consolidándonos como un evento clave para la comunidad profesional y académica del sector de la construcción.

La organización de este XI Congreso estuvo a cargo del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR) del Instituto Politécnico Nacional, en colaboración con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav Unidad Mérida), la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM), y la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC- UANL). Este congreso representó una oportunidad única para compartir conocimientos y experiencias con destacados profesionales y académicos del ámbito de la construcción, promoviendo la participación, colaboración y vinculación con diversas empresas e instituciones en beneficio de la superación académica y profesional de los participantes.

Atentamente,

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Presidente del Comité Organizador
Elia Mercedes Alonso Guzmán, Presidente del Comité Científico
Tezozómoc Pérez López, Presidente de Comité de Premiación
Pedro Castro Borges, Presidente del Comité de Financiamiento

Estimados participantes,

Es un gran honor darles la más cordial bienvenida al XI Congreso Nacional de Alconpat México (XICNAM), que se llevará a cabo del 10 al 12 de septiembre de 2024 en la histórica y culturalmente rica ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Este evento reúne a los más destacados expertos en patología de la construcción y tecnología aplicada para compartir conocimientos y avances que fortalecerán nuestro campo.

Este año, estamos celebrando un hito muy especial: 20 años de congresos de Alconpat México. Desde la primera edición en 2004 en Santiago de Querétaro, Querétaro, hemos recorrido un largo camino, con sedes en distintas partes del país, consolidándonos como un evento clave para la comunidad profesional y académica del sector de la construcción.

Los congresos de Alconpat Delegación México se han realizado cada dos años, en año par, destacando las siguientes sedes: Santiago de Querétaro, Querétaro (2004); Tampico, Tamaulipas (2006); Chihuahua, Chihuahua (2008); Xalapa, Veracruz (2010); Los Mochis, Sinaloa (2012); Monterrey, Nuevo León (2014); Pachuca, Hidalgo (2016); Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (2018); San Francisco de Campeche, Campeche (2020); Telchac, Yucatán (2022); y ahora, por primera vez, en Oaxaca de Juárez, Oaxaca. El primer congreso fue organizado por el Instituto Mexicano del Transporte, mientras que los siguientes se han llevado a cabo en Universidades y Centros de Investigación Estatales, destacando la cooperación académica y profesional.

La organización de este XI Congreso está a cargo del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR) del Instituto Politécnico Nacional, en colaboración con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav Unidad Mérida), la Universidad Autónoma de Campeche (UACAM), y la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FIC-UANL). Este congreso representa una oportunidad única para compartir conocimientos y experiencias con destacados profesionales y académicos del ámbito de la construcción, promoviendo la participación, colaboración y vinculación con diversas empresas e instituciones en beneficio de la superación académica y profesional de los participantes.

Les invitamos a ser parte activa y presencial de esta celebración tan especial. Estamos seguros de que su participación contribuirá significativamente al éxito de este evento y al fortalecimiento de nuestra comunidad.

Esperamos que disfruten de una estancia enriquecedora en Oaxaca y que este congreso sea una experiencia inolvidable para todos.

Por el Comité Organizador,

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita
Presidente del Comité Organizador
XI Congreso Nacional de Alconpat México
Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

X**AGRADECIMIENTOS**

El comité organizador agradece el apoyo de las siguientes instituciones y empresas que han contribuido al éxito de este congreso:

Organizadores 2024

- Alconpat México (mx.alconpat.org)
- CIIDIR Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional (<https://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/>)

Auspiciadores 2024

- Alconpat Internacional (<https://alconpat.org/>)

Patrocinadores 2024

- Instituto Politécnico Nacional (<https://www.ipn.mx/>)
- Sika Mexicana (<https://mex.sika.com/>)
- Guido Farina (<https://www.guidofarina.art/>)
- Consorcio RNC S.A. de C.V. ()
- Herrozinc Prefabricados (<https://herrozinc.com.mx/>)

Instituciones colaboradoras 2024:

- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (<https://www.umich.mx/>)
- Universidad Autónoma de Campeche (<https://www.uacam.mx/>)
- Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León (<https://fic.uanl.mx/>)
- Cinvestav, Unidad Mérida (<https://www.mda.cinvestav.mx/>)

Atentamente,

Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita,
Elia Mercedes Alonso Guzmán,
Tezozómoc Pérez López,
Pedro Castro Borges



CONTROL DE CALIDAD

DE LAS CONSTRUCCIONES



SECCIÓN 1

CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

Sustentabilidad en la industria de la construcción considerando una visión holista. <i>A. Torres Acosta (CC-282-MX, CONFERENCIA MAGISTRAL)</i>	1
Opportunities and Challenges of Using Limestone in Eco-Efficient Cements. <i>P. Perez-Cortes, J. I. Escalante-García (CC-293-MX, CONFERENCIA MAGISTRAL).</i>	11
Adición de fibras textiles en la elaboración de concreto con sustituto parcial de grava reciclada de demolición, su efecto en la porosidad capilar y la resistencia mecánica a 90 días. <i>F. Hernández-Ferreyra, W. Martínez-Molina, M. Arreola-Sánchez, E. Alonso-Guzmán, H. Chávez-García, S. Silva-Torres (CC-232-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)</i>	27
Significancia histórica de la Caliza, desde cementos ancestrales hasta los cementos de hoy y perspectivas de futuro. <i>J. I. Escalante-García, P. Perez-Cortes, J. Rodriguez-Morales, J. M. Hernández Bielma, J. L. Reyna-Perez (CC-243-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)</i>	37
Uso de cáscara de coco como reemplazo parcial de agregado grueso en concreto. <i>M. A. Maldonado-García, G. Gómez-Hernández (CC-306-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)</i>	51
Desempeño de pastas y morteros a base de cemento portland con altos contenidos de adiciones de caliza. <i>R. A. Méndez Páramo, A. A. Torres-Acosta, C. Arista Perrusquía, E. S. Herrera Sosa (CC-372-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)</i>	57
Propiedades en estado fresco y resistencia a compresión de concretos conteniendo cáscara de coco como agregado grueso. <i>G. Gómez-Hernández, S. O. Ramírez-Martínez, E. López-Vázquez, M. A. Sánchez-Medina y M. A. Maldonado García (CC-206-MX)</i>	71
Basalto como cementante en la elaboración de concreto. <i>A. A. Morales Cervantes, F. J. Olguin Coca, A. L. López León, I. E. Castañeda Robles, F. Almeraya Calderon, L. D. López León (CC-217-MX)</i>	79
Curvas esfuerzo deformación para la obtención del módulo de elasticidad estático en núcleos de roca. <i>M. A. Navarrete-Seras, E. M. Alonso-Guzmán, W. Martínez- Molina, H. L. Chávez-García, M. Arreola-Sánchez, J. A. Borrego-Pérez (CC-223-MX)</i>	92

CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

Diseño de un dispositivo para la alineación de fibras de acero utilizadas como refuerzo en elementos de concreto mediante el empleo de campos electromagnéticos.	100
<i>D. Cavazos de Lira, C. A. Juárez Alvarado, B. T. Terán Torres (CC-233-MX)</i>	
Análisis de la respuesta elástica de capas granulares mediante el LWD para determinar posibles fallas en los pavimentos.	111
<i>M. A. Villanueva-Guzmán, H. Delgado-Alamilla, E. M. Alonso-Guzmán, W. Martínez-Molina, H. L. Chávez-García, M. G. Gómez-Valdovinos (CC-245-MX)</i>	
Morteros con carbón vegetal activado: una evaluación de sus propiedades mecánicas y de durabilidad.	119
<i>O. E. Luna Martínez , P. F. de J. Cano Barrita, F. M. León Martínez (CC-258-MX).</i>	
Evaluación de la reología del concreto autocompactante y ligero con poliestireno expandido	128
<i>J. Gutierrez, J. Puerto, A. Duran (CC-279-MX)</i>	
Explorando la aplicación de alginato de sodio como aditivo de modificación y control reológico de pastas de cal.	144
<i>F. M. León-Martínez, P. F. de J. Cano-Barrita, L. Medina-Torres, F. Castellanos, D. Soto-Castro (CC-301-MX)</i>	
Reutilización de residuos industriales como agregado fino para morteros ecológicos.	154
<i>R. U. Morales Rojas, A. A. Olivera, V. G. Jiménez Quero, P. M. Gallegos Acevedo, J. M. Espinoza Cuadra, P. Montes García (CC-304-MX)</i>	
Caracterización de cementos activados alcalinamente elaborados con ceniza volante y ceniza de bagazo de caña sin tratar mediante pulsos ultrasónicos.	165
<i>P. Pérez-Cortés, J. I. Escalante-García, P. Montes-García (CC-307-MX)</i>	
Evaluación comparativa del desempeño de diferentes fibras estructurales dosificadas como refuerzo en términos de su área superficial específica en concretos fibro-reforzados.	184
<i>F. Zuñiga-Gamez, L. G. López-Yepez, C. A. Juarez, A. Duran-Herrera (CC-317-MX)</i>	

CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

Incorporación de pellets de polipropileno reciclado como sustituto de agregados finos en la fabricación de bloques huecos de concreto de geometría no convencional: Evaluación de la resistencia a compresión y conductividad térmica.	197
<i>P. G. Pérez-Padilla, A. A. Zaldívar-Cadena, G. Sanchez-Anguiano, J. R. González- López, M. Z. Figueroa-Torres, F. R. Ruvalcaba-Ayala, M. A. Guerra-Cossio (CC-327-MX)</i>	
Caracterización química-estructural y mecánica de la pasta cementante incorporando la concha de ostión <i>Crassostrea Virginica</i> .	205
<i>M. A. Somoza-Méndez, E. Onofre-Bustamante, A. C. Espindola-Flores (CC-334-MX)</i>	
Evaluación de la capacidad de almacenamiento de energía térmica en un elemento ligero adicionado con materiales de cambio de fase.	213
<i>A. Bohorquez, R. Alavez, M. Caballero, F. Chiñas (CC-339-MX)</i>	
Caracterización mecánica de concreto con fibras orgánicas endémicas de la Península de Yucatán.	227
<i>J. J. Alvarado Pacheco, A. P. Rojo Nuñez, M. V. Dzib Vivas, A. Bacelis Jiménez, O. May Tzuc, T. Perez-Lopez, M. Jiménez-Torres(CC-340-MX)</i>	
Análisis de propiedades físico mecánicas de un concreto permeable con microfibras sintéticas.	236
<i>M. G. Gómez-Valdovinos, W. Martínez, E. M. Alonso, M. Arreola, H. L. Chávez (CC-346-MX).</i>	
Evolución del calor de hidratación por calorimetría semi-adiabática de pastas de cemento adicionadas con biopolisacáridos.	245
<i>F. M. León-Martínez, P. F. de J. Cano-Barrita, F. Castellanos, E. Bautista-Hernández, J. Flores-Mendoza (CC-349-MX)</i>	
Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, pet y caucho, para aumento de resistencia por fatiga.	255
<i>S. H. Silva Torres, H. L. Chávez García, W. Martínez Molina, E. M. Alonso Guzmán, M. A. Mondragón Ornelas, J. A. Rodriguez Castro, F. A. Hernández Ferreyra (CC-364-MX)</i>	
Una propuesta para considerar el cambio climático en el diseño de la subrasante en los pavimentos carreteros.	263
<i>J. F. Mendoza, E. M. Alonso, W. Martinez, H. L. Chavez, R. Soto, H. Delgado (CC-366-MX)</i>	

CONTROL DE CALIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES (CC)

Estudio del efecto del color del vidrio residual pulverizado, como material puzolánico, en las propiedades de pastas de cemento portland. <i>L. Hernández Zárate, V. G. Jiménez Quero, J. Guerrero Paz (CC-368-MX)</i>	276
Evaluación puzolánica de vidrio molido reciclado como sustituto parcial del cemento. <i>E.I. Martínez-Martínez, L. F. Marín-Cruz, S. Ramírez-Arellanes, V. A. Franco-Luján (CC-378-MX)</i>	285
Delignification and characterization of Tule (<i>Typha Domingensis</i>) for its potential use in the production of green concrete. <i>R. G. Romero-Guzmán, E. Onofre-Bustamante, A. C. Espindola-Flores (CC-390-MX)</i>	296
Biomateriales sustentables para construcciones eco-amigables. <i>.M. Soria-Castro, J. Genescá-Llongueras, G. I. Hernández-Bolio, P. Castro-Borges (CC-394-MX).</i>	309
Construcción y caracterización de un palafito de concreto en el Golfo de México: Un enfoque en durabilidad y sostenibilidad. <i>J. A. Briceño-Mena, M. G. Balancán-Zapata, M. T. Castillo Burguete, A. A. Torres Acosta, P. Castro-Borges (CC-395-MX)</i>	321



Sustentabilidad en la industria de la construcción considerando una visión holista

A. A. Torres Acosta^{1*}

*Autor de Contacto: atorresa@tec.mx

¹ Tecnologías Sostenibles y Civil, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Querétaro, Querétaro, México.

RESUMEN

En los últimos 20 años se ha intentado por varios entes (productores de materia prima, fabricantes, constructores) el mejorar la sustentabilidad en la industria de la construcción de una manera aislada, sin vislumbrar todavía una solución holista. Un ejemplo es la industria del concreto, ya que este material incluye la materia prima con procesos de fabricación y suministro diversos. Por ejemplo, la industria cementera ha iniciado desde el año 2000 un cambio radical en los tipos de cemento, reduciéndose el contenido del clinker en sus productos con el fin de reducir las emisiones de dióxido de carbono e incrementar la sustentabilidad de su producto (tomando en cuenta que reduciendo los gases de efecto invernadero, GEI, logran sustentabilidad). Sin embargo, poco se sabe en cuanto a la posible afectación de la durabilidad de las obras de concreto al hacer estas modificaciones en los contenidos de clinker, puzolana y caliza de las nuevas formulaciones de los cementos mexicanos. Un concreto sustentable significa que es un concreto durable, ya que se disminuye la aparición de daños que se tendrían que reparar, y así reducir el consumo de más materiales durante las reparaciones. En esta investigación se darán ciertas recomendaciones para incrementar la sustentabilidad, o durabilidad, de los concretos fabricados con estas nuevas mezclas de cemento que tiene el mercado mexicano.

Palabras clave: caliza; concreto; construcción; durabilidad; sustentabilidad.

1. ECONOMÍA CIRCULAR EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Es más común encontrar publicidad en medios electrónicos como impresos que nos exhortan a reducir los gases de efecto invernadero (GEI) en todas las actividades que realizamos, para así reducir los efectos del cambio climático que son cada vez más comunes. En la industria de la construcción de igual manera se ha promovido la necesidad de reducir estos GEI. Sin embargo, en los últimos 20 años esta transición hacia los procesos de una economía circular en esta industria ha sido lenta y tortuosa.

Lograr la filosofía de una economía circular en la industria de la construcción implica el trabajo de muchos entes que están a cargo de cada una de las etapas del proceso constructivo de una obra hacia la sustentabilidad de ésta. Empezando la extracción de la materia prima que se logre el reúso de los bancos de materiales, continuando con la transformación de ésta hacia los materiales que se utilizan en la construcción. Debe también tomarse en cuenta el transporte de estos materiales al lugar de la obra para que los traslados no sean tan largos que los combustibles fósiles utilizados para ello incrementen los GEI. Se continúa con esta filosofía con la correcta definición de las especificaciones y el diseño de estas obras, para considerar que su vida de servicio sea la mayor posible, y así evitar más consumo de materiales en el mantenimiento correctivo de la misma. Y, por último, una vez que la obra haya llegado al final de su vida de servicio (> 80 años), puedan sus materiales reciclarse para que las generaciones futuras puedan cubrir las necesidades que tengan en el momento de la deconstrucción de la obra.

Se podría dividir el ciclo completo antes descrito en cuatro etapas principales: 1) extracción y transformación de la materia prima, 2) diseño y construcción de la obra considerando criterios durables; 3) uso/ocupación y mantenimiento; y 4) deconstrucción y reciclado de los materiales obtenidos después de la demolición de la obra. La Figura 1 (Yumha 2014) muestra el esquema que es común observar donde se muestran las etapas de la construcción de un proyecto en un círculo cerrado, guardando esta circularidad que va desde “la cuna” hasta “la tumba” del proyecto constructivo. A continuación, se dará un recorrido por este círculo virtuoso de la sustentabilidad relacionado con la construcción.



Figura 1. Modelo de economía circular para un proyecto constructivo de acuerdo con Yumha (2014).

2. EXTRACCIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La responsabilidad de la primera etapa del ciclo, para reducir las emisiones de GEI, recaería en la industria de la transformación, quienes incluirían a las industrias cementeras, concreteras, prefabricadoras, acereras, fabricantes de materiales para instalaciones hidráulicas, sanitarias y eléctricas, como a las más importantes que podrían incidir en esta reducción de los GEI.

La primera etapa que corresponde a la extracción y transformación de la materia prima en materiales de construcción es la que más ha trabajado en los últimos 20 años, principalmente la industria del cemento. Esta industria ha logrado reducir las emisiones de GEI mediante las modificaciones en la formulación de los cementos, reduciendo el principal compuesto de su línea de producción que es el clínker (CANACEM 2023).

Se sabe que el cemento Portland está compuesto por clínker y yeso, con porcentajes de 90-95% para el clínker y 3-5% para el yeso (para alcanzar el 100% de esta ecuación, la diferencia corresponde a elementos minoritarios). En estudios recientes se demostró que esta reducción del contenido de clínker en los cementos se logra mediante la inclusión de adiciones en los cementos Portland, que podrían ser materiales que también son cementantes (como las puzolanas naturales, la ceniza volante, el humo de sílice, la escoria granulada de alto horno) o los rellenos inertes como la caliza (Villagrán-Zaccardi 2022).

Las adiciones cementantes que pudieran ser añadidas a las formulaciones de los nuevos cementos Portland conocidos en muchos países como cementos Portland compuestos, o CPC por sus siglas (NMX-C-414-ONNCE-2017), generan que éstos sean binarios (si se le añade una sola adición) o ternarios (si se le añade dos adiciones). Estas nuevas composiciones de los CPC's han generado desempeños tan variados en los concretos que utilizan a estos cementos, demostrándose en varios trabajos presentados en la literatura mundial (Torres Acosta et al. 2023, Torres Acosta et al. 2024). Cambios en el comportamiento mecánico, o en la contracción por secado de los concretos fabricados con estos CPC's, han demostrado que el desconocimiento de las composiciones de estos cementos ha impedido un control adecuado del concreto en obra, por lo que un mayor número de obras importantes han alcanzado el fin de su vida de servicio en menos de 15 años (Torres Acosta 2022).

Los fabricantes han comentado que no es el material el que ha causado esta reducción en la vida de servicio de las obras, sino que una mala ejecución en los trabajos o falta de un control de calidad adecuado en la colocación de los materiales en el lugar. Sin embargo, si los usuarios conocieran que sus concretos deben de ser dosificados, colocados y curados de manera diferente que lo que regularmente se hace en concretos fabricados con cementos con alto contenido de clínker (cementos fabricados antes de la normativa actual, en donde se permite este reemplazo de clínker con otras adiciones), la cantidad de fallos que ahora se observan se podrían reducir dramáticamente. Existen varios estudios se ha demostrado que las adiciones puzolánicas retardan el proceso de hidratación del cemento, lográndose resistencias mecánicas finales a edades del orden de 90 a 150 días, siempre y cuando el concreto se mantenga curándose todo este tiempo, situación impráctica en obra (Al-Shmaisani et al. 2021). También se ha demostrado que estas mismas adiciones puzolánicas generan contracciones plásticas en el concreto de diferente orden de magnitud, por lo que los concretos deberán de mantenerse en periodos de curado más extensos para evitar la pérdida de agua por secado (Al-Shmaisani et al. 2021). Sin embargo, si el usuario desconoce el porcentaje de reemplazo del clínker por estas puzolanas ¿cómo lograría evitarse esta reducción de resistencia

a edades tempranas o las contracciones por secado si se siguen curando los concretos igual que cuando el cemento era solo clínker y yeso?

La producción de puzolanas en muchos países es escasa comparada con la producción de clínker en la industria cementera. En muchos de los casos las fuentes de donde se puede obtener las puzolanas, principalmente las naturales, se encuentran a muchos kilómetros de las fábricas de cemento, por lo que los costos de transporte, así como las emisiones generadas por el mismo, hacen más caro el cemento compuesto y los GEI serían mayores que los que se están ahorrando en la producción de clínker (Villagrán-Zaccardi 2et al. 022).

Las fuentes de ceniza volante en México también son muy escasas, y para ser más exactos solo existen dos termoeléctricas en nuestro país que producen energía eléctrica a base de carbón: Piedras Negras (Coahuila) y Petacalco (Michoacán). Es por ello por lo que el uso de ceniza volante en nuestro país es incosteable por el transporte al lugar donde se encuentran las plantas cementeras.

Las fuentes de escoria granulada de alto horno son las siderúrgicas, las cuales son de mayor número que las dos plantas termoeléctricas de donde la ceniza volante se puede extraer. Sin embargo, al usarse chatarra en las siderúrgicas en lugar de fierro extraído directamente de minas, hace que el producto final sea de dudosa reactividad. Además de que en ambos casos (ceniza volante y escoria), el producto debe de pasar por un proceso de molienda para alcanzar la finura necesaria para que logre una activación óptima, situación que de nuevo incrementa los costos en la producción de estas adiciones, así como las emisiones de GEI por la energía eléctrica necesaria en este proceso previo a que se añada en los molinos del clínker.

Por último, la espuma de sílice o microsíllica que es otro material cementante entre los que se pudieran utilizar para reducir el clínker en los cementos, no es producido en muchos países como en México. Las fuentes de este material son EE. UU., Brasil y China principalmente, es decir, el transportar este producto a las plantas cementeras sería poco costeable además de que de nuevo se incrementarían las emisiones de GEI por el combustible para este transporte.

Con todo lo anterior, se podría llegar a la conclusión de que el uso de todas estas adiciones reactivas (llamadas así porque reaccionan con el hidróxido de calcio de la hidratación del clínker) podrían no ser viable en la industria del cemento por los costos de transporte, de post tratamiento (hacerlas más finas) y la emisión de GEI que producen por el transporte principalmente (dato no considerado en las hojas de ruta de la CANACEM (2023)). Es decir, estas adiciones no son sustentables en este momento y se debe de promover el uso de adiciones que sí lo sean en esta primera fase de extracción y transformación a materiales de construcción.

Si se considera ahora la posibilidad de que se utilice solo relleno inerte (por qué no reaccionan en su totalidad con el clínker u otras adiciones cementantes que pudieran incluirse en la formulación) de caliza como adición, es un producto que se utiliza para la misma fabricación del clínker, por lo que se encuentra ya en las plantas cementeras. No sería necesario trasladar más materia prima cómo será el caso de las puzolanas o la escoria granulada de alto horno, de tal manera que no habrá costos adicionales de transporte ni emisiones de GEI por el combustible usado en éste.

La Normativa mexicana actual (NMX-C-414-ONNCCE-2017) permite el uso de relleno inerte de caliza en los cementos Portland como única adición, manteniendo el nombre de este tipo como CPC (haciendo que el usuario desconociese esta particularidad). Es así como, desde el punto de vista de la sustentabilidad de la industria del cemento, el uso de rellenos inertes base caliza es la mejor opción de entre todas las adiciones aceptadas en la Normativa mexicana y de muchos otros países latinoamericanos.



Los parámetros que podrían utilizarse para conocer el contenido de rellenos inertes en el cemento son la densidad y la pérdida por ignición o calcinación del cemento, los cuales pueden determinarse con procedimientos estandarizados que cualquier laboratorio certificado de control de calidad de materiales podría realizar (NMX-C-414-ONNCCE-2017). El primer parámetro, densidad, de la caliza se sabe que está entre 2.2 y 2.6 g/cm³ en cambio el del cemento Portland (clínker y yeso nada más) es del orden de 3.15 g/cm³. Valores menores a este de 3.15 g/cm³ en los cementos compuestos son indicio de la existencia de rellenos inertes, si solo caliza es añadida en el cemento (situación bastante común en nuestros países).

El segundo parámetro, que es el porcentaje de la pérdida por ignición o PI%, también podría usarse para determinar el contenido de relleno inerte en los cementos CPC, ya que el clínker y las puzolanas o la escoria regularmente pierden un 1% o menos, un 3% y un 2%, respectivamente, si se coloca dentro de un horno a 900 °C. Sin embargo, el PI% de la caliza alcanza valores entre 35% y 45%, dependiendo de la finura y la pureza de la misma. Esta gran diferencia entre los valores de PI% hace sencillo el determinar el contenido de relleno inerte a base de caliza en los cementos, por lo que podría ser la técnica por excelencia para conocer las calidades de los cementos Portland en la actualidad.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CONSIDERANDO CRITERIOS DE DURABILIDAD

Para la segunda etapa en el modelo de economía circular en la construcción, la responsabilidad de que se cumpla recaerá en los diseñadores y constructores, los cuales deberán de cumplir las especificaciones necesarias para que las obras logren máximos desempeños por durabilidad, y así evitar reparaciones correctivas durante la vida de servicio de éstas, que implicaría un mayor consumo de materiales, que a su vez aumentaría las emisiones de GEI.

3.1. Especificaciones de los cementos para fabricar concretos durables

Para el caso de la fabricación de concretos durables, los requisitos recomendables no serán únicamente las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, etc.) sino las propiedades físicas que el concreto requiere tener para oponerse al transporte de agentes agresivos como el agua, los cloruros, el dióxido de carbono, los sulfatos, el oxígeno, etc. Las características físicas necesarias en los concretos diseñados como durables están consideradas en la NMX-C-530-ONNCCE-2018.

A grandes rasgos los concretos durables requieren utilizar cementos especiales o adiciones químicas o minerales que disminuyan la porosidad o las reacciones químicas que los agentes agresivos pudieran afectar al concreto en general. Como buenas prácticas de selección de materiales se podría listar las siguientes características que los cementos y/o materiales cementantes requieren tener para los diferentes ambientes o acciones agresivas a las que un concreto puede estar sometido.

Ambiente con cloruros (Cl⁻) marino o por una fuente diferente al marino: Se requieren usar cementos con concentraciones medias a altas de C₃A o C₄AF, siempre y cuando los contenidos de sulfato en el ambiente no sean elevados. De igual manera se recomienda el uso de adiciones minerales (puzolanas) para reducir la porosidad del concreto endurecido, evitando así el ingreso de los cloruros. Se debe especificar una calidad al cemento que se usará en obras de concreto expuestas a los iones Cl⁻ en función del tipo y algunas propiedades como la PI%. Para estos ambientes se debe de solicitar en las especificaciones de los proyectos durables cementos tipo CPC40 nada más,

y estos cementos deben de tener una $PI\% < 3\%$ para asegurarse de que se obtendrán concretos durables.

Ambiente con dióxido de carbono (CO_2) gas: Se requieren usar cementos cuyo contenido de clínker es el más alto posible, ya que el CO_2 tendría más material reactivo, disminuyendo así la velocidad de carbonatación del concreto. Si se usaran cementos con concentraciones medias a bajas de clínker, se recomienda el uso de adiciones minerales (puzolanas), evitando así el ingreso de CO_2 gas o agua que generan estas reacciones. La especificación que debe cumplir los cementos para la fabricación de concretos expuestos a este ambiente es menos restringido que para ambientes marinos, permitiendo usarse cemento tipo CPC30, sin embargo, debe este cemento poseer una $PI\% < 6\%$.

Ambiente con sulfatos (SO_4^{-2}) o dióxido de azufre (SO_2) ambiental: Se requieren usar cementos con concentraciones bajas de C_3A o C_4AF (tipo RS) para evitar la transformación de monosulfatos de aluminio en etringita. También se podría reducir la porosidad del concreto endurecido colocándoles adiciones minerales (puzolanas), evitando así el ingreso de agua que generan estas reacciones. El cemento además de ser un RS se permite que pueda ser un tipo CPC30, con una $PI\% < 6\%$.

Ambiente alto en álcalis: En el caso de que los agregados pudieran reaccionar con los álcalis del cemento ($NaOH$ y KOH) o de una fuente externa, requieren usarse cementos con bajo contenido de éstos (cementos tipo BRA). De no tenerse esta característica en el cemento se podrá remplazar el cemento con adiciones minerales (puzolanas) las cuales reducen el pH y la porosidad del concreto endurecido, evitando así el ingreso de agua que generan estas reacciones. Se permite el uso de cementos tipo CPC30 con una $PI\% < 8\%$.

Ambientes de heladas y deshielo: Si el concreto se expone a ambientes de congelamiento y descongelamiento del agua que esté dentro de la porosidad del mismo, se requiere añadir pequeñas burbujas aisladas (sin interconexión entre ellas) para que puedan tomar los esfuerzos de tensión que se generan cuando el agua líquida se transforma en estado sólido o hielo (estado del agua con menor densidad que el estado líquido). Estas burbujas aisladas funcionan para amortiguar las expansiones y así prevenir que éstas generen grietas en la pasta hidratada del cemento o porosidad en los agregados. Para generar estas burbujas aisladas se requiere utilizar aditivos inclusores de aire en el concreto.

3.2. Consideraciones generales para el diseño de mezclas

Con base en la NMX-C-530-ONNCCE-2018, el especialista responsable en durabilidad requiere tomar en cuenta el ambiente al que va a estar expuesta la estructura para así definir el concreto que se necesita emplear para ofrecer la vida de servicio esperada para la estructura. La información que proporciona esta normativa incluye aspectos como la agresividad química del medio y del suelo, atmósfera de exposición (humedad relativa o temperatura) y otros agentes agresivos, los cuales influyen en la durabilidad de la estructura.

Definido el medio ambiente al que estará expuesta la estructura, el diseñador por durabilidad requiere definir las proporciones de la mezcla que el concreto debe poseer para resistir la agresividad del ambiente y así, evitar la aparición de daños dentro de la vida útil de diseño. Éstos podrían ser variados dependiendo del ambiente de exposición, como manchas de óxido, grietas o delaminaciones producidas por la corrosión del acero de refuerzo, grietas con lixiviaciones o eflorescencias, grietas producidas por la expansión de productos químicos generados por reacciones químicas entre las fases hidratadas del cemento y los contaminantes ambientales, etc.

Las características de la mezcla de diseño que la NMX-C-530-ONNCCE-2018 especifica incluyen la relación a/c máxima, la cantidad mínima de cementantes (cemento Portland, ceniza volante, micro sílica, meta caolín, etc.), el espesor de recubrimiento mínimo y cumplir con algún índice de desempeño por durabilidad como es el caso de la resistividad eléctrica saturada (ρ_s). También se ha visto que el tipo de cemento afecta el desempeño por durabilidad de los concretos, y esto se debe principalmente a la finura de éste, su PI% y al contenido de clínker que varía como se expresa en la NMX-C-414-ONNCCE-2017.

Una vez diseñado el concreto a utilizar en la estructura para resistir la exposición ambiental, se diseña la estructura por acciones mecánicas, tomando en cuenta las características del concreto, principalmente la relación a/c, para determinar la resistencia mecánica que el concreto (diseñado con criterios de durabilidad) alcance cuando endurezca. Regularmente se considera tomar el valor de diseño característico de estos concretos a edades de 90 a 120 días y no a 28 días de fraguado. Esto principalmente porque concretos con adiciones minerales (como la puzolana, ceniza volante o la micro sílica) reaccionan más lento que un cemento sin adiciones.

En la etapa de diseño de la estructura intervienen las técnicas normales de diseño estructural, aunque el especialista responsable en durabilidad requiere estar estrechamente vinculado al especialista responsable en diseño estructural para que puedan cumplirse las metas previstas. Se requieren definir parámetros tales como recubrimiento de concreto para el acero de refuerzo, tipo de acero, calidad y desempeño del concreto, etc., que influyen en la durabilidad de la estructura.

La corresponsabilidad en esta etapa también recae en las entidades normativas, que deberán de sustituir procedimientos y estándares que actualmente se utilizan que demeritan la calidad de las obras. Como, por ejemplo, la poca exigencia de las instancias gubernamentales o privadas para que las obras construidas sean durables, seleccionando a los contratistas que presenten las propuestas económicas más solventes (en otras palabras, las más baratas) que regularmente utilizan los materiales más baratos y que no cumplen con los estándares de calidad para lograr esta durabilidad de las obras que se necesita.

3.3. Consideraciones para la correcta construcción, supervisión y control/seguramiento de la calidad de obras durables

El proceso de fabricación de las mezclas de concreto, su transporte, colocado y compactación deben ser estrictamente revisados durante todo el tiempo en que la obra se ejecuta. Tomando en cuenta que estos concretos son regularmente más densos y con poca trabajabilidad, será necesario cuidar su correcta colocación mediante el uso de aditivos plastificantes para evitar segregaciones.

El curado es el proceso indispensable para lograr la efectividad de las reacciones de hidratación del cemento que conduce a la adquisición de resistencia y a la reducción de la porosidad, contracciones y agrietamiento a edad temprana. Para el caso de concretos durables, en donde el contenido de cemento es regularmente por arriba de 400 kg/m^3 (altas temperaturas de hidratación por tenerse cantidades grandes de cemento) y las relaciones agua cemento menores a 0.40, el curado es de vital importancia para poder hidratarse el cemento en contenidos tan bajos de agua de mezclado. Es por ello por lo que el curado debe de tenerse mayores cuidados que un concreto convencional o estructural. El concreto debe mantenerse en un ambiente húmedo por lo menos durante catorce días en el caso de cemento ordinario y siete días si se empleó cemento de alta resistencia inicial. Estos lapsos deben aumentarse si la temperatura desciende a menos de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (NMX-C-530-ONNCCE-2018).

También es muy importante revisar que los recubrimientos que se especifiquen se cumplan durante la etapa de construcción del proyecto, recordando que los valores que regularmente se especifican



son distancias libres de la superficie del elemento estructural al paño del acero más expuesto, que regularmente son los estribos (acero transversal). Antes de autorizar el colado de un elemento de concreto con acero, se debe de verificar que el recubrimiento nominal de cada uno de los aceros a ser embebidos cumpla los recomendados en el proyecto. Una vez colado el elemento estructural y la cimbra removida del mismo, la supervisión deberá de verificar el recubrimiento del acero en ese elemento fabricado utilizando un detector de metales, comúnmente llamado pacómetro (NMX-C-530-ONNCCE-2018).

En la parte de supervisión y control de la calidad de concretos durables se debe de dar un seguimiento cercano al proceso de fabricación, transporte, colocación, consolidación y curado, dosificación y recubrimiento. Esta necesidad de verificar que el concreto colocado en los elementos estructurales cumple con el desempeño solicitado en el diseño se debe a que el realizar estas pruebas en cilindros estandarizados, fabricado por laboratoristas o especialistas acreditados para fabricación de éstos, no pudiera reflejar lo que en realidad se colocó en los diferentes elementos de concreto de la obra (NMX-C-530-ONNCCE-2018).

La verificación debe incluir el verificar que el concreto en el elemento estructural cumpla el desempeño solicitado, principalmente la resistividad eléctrica saturada, y/o velocidad de pulso ultrasónico y/o la absorción capilar. De esta manera el dueño se cerciora que lo colocado en su obra es realmente durable.

Para el caso de la fabricación y dosificación del concreto para obras durables, es obligación por parte de la contratista y/o la supervisión externa el extraer testigos de concreto en elementos estratégicos para determinar que el concreto ya colocado y endurecido, cumpla con los requisitos de desempeño por durabilidad proyectados.

4. USO/OCUPACIÓN y MANTENIMIENTO

El que una obra construida alcance el periodo de vida útil por el que fue diseñado debe de contemplar que, en su totalidad, el proyecto posee diferentes materiales que cada uno de ellos posee un tiempo de vida de servicio, o vida útil diferente.

Esta parte es esencial para el proyecto pues es la que permite asegurar que las condiciones establecidas de vida de servicio (arquitectónica, estructural y durable) se cumplan. Es importante incluir la planeación del mantenimiento a seguir cuando la estructura se encuentre en servicio. Se deben especificar en detalle aspectos como verificación periódica de daños (sea cual sea su origen), interacción entre los elementos e instalaciones de la misma estructura, mantenimiento periódico con pinturas, sustitución de piezas, funcionamiento de drenajes y manejo general de aguas, etc., deben ser cuidadosamente especificados. Deben incluirse también esquemas y formatos para llevar a cabo exitosamente el plan de mantenimiento, así como un entrenamiento periódico a los responsables de esta parte.

Un ejemplo a lo que se refiere esta etapa del diseño de una estructura durable recae en un puente que puede diseñarse con una vida útil de 80 años. Este tipo de estructura no solo posee elementos de concreto que pueden ser diseñados con criterios de durabilidad. También posee apoyos (por ejemplo, de neopreno), juntas de dilatación, una carpeta de rodamiento que puede ser de pavimento asfáltico, barandales metálicos, etc. Estos elementos son fabricados o construidos con diversos materiales (acero, aluminio, neopreno, etc.) que poseen diferentes vidas de servicio o útiles y no alcanzar estos 80 años de vida útil del puente diseñado. Es por ello por lo que se debe estimar la

vida útil de cada elemento para así programar sus remplazos y no mermar los 80 años de vida que se consideró en el diseño de la estructura.

5. DECONSTRUCCIÓN Y RECICLADO DE LOS MATERIALES OBTENIDOS DESPUÉS DE LA DEMOLICIÓN DE LA OBRA

Por último, para la cuarta etapa en el modelo de economía circular en la construcción, es muy raro que existan políticas, estándares o incentivos para reutilización de los materiales producto de la demolición de obras que han llegado al fin de su vida de servicio.

Trabajos de investigación aplicada para estudiar el reúso de estos materiales se ha abocado principalmente al reciclado del concreto que puede reutilizarse como agregado grueso (grava) para la fabricación de nuevos concretos (con su respectiva reducción en el desempeño de estos nuevos concretos por la porosidad alta que el concreto reciclado posee).

Es por ello por lo que se necesita investigar más al respecto y que los gobiernos y la iniciativa privada generen la normativa para regular estos productos reciclados y así cerrar el círculo de esta economía (llamada circular) en la industria de la construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo recibido por parte del Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Campus Querétaro por las facilidades brindadas para la generación de este documento y la presentación del mismo en el evento al que se participó.

7. REFERENCIAS

Al-Shmaisani, S., Kalina, R., O'Quinn, K., Kyeong-Jang, J., Rung, M., Ferron, R., Juenger, M. (2021). "Supplementary Cementitious Materials: Assessment of Test Methods for New and Blended Materials," Technical Report 0-6966-1 TxDOT Project Number 0-6966, The University of Texas at Austin, Center of Transportation Research.

CANACEM (2023). "Hoja de Ruta México Industria del Cemento: Hacia una economía baja en carbono," Cámara Nacional del Cemento, Av. Insurgentes Sur 1190, Tlacoquemecatl del Valle, Benito Juárez, 03200 Ciudad de México, México.

NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), CdMx, México.

NMX-C-530-ONNCCE-2018. Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), CdMx, México.

Torres Acosta, A.A., Méndez Páramo, R. y Herrera Sosa, E.S. (2024). "Desempeño de concretos fabricados con cementos portland compuestos, CPC: Evidencias de su durabilidad en ambientes marino, urbano o industrial," Vías Terrestres, Número 87, Año 16, enero-febrero, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 9-15.

Torres Acosta, A.A., Méndez Páramo, R. y Herrera Sosa, E.S. (2023). “Evidencias en el desarrollo de resistencia a la compresión y contracción plástica de concretos fabricados con cemento portland compuesto (CPC),” *Vías Terrestres*, Número 86, Año 16, noviembre-diciembre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 17-22.

Torres Acosta, A.A. (2022). “¿Por qué la infraestructura vial de concreto en el país sufre daño en tan pocos años?,” *Vías Terrestres*, Número 78, Año 13, julio-agosto, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 23-31.

Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A.A., Tobón, T., John, V.M. (2022). “Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality,” *RILEM Technical Letters* 7, pp.30-46, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>.

Yumha, J.P. (2014). *Construcción sustentable*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Gobierno de Chile. <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/12/JP-Yumha-Construccion-Sustentable.pdf>.



Opportunities and challenges of using limestone in eco-efficient cements

P. Perez-Cortes^{1*}, J. I. Escalante-García²

*Autor de Contacto: pedro.perez@molins.es

¹ Cementos Molins S.A., R&D Group, 08620 Barcelona, Spain

² Ingeniería Cerámica, Cinvestav Unidad Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

ABSTRACT

Limestone, an abundant natural resource, is an essential component in cement manufacturing. It not only constitutes the primary raw material for clinker production but also, as a sustainable supplementary component in blended cementitious systems, it can become the majority component for the manufacture of more eco-efficient cements. This conference addresses the role of limestone in the development of eco-efficient cements from scientific, economic, and environmental perspectives. Some opportunity areas for incorporating limestone as a partial substitute for clinker in traditional cements and as a complementary precursor in alkaline cements are explored. Additionally, it is discussed the technical, regulatory challenges, and the need for further studies to enhance the production and commercialization of eco-efficient cements with high limestone content. Thus, this conference provides a comprehensive view of the importance of limestone in producing sustainable, low CO₂ emission cements, contributing to a more sustainable future.

Keywords: Sostenibilidad; Factor clínker; Cementos calizos; Geopolímeros; Activación alcalina.

1. INTRODUCTION

The increasing emphasis on sustainability in construction has driven significant interest in developing eco-efficient cements. Portland cement production accounts for approximately 5-8% of global anthropogenic CO₂ emissions, mainly due to the energy-intensive clinkerization process and the calcination of limestone. As the demand for cement is projected to rise significantly, particularly in rapidly growing economies (U.S. Geological Survey, 2020), there is a pressing need to explore sustainable alternatives that can mitigate the environmental impact of cement production. Among the various approaches, the utilization of limestone as a key component in cement formulations has garnered considerable attention.

Natural limestones are mainly composed of CaCO₃ minerals like calcite, aragonite, and vaterite, and may include dolomite (CaMg(CO₃)₂) and traces of Al, Si, Fe, and alkaline oxides (Gupta et al., 2020), and account for 7-15% of the crust of the earth (Liu et al., 2023; N. Rakhimova, 2022). With a Mohs hardness of 3 for calcite and 3.5-4 for dolomite, the grinding process to obtain limestone powder (LS) is easy, cheap and low energy demanding (Opoczky, 1992). These limestone features in addition to its abundance and widely availability, make LS an attractive raw material for the manufacture of sustainable cementitious materials. The LS use has been studied in Ordinary Portland cement (OPC) systems, either alone or in conjunction with other supplementary cementitious material (SCM) such as fly ash, slag, and calcined clay, and in alternative free-clinker alkaline cements. In the latter, solid aluminosilicate precursors like fly ash, metakaolin (MK), and blast furnace slag (BFS) are chemically activated under strongly alkaline conditions, primarily using sodium-based alkaline salts. The dissolution of these precursors is followed by polycondensation/precipitation processes, forming fully polymerized, 3D cross-linked, structurally disordered alkali aluminosilicate networks (N-A-S-(H), (N,C)-A-S-(H) and/or laminar structures as C-A-S-H gels (Garcia-Lodeiro et al., 2011). The negative charge from the substitution of Si(OH)₄ by tetrahedral Al(OH)₄⁻ is balanced by alkali cations (Na⁺, K⁺) from the activator (Walkley et al., 2021).

This paper explores the opportunities and challenges associated with using limestone in eco-efficient cements. It examines the role of limestone in both Portland cement systems and alkaline cement systems, with a focus on rheology, hydration kinetics, microstructure, mechanical properties, and durability. Additionally, the paper discusses the implications of using high limestone content in ternary Portland cement and alkaline cement systems, as well as the regulatory aspects and future research needs in this area. Through a comprehensive review of the existing literature, this study aims to provide insights into the potential of limestone to contribute to the development of sustainable cementitious materials.

2. ROLE OF LIMESTONE IN PORTLAND CEMENT SYSTEMS

2.1 Rheology

Limestone plays a crucial role in modifying the rheological properties of OPC systems. The addition of LS can improve the workability of cement pastes and concretes by influencing their plastic viscosity and yield stress; in these parameters the particle size of LS plays an important role as occur with others SCMs and cement. In binary systems with 20% OPC (9µm) replacement (Figure 1), it is reported a reduction of up to 50% in both plastic viscosity and yield stress when the d₅₀ of LS increased from 0.7 µm to 15 µm (Vance et al., 2013). The study suggested that LS



particles coarser than OPC decrease the yield stress and the plastic viscosity while the opposite can occur for finer particles. The authors (Vance et al., 2013) suggest that LS particles sizes like OPC particles produce an increase in particle spacing in the fresh paste, which reduces the ability of the suspension to resist shear. Additionally, coarser LS particles reduce the water demand and enhances the fluidity of the cementitious mixtures due to a decrease in the available area for the formation of water films (Tennis et al., 2011). Moreover, coarser LS particles reduce the agglomeration by reducing the possibility of water remaining trapped within flocs, where it is unavailable to provide fluidity to the cement paste (Vance et al., 2013).

The recent advances in engineering particle size distribution combined with the use of efficient dispersants allow higher use of LS content, and even use finer fraction of LS to produce more efficient cement binders with good properties in both fresh and hardened states. In the chemical admixtures area, the performance of cement dispersants has improved substantially in recent years (Scrivener et al., 2018). The favorable effects of the LS and good compatibility with most of the admixtures and SCMs (Dhandapani et al., 2021) are crucial to potential the use of more eco-efficient binders.

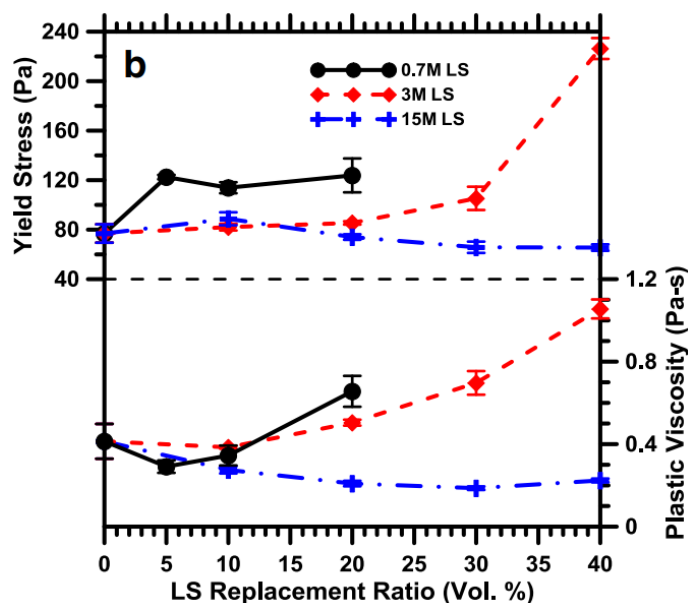


Figure 1. The influence of LS particle size and replacement level on the yield stress and plastic viscosity of cement pastes (Vance et al., 2013)

2.2 Hydration kinetics

The inclusion of LS in Portland cement systems significantly impacts the hydration kinetics, which is a critical aspect influencing the early-age properties and overall performance of cementitious materials. The hydration process involves complex chemical reactions between the cement clinker phases and water, leading to the formation of hydration products that contribute to the development of strength and durability in concrete. Some studies have shown that LS is more efficient than other filler materials in accelerating the hydration of cement clinker and reducing the dormant period (Dhandapani et al., 2021). LS acts as a nucleation site for the precipitation of hydration products, particularly calcium silicate hydrate (C—S—H), which is the primary binding phase in cement.

The presence of finely ground LS particles provides additional surfaces for the nucleation and growth of C—S—H, thereby accelerating the initial hydration reactions. As reported in (Bazzoni, 2014), LS particles enhance the hydration rate of C₃S by promoting a nucleation of C—S—H products in its surface grains; this leads to a heterogeneous distribution of hydration products, which further homogenize the microstructure and facilitate to reduce the open capillarity porosity (Figure 2).

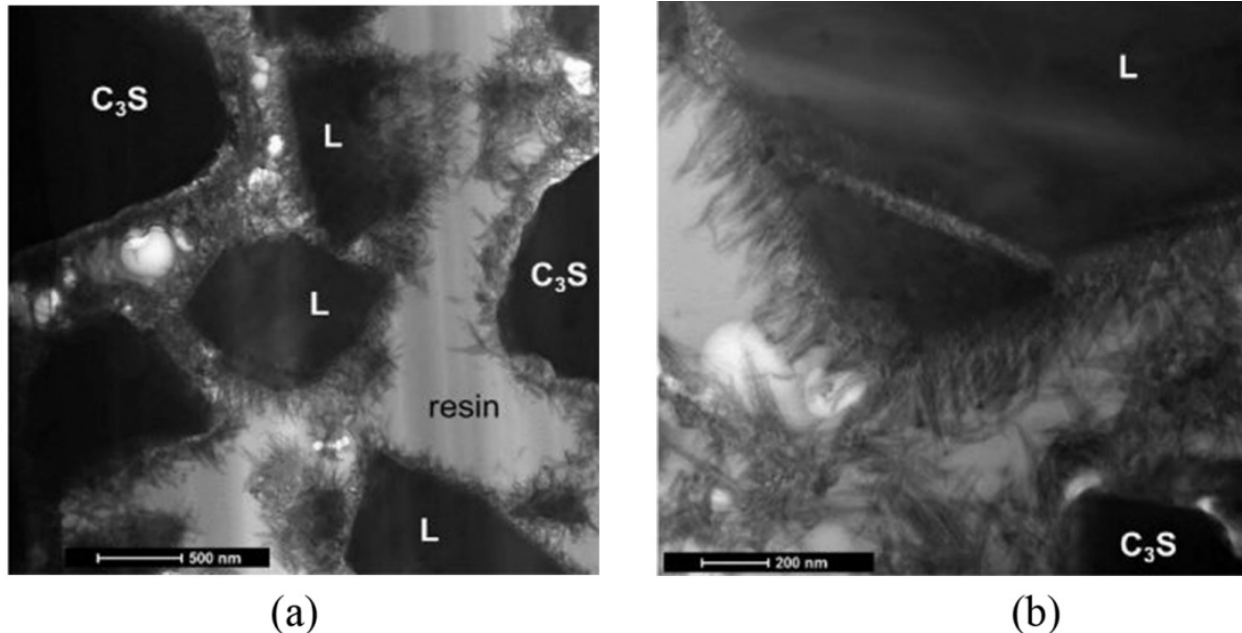


Figure 2. TEM image showing nucleation on LS grains (L) inside a binder mixture of 60% alite (C₃S)–40% LS (Bazzoni, 2014).

Additionally, the partial dissolution of finely ground LS particles releases Ca²⁺ ions in the solution, which increases the saturation index of C—S—H, and this further improves the tendency for the precipitation of C—S—H (Dhandapani et al., 2021). It was reported that the Ca concentration increased from 596 to 630 mg/L for OPC systems with 40% quartz and 40% LS, respectively (Berodier & Scrivener, 2014). Moreover, LS contributes to the formation of carboaluminate phases, which further influences the hydration kinetics by stabilizing ettringite and modifying the pore structure of the cement paste (Matschei et al., 2007). Ettringite amount was found to be stable in LS-OPC systems with an increasing amount of LS content up to 35% (Kakali et al., 2000).

2.3 Microstructure

The incorporation of limestone in composite cement systems significantly alters the microstructure, leading to enhanced performance characteristics. The microstructural changes are a result of several mechanisms, including the filler effect, nucleation effect, and chemical interactions between LS and the hydration products of cement and supplementary cementitious materials (SCMs). Regarding to the filler effect, LS acts as a microfiller in cementitious composites, contributing to a denser packing of the particles within the matrix. This improved particle packing reduces the interstitial voids between the cement grains, leading to a reduction in porosity and an increase in density. The fine LS particles fill the gaps between larger cement particles and SCMs,

leading to a more homogeneous and compact microstructure (Dhandapani et al., 2021). Significant refinement of pore sizes was observed at 10% substitution levels of metakaolin with both LS and dolomite-based carbonate sources (Machner et al., 2018); higher levels of LS can increase the total porosity (Tennis et al., 2011), however, this depends on several factors. When used in combination with SCMs, such as fly ash, slag, and metakaolin, LS further modifies the microstructure through synergistic effects, leading to a denser and more durable microstructure (more detail in (Dhandapani et al., 2021)). Moreover, the presence of finely dispersed LS particles and the formation of carboaluminate phases contribute to the reduction of capillary pores and an increase in the proportion of gel pores (Matschei et al., 2007). So, all these combined effects lead to a significant refinement of the pore structure in composite cements containing limestone.

2.4 Mechanical properties

All the abovementioned effects of the LS finally have a significant impact on the mechanical properties of the composite cement systems. The addition of LS improves compressive strength, particularly at early ages, due to the accelerated hydration and densification of the microstructure. In addition, studies (Voglis et al., 2005) have shown that the presence of LS in Portland cement paste increases early strength due to the formation of tricalcium aluminum carbonate hydrates ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$). It has been reported that LS addition has better impact at early age compared to SCM additions like fly ash and natural pozzolans (Dhandapani et al., 2021); so, the early strength benefits of LS and its good compatibility with other SCMs can be used to produce more eco-efficient ternary cements.

Over the long term, the inclusion of LS in composite cements has been shown to maintain the mechanical integrity of the concrete, although the mechanical performance is governed by the LS dosage, binder formulation and water-binder ratio. The critical factor on the LS dosage is the dilution effect which reduces the mechanical strength, and sometimes could mask the beneficial effects of the limestone. At dosages between 5-10% LS, the dilution effect seems to be minor, but it can be significant at higher loads; a study based on 171 publications between 1993 and 2015 showed that 15% reduction in strength likely up to 25% LS (Elgalhud et al., 2016). However, the mechanical performance is also dependent on other factors like particle size of LS, clinker characteristics and the presence of other SCMs, which can synergistically enhance the strength characteristics (Dhandapani et al., 2021). Additionally, compressive strength can be controlled by adjusting w/b and suitable mixture proportioning of concrete, once continuous development of properties with a binder composition is ensured. Considering all these factors, it is possible to produce high-strength concretes using composite cements with high limestone additions, as described below.

2.5 Durability

Regarding the influence of limestone on the durability of Portland cement systems, it is reported that concrete with up to 20 wt% LS can exhibit more or less the same resistance against freeze-thaw attack in comparison with samples composed with only Portland cement (Palm et al., 2016); the performance can be influenced by the LS quality. Similar resistance behavior has been reported for Portland limestone cement with 20 wt.-% LS against permeability of chloride ion (Tsilivilis et al., 2000) and against carbonation resistance (Dhandapani et al., 2021). Other studies (Panesar & Zhang, 2020) showed that limestone contents higher than 15% decreased the durability of concrete, leading to increased chloride permeability, carbonation depth and sulfate attack when compared to the control. However, there is scattered results among the literature reports; some authors suggest



that irrespective for concrete with Portland limestone cement, the carbonation resistance is directly related to the compressive strength (Matthews, 1994), in which concrete based on cements with low w/c ratios of 0.35 and up to 50%LS exhibited comparable behavior than those formulated with OPC (Müller et al., 2013). Under the same strength conditions, concrete samples made of Portland limestone cement exhibited slightly lower carbonation resistance than those with OPC (Müller et al., 2013; Proske et al., 2013).

Studies showed that the chloride ion permeability of concretes made of Portland limestone cements is highly dependent on their w/c-ratios (Meddah et al., 2014; Müller et al., 2013; Ramezani pour et al., 2009). Increase of LS content up to 45 wt.-% worsens the chloride ion diffusion resistance for w/c-ratios between 0.45 and 0.65 (Meddah et al., 2014). These works show that concretes made with cements containing high LS contents (up to 50 wt.% or more) under conventional concrete technology conditions (e.g., low packing density and high water-to-cement ratios >0.45) fail to meet practical application requirements, primarily due to durability issues. Therefore, modifications to conventional concrete technology are essential when using cements with high LS contents.

3. ROLE OF LIMESTONE IN ALKALINE CEMENTS

3.1 Rheology

Similarly as for OPC systems, LS plays an important role in improving the rheology of the alkaline cement materials in the fresh state. It has been shown that incorporating LS with a wide particle size distribution enhance the fluidity of the alkali-silicate activated metakaolin (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a, 2020b; Qian & Song, 2015). As for OPC systems, it is thought that proper LS particle sizes reduce the yield stress and plastic viscosity in the alkaline binders, in which LS particle sizes similar to precursors increase particle spacing in fresh paste, reducing shear stress; on the other side, coarser particles lower water demand and enhance fluidity by decreasing the area available for water film formation (Tennis et al., 2011). Although finer LS particles are generally expected to have the opposite effect, a study (Aboulayt et al., 2014) reported a reduction in the plastic viscosity of alkali-activated metakaolin within the first 15 minutes when 12% of finer LS particles were incorporated. The favorable effect of the LS in the rheology of the alkaline binders allows design alkaline materials with lower water content and high mechanical properties while keeping good workability (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a, 2020b).

3.2 Reaction mechanisms

According to Firdous et al. (Firdous et al., 2021), the reaction mechanism of calcium carbonate minerals in sodium silicate solutions (WG) follows the schematic representation as indicated in Figure 3. During the initial hours of reaction, natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) precipitated as the first crystalline carbonate phase; at the same time, changes in the connectivity of silicate were observed due to the precipitation of C-S-H, which may contain Na^+ ions. After 8 and 90 days, C-S-H was observed alongside with thermonatrite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) instead of natron. The authors concluded that calcium carbonates in the calcite and aragonite polymorphs, is not just a filler in AAC systems but can provide Ca^{2+} to form C-S-H and can also enhance the availability of carbonate for of alkali carbonates formation.



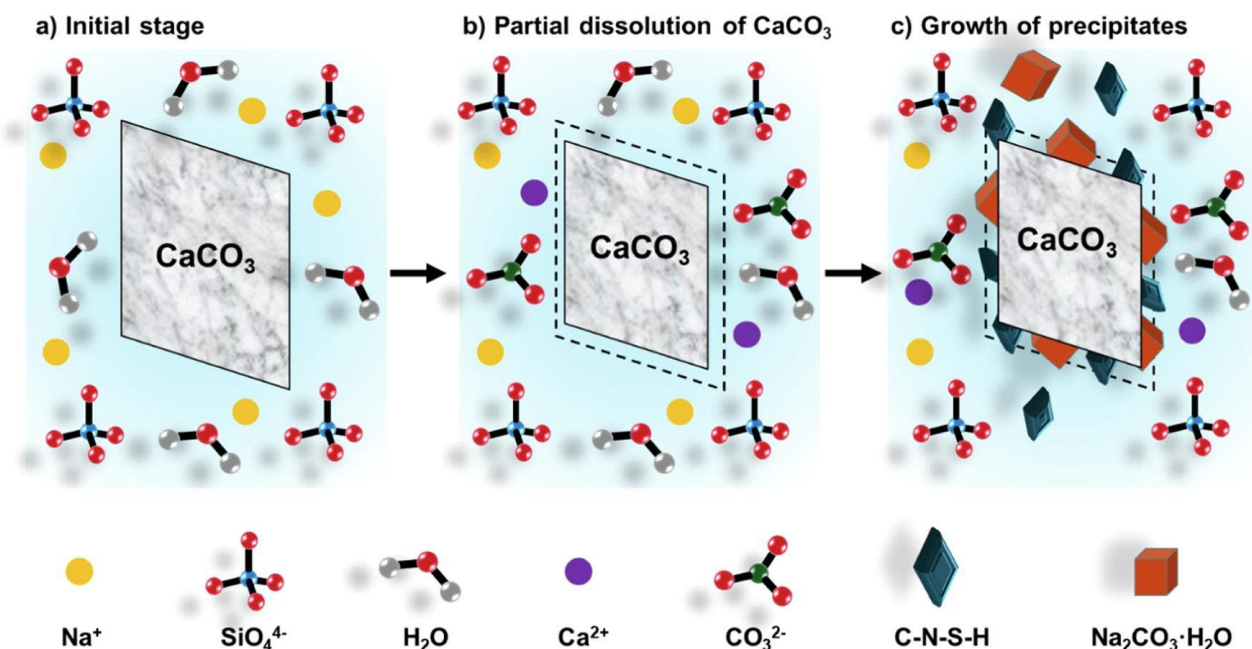


Figure 3. Schematic representation of the reaction process of LS in waterglass solution.

3.3 Microstructure

Owing to the reduced water demand and physical features of the LS as mentioned above, the incorporation of LS in alkaline cements enhance the compactness of the microstructure of the materials. Additionally, the dissolution of LS particles releases Ca^{2+} , which then reacts with the Si and Al species, and eventually form a type of C—S—H (N. R. Rakhimova et al., 2016), Si-gel modified- CaCO_3 (Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020) and/or Ca-incorporated sodium aluminat gel (N, C)—A—S—H with 3D geopolymer structure (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020c), all this depending on the nature of the supplemented precursors and activators used in the compositions. It is reported that the addition of LS to CaO/NaOH activated waste glass promoted the formation of denser microstructures, increased the Ca/Si in the matrices while favoring the stability of pastes and mortars under water; the LS participated physically and chemically in the formation of reaction products (Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020).

3.4 Mechanical properties

Limestone particles also play an important role in the mechanical properties of alkaline cement binders. Their incorporation increase the physicochemical bounded water and provided extra nucleation sites that slightly accelerated the reaction process (Gao et al., 2015); at the same time, LS particles improve the packing density and physical structure of the binders (N. R. Rakhimova et al., 2016). On the chemical effect side, LS promotes the formation of new reaction products of type C—S—H (N. R. Rakhimova et al., 2016) or Si-gel modified- CaCO_3 (Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020) and/or 3D (N, C)—A—S—H gel (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020c), which densified the microstructure; all of this finally have a positive effect on the compressive strength of the alkaline cement materials.

The mechanical performance of the alkaline limestone cement materials strongly depends on the mix design. For alkali-activated aluminosilicate-limestone cements, we have proposed a new approach design, which involves properly adjusting the $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios in the

composition systems in a way that higher LS loads mean lower amounts of alkaline activator in the alkaline systems, which implies a reduction in CO₂ emissions, energy demand and production cost. Further details can be found in (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020b, 2020a), and some results are summarized below.

3.5 Durability

Although the durability studies on limestone-containing alkali activated cements are scarce, literature reports indicate that Ca²⁺ released from LS in alkali activated aluminosilicate binders is incorporated into the sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) network, forming a type sodium (calcium) aluminosilicate hydrate (N-(C)-A-S-H) with a 3D network structure (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020c), which is considered thermodynamically stable and durable (Provis et al., 2005). Studies on this type of materials indicated that the N-(C)-A-S-H gel did not undergo substantial structural changes when exposed to 300°C, so the compressive strength was not adversely affected in formulations with 60%LS and/or Na₂O/Al₂O₃=0.60 and SiO₂/Al₂O₃=3.17, retaining values above 50 MPa. Other studies by the same authors on the resistance to magnesium sulfate (Perez-Cortes, 2021) and HCl attack indicated (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2023) indicated negligible structural changes in the former environment and external degradation in the latter; despite de microstructural and mass changes, samples with low Na₂O/Al₂O₃=0.60 preserved their strength after the 360 days of exposure. Other study (Vazquez-Leal et al., 2023) indicated that the incorporation of 30%LS showed a beneficial effect in the electrochemical behavior of the steel embedded in mortar formulated with the same type of alkaline binder formulations; the steel embedded remained in the passivation during the evaluation time (156 days) according to the criteria of Icorr used for portland cement-based materials with values of Icorr below 0.005 μA/cm².

4. SYSTEMS WITH HIGH LIMESTONE ADDITIONS

4.1 Composite Portland cement systems with high limestone loads

The utilization of high LS content in composite cements presents a promising avenue for achieving eco-efficient concrete production. Achieving the desired properties in composite cements with high LS content requires careful optimization of the mix design. Principles for development of concrete based on limestone-rich cements with reduced clinker and water content are described in (Proske et al., 2013). By using these principles some studies (Müller et al., 2015; Palm et al., 2016) have reported that concretes made with cements containing up to 50%LS and water/cement ratio of 0.35 exhibit mechanical and durability properties comparable to concretes according to EN 206-1 and the German national application document DIN 1045-2 made of EN 197-1 cements (Figure 4 and Figure 5; see (Müller et al., 2015; Palm et al., 2016) for more details).



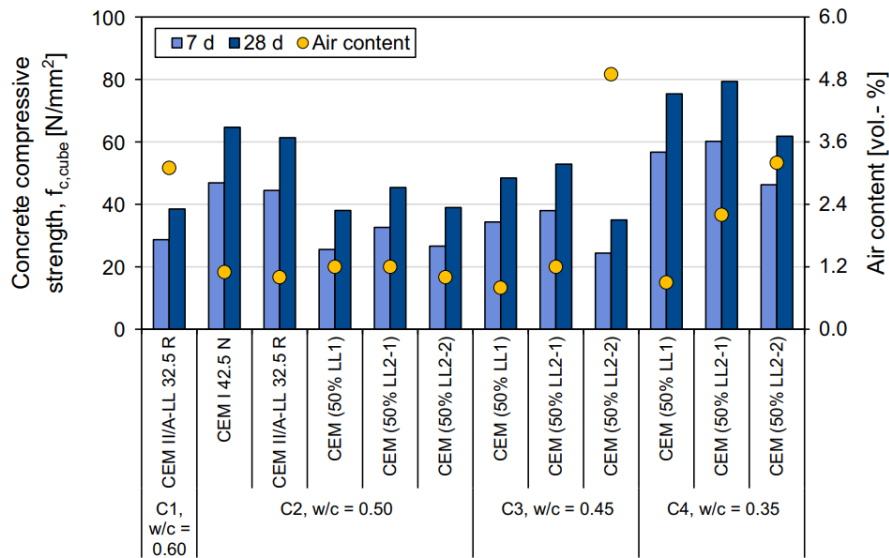


Figure 4. Compressive strength and air content of concretes (Palm et al., 2016).

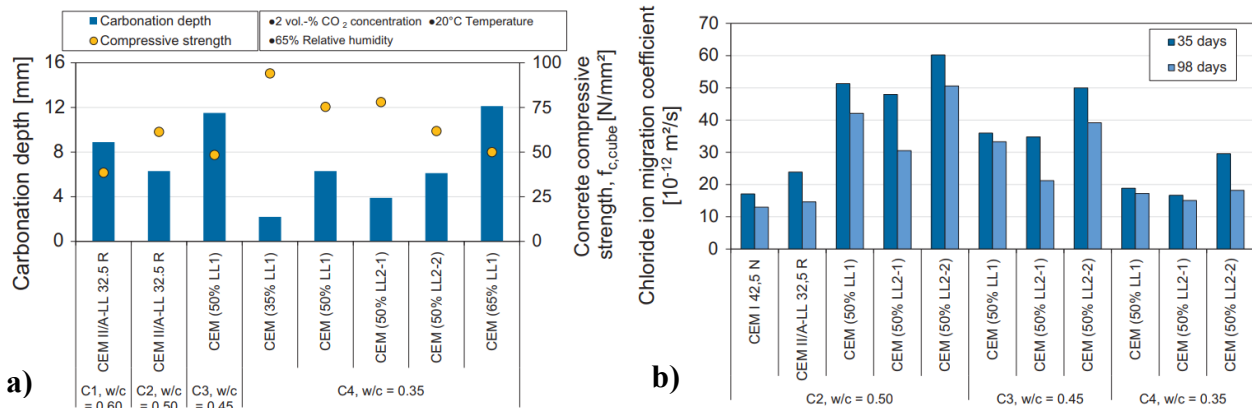


Figure 5. a) Carbonation depth of concretes after 28 days storage in 2 vol.-% CO₂ concentration; b) Chloride penetration on concretes (Palm et al., 2016).

Recently, innovative technologies in Europe are starting to commercialize eco-efficient cements that incorporate 50% LS, approximately 30% low-carbon supplementary cementitious materials (SCMs), and 20% clinker (ECOCEM, 2024), the factor emissions of which is around 200kg CO₂/t cement. The good compatibility of LS with the majority of the SCMs represents a promising avenue for developing eco-efficient cements with reduced clinker and very low CO₂ emissions. Optimization in mix design and particle size distribution as well as the use of efficient plasticizer/dispersant admixtures are crucial in this pathway.

4.2 Alkaline cements with high limestone loads

The use of high limestone loads in alkaline cement systems is a promissory alternative to produce more sustainable alkaline binders. Some studies (Liu et al., 2023; Ortega-Zavala et al., 2019; Yip et al., 2008) have been conducted on the alkaline activation of systems with 100% LS; although

the strengths in such studies were relatively low (compressive strengths of 10 y 25 MPa at 28 y 260 days) with limited applications in the construction industry, the results have elucidated that LS particles are not chemically inert in alkaline solutions. So, when LS is supplemented with other reactive aluminosilicate or calcium-aluminosilicate precursors is possible design limestone-rich alkaline binders with high mechanical strengths. Studies on the optimization on the limestone content in alkali-activated slag have reported up to 39 MPa (N. R. Rakhimova et al., 2018) and 65 MPa (Moseson et al., 2012) in pastes with 50%LS.

In alkali-activated aluminosilicate systems, LS partially dissolves and enhance the release of Al and Si ions from the aluminosilicate precursor forming N-A-S-H and Na-modified C-A-S-H gels with inclusions of zeolite A ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$) and carboaluminate phases (Cwirzen et al., 2014). Considering the compatibility between LS and aluminosilicate precursors, and implementing the approach design mentioned above (Section 3.4) combined with statistical optimization methods as detailed in (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020b, 2020a) is possible to produce limestone-rich alkaline cements with high compressive strength and very low CO_2 emissions. Sustainable limestone-rich alkali-activated metakaolin of high performance can be formulated, i.e., 60% LS, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=1.1.08$ and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3.17$; these reached up to 56.13 ± 1.94 and 61.46 ± 4.89 MPa after 1 and 28 days, respectively, with a reduction in CO_2 emissions of 61% in comparison to an OPC binder (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a). Results in concrete of this type of formulations with a dosage of 400 kg de binder/m³ showed compressive strengths of 47 and 57 MPa after curing a 20°C at 7 and 28 days, respectively (Escalante-Garcia & Perez-Cortes, 2018).

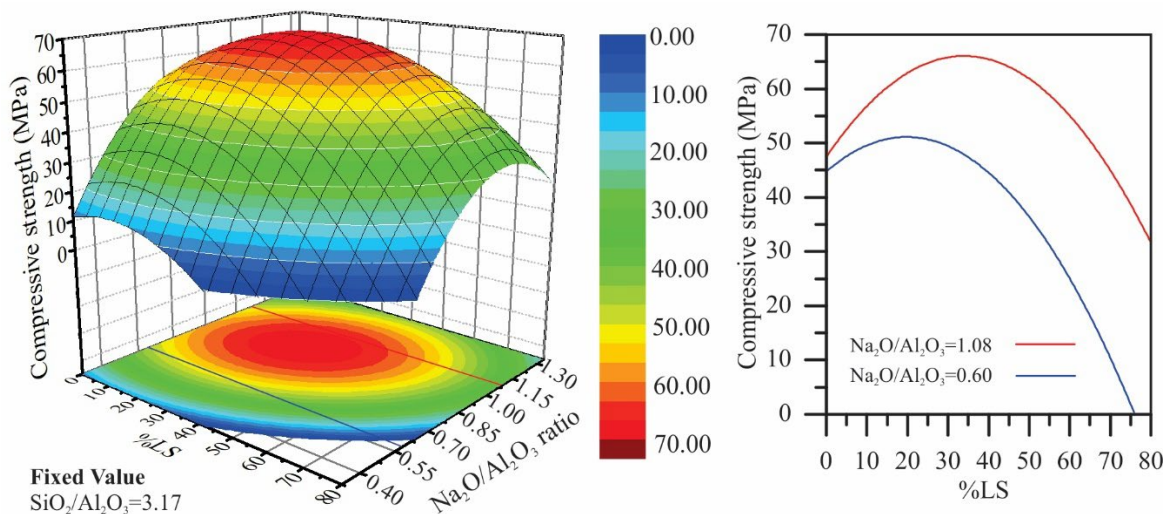


Figure 6. Response surface, contour and profile plots of effect of %LS and its interaction with $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio for a fixed $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3.17$ (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a).

Following the approach mentioned above, a further optimization and by using a water/precursor ratio of 0.23 was possible to increase the LS content up to 80% to produce alkaline binders of 50 MPa and carbon footprint lower than 200 kg CO_2 /t binder. The sustainability of these cements is also influenced by the alkaline activator demand, which increase costs and emissions. Alkali-activated metakaolin would require up to 25%Na₂Oeq; however, replacing metakaolin with 80%LS reduced Na₂O demand to 4% (Perez-Cortes and Escalante-Garcia, 2020b).

5. REGULATORY ASPECTS AND FUTURE STUDIES NEEDS

5.1 Regulatory aspects

The regulatory landscape for cement materials is evolving, with increasing emphasis on sustainability and performance. Addressing the regulatory challenges and identifying future research needs will be essential for the successful implementation of limestone-containing cements. The increasing use of LS in cementitious systems necessitates clear and supportive regulatory frameworks to ensure safety, performance, and sustainability. Current standards, such as those by ASTM and EN, allow for limited LS content in Portland cement (usually up to 15-35%). However, as research progresses, it is evident that higher LS contents can be beneficial without compromising the mechanical properties or durability of concrete.

Regulatory bodies need to update guidelines to reflect recent advancements, such as the incorporation of higher LS content in Portland and alkaline cement systems. This includes recognizing the benefits of LS in reducing CO₂ emissions, improving early strength development, and enhancing the overall sustainability of construction practices. Furthermore, establishing standardized test methods for evaluating the performance of these new cement formulations under various environmental conditions is crucial (Dhandapani et al., 2021).

5.2 Future Studies Needs

Future research should focus on several critical areas to advance the understanding and application of limestone in eco-efficient cements:

- **Long-Term Durability:** There is a need for comprehensive studies on the long-term durability of cement systems with high LS content, particularly in various exposure conditions such as sulfate environments, chloride exposure, and carbonation scenarios; Research on limestone-rich alkaline cements is scarce.
- **Performance in Diverse Climates:** Evaluating the performance of limestone-rich cements in different climatic conditions, including high temperatures and humidity, is essential to ensure their robustness and reliability in global applications.
- **Interaction with Supplementary Cementitious Materials (SCMs):** More research is required to understand the synergistic effects of LS with various SCMs, such as fly ash, slag, and calcined clays. This includes studying the hydration kinetics, microstructural development, and mechanical properties of these composite systems.
- **Innovative Applications:** Investigating the potential of LS in new types of binders, such as alkali-activated and hybrid cements, can open up further opportunities for reducing the carbon footprint of the cement industry.
- **Lower Grade Limestone Utilization:** Exploring the use of lower grade limestone reserves in cement formulations can contribute to resource conservation and cost reduction while maintaining performance standards.
- **Regulatory Frameworks:** Continued dialogue between researchers, industry stakeholders, and regulatory bodies is vital to update and harmonize standards that support the adoption of advanced cementitious materials.
- **Continued research and experimentation** are needed to refine these mix designs and ensure consistent performance across different batches and applications.

6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Limestone offers significant opportunities for enhancing the eco-efficiency of cementitious systems. Here, we highlighted the multifaceted role of LS in Portland and alkaline cement systems, emphasizing its impact on rheology, hydration kinetics, microstructure, mechanical properties, and durability.

Key conclusions include:

- **Sustainability:** LS addition reduces clinker content in OPC systems alkaline activator in alternative alkaline cements, thereby lowering CO₂ emissions and contributing to more sustainable construction practices.
- **Early Strength Development:** Small amount of fine LS particles can significantly enhance early strength development, making it suitable for applications requiring rapid strength gain. The nucleation effect leads to faster setting times and contributes to the development of early-age strength, which added to other physicochemical effects could partially compensate for dissolution caused by LS addition and sometimes, produce a marginal improvement in early age performance at lower LS loads.
- **Compatibility with SCMs:** LS works synergistically with various SCMs, improving the mechanical and durability properties of the resulting composite cements.
- **Need for Standardization:** Updated regulatory standards are essential to facilitate a broader adoption of limestone-rich cement formulations and to ensure consistent performance across different regions and applications.
- Overall, the incorporation of LS in cementitious systems offers several benefits in terms of rheology, hydration kinetics, microstructure, mechanical properties, and durability. These advantages make limestone a valuable component in the development of eco-efficient cements, aligning with the goals of sustainable construction and reduced environmental impact. However, challenges related to performance optimization, durability, and regulatory acceptance must be addressed. The integration of LS into various cement systems holds promise for advancing sustainable construction practices.
- **Recommendations for future research and industry practices include:**
- **Durability Studies:** Conducting long-term durability studies under diverse environmental conditions to build confidence in the use of high LS content cement binders.
- **Optimization of Formulations:** Optimizing the particle size, quality, and quantity of limestone, along with the type and reactivity of SCMs, to tailor cement formulations for specific applications.
- **Resource Efficiency:** Investigating the potential use of lower grade limestone and industrial by-products to enhance resource efficiency and reduce costs.
- **Regulatory Engagement:** Engaging with regulatory bodies to update and harmonize standards that reflect the latest scientific and technological advancements in cementitious materials
- By addressing these areas, the cement industry can make significant strides towards more sustainable and efficient construction practices, leveraging the benefits of limestone to meet future demands.



7. ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to Cementos Molins S.A. for the financial support to attend the XI Congreso Nacional de Alconpat México 2024.

8. REFERENCES

- Aboulayt, A., Riahi, M., Anis, S., Touhami, M. O., & Moussa, R. (2014). Rheological behavior of a fresh geopolymer based on metakaolin: effect of the introduction of calcium carbonate. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 7(3), 1170–1177. <https://search.proquest.com/docview/1561526861?accountid=189277>
- Bazzoni, A. (2014). *Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy* [EPFL PhD Thesis]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108968706>
- Berodier, E., & Scrivener, K. (2014). Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society*, 97. <https://doi.org/10.1111/jace.13177>
- Cwirzen, A., Provis, J. L., Penttala, V., & Habermehl-Cwirzen, K. (2014). The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66, 53–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.022>
- Dhandapani, Y., Santhanam, M., Kaladharan, G., & Ramanathan, S. (2021). Towards ternary binders involving limestone additions — A review. *Cement and Concrete Research*, 143, 106396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396>
- ECOCEM. (2024). *Advanced Cement Technology (ACT)*. <https://www.ecocemglobal.com/act/>
- Elgalhud, A. A., Dhir, R. K., & Ghataora, G. (2016). Limestone addition effects on concrete porosity. *Cement and Concrete Composites*, 72, 222–234. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.006>
- Escalante-Garcia, J. I., & Perez-Cortes, P. (2018). *Hydraulic cement based on alkaline earth carbonates like limestone and calcined clay and process to make pastes, mortar and concretes of high performance (in Spanish)*. Patent application MX/a/2018/ 016140.
- Firdous, R., Hirsch, T., Klimm, D., Lothenbach, B., & Stephan, D. (2021). Reaction of calcium carbonate minerals in sodium silicate solution and its role in alkali-activated systems. *Minerals Engineering*, 165, 106849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106849>
- Gao, X., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2015). Properties of alkali activated slag–fly ash blends with limestone addition. *Cement and Concrete Composites*, 59, 119–128. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.007>
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. E. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923–931. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>
- Gupta, S., Mohapatra, B. N., & Bansal, M. (2020). A review on development of Portland limestone cement: A step towards low carbon economy for Indian cement industry. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, 100019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100019>
- Kakali, G., Tsivilis, S., Aggeli, E., & Bati, M. (2000). Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1073–1077.



- [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00292-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00292-1)
- Liu, Y., Zhang, Y., Dong, B., & Wang, Y. (2023). Limestone powder activated by sodium aluminate: Hydration and microstructure. *Construction and Building Materials*, 368, 130446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130446>
- Machner, A., Zajac, M., Ben Haha, M., Kjellsen, K. O., Geiker, M. R., & De Weerd, K. (2018). Limitations of the hydrotalcite formation in Portland composite cement pastes containing dolomite and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 105, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.11.007>
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>
- Matthews, A. P. B. and J. D. (1994). Concrete Durability Specification by Water/Cement or Compressive Strength for European Cement Types. *ACI Symposium Publication*, 145. <https://doi.org/10.14359/4433>
- Meddah, M. S., Lmbachiya, M. C., & Dhir, R. K. (2014). Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production. *Construction and Building Materials*, 58, 193–205. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.012>
- Menchaca-Ballinas, L. E., & Escalante-García, J. I. (2020). Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH. *Construction and Building Materials*, 262, 120013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120013>
- Moseson, A. J., Moseson, D. E., & Barsoum, M. W. (2012). High volume limestone alkali-activated cement developed by design of experiment. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 328–336. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.004>
- Müller, C., Palm, S., Graubner, C. A., Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Neufert, W., & Reuken, I. (2015). Cements with a high limestone content—durability and practicability. *Concrete Technology Reports 2013-2015*, 12(2), 21–30.
- Müller, C., Palm, S., Graubner, C.-A., Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Neufert, W., & Reuken, I. (2013). Zemente mit hohem Kalksteingehalten-Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit Cements with a high limestone content-durability and practicability. In *Concrete Technology Reports*.
- Opoczky, L. (1992). Progress of particle-size distribution during the intergrinding of a clinker-limestone mixture. *Zement-Kalk-Gips*, 45(12), 648–651.
- Ortega-Zavala, D. E., Santana-Carrillo, J. L., Burciaga-Díaz, O., & Escalante-García, J. I. (2019). An initial study on alkali activated limestone binders. *Cement and Concrete Research*, 120, 267–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.002>
- Palm, S., Proske, T., Rezvani, M., Hainer, S., Müller, C., & Graubner, C.-A. (2016). Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. *Construction and Building Materials*, 119, 308–318. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.009>
- Panesar, D. K., & Zhang, R. (2020). Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. *Construction and Building Materials*, 251, 118866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>
- Perez-Cortes, P. (2021). *Sustainable alkali activated cements of limestone and metakaolin – Design, optimization, characterization and durability (PhD Thesis)*. Cinvestav IPN.



- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2020a). Alkali activated metakaolin with high limestone contents – Statistical modeling of strength and environmental and cost analyses. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>
- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2020b). Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin – A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2020c). Gel composition and molecular structure of alkali-activated metakaolin-limestone cements. *Cement and Concrete Research*, 137, 106211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106211>
- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2023). Effect of the Limestone Content on the Durability of Alkali-Activated Limestone-Metakaolin Subjected to Acidic and Sulfate Environments. In J. I. Escalante-Garcia, P. Castro Borges, & A. Duran-Herrera (Eds.), *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 586–595). Springer International Publishing.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C.-A. (2013). Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents — Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*, 51, 38–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.011>
- Provis, J. L., Duxson, P., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2005). Statistical Thermodynamic Model for Si/Al Ordering in Amorphous Aluminosilicates. *Chemistry of Materials*, 17(11), 2976–2986. <https://doi.org/10.1021/cm050219i>
- Qian, J., & Song, M. (2015). Study on Influence of Limestone Powder on the Fresh and Hardened Properties of Early Age Metakaolin Based Geopolymer. In K. Scrivener & A. Favier (Eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete* (Vol. 10, pp. 253–259). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_31
- Rakhimova, N. (2022). Calcium and/or magnesium carbonate and carbonate-bearing rocks in the development of alkali-activated cements – A review. *Construction and Building Materials*, 325, 126742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126742>
- Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., Morozov, V. P., Gaifullin, A. R., Potapova, L. I., Gubaidullina, A. M., & Osin, Y. N. (2018). Marl-based geopolymers incorporated with limestone: A feasibility study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 492, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.04.015>
- Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., Naumkina, N. I., Khuzin, A. F., & Osin, Y. N. (2016). Influence of limestone content, fineness, and composition on the properties and microstructure of alkali-activated slag cement. *Cement and Concrete Composites*, 72, 268–274. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.015>
- Ramezani-pour, A. A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2009). Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 715–720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Tennis, P. D., Thomas, M. D. A., & Weiss, W. J. (2011). *State-of-the-Art Report on Use of*

Limestone in Cements at Levels of up to 15%.

Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, Gr., & Theodossis, D. (2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1679–1683. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)

U.S. Geological Survey. (2020). *Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey* (p. 200). <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2020>.

Vance, K., Kumar, A., Sant, G., & Neithalath, N. (2013). The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, 52, 196–207. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2013.07.007>

Vazquez-Leal, F. R., Mendoza-Rangel, J. M., Andrade, C., Perez-Cortes, P., & Escalante-García, J. I. (2023). Electrochemical Behaviour of Steel Embedded in Alkali Activated Metakaolin/Limestone Based Mortar. In J. I. Escalante-Garcia, P. Castro Borges, & A. Duran-Herrera (Eds.), *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 396–404). Springer International Publishing.

Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., & Tsivilis, S. (2005). Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 191–196. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.006>

Walkley, B., Ke, X., Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2021). Activator Anion Influences the Nanostructure of Alkali-Activated Slag Cements. *The Journal of Physical Chemistry C*. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c07328>

Yip, C. K., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2008). Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 979–985. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.07.004>



Adición de fibras textiles en la elaboración de concreto con sustituto parcial de grava reciclada de demolición, su efecto en la porosidad capilar y la resistencia mecánica a 90 días

F. Hernández-Ferreya¹, W. Martínez-Molina^{1, 2*}, M. Arreola-Sánchez^{2, 4}, E. Alonso-Guzmán^{2, 3},
H. Chávez-García^{1, 2}, S. Silva-Torres¹.

*Autor de Contacto: wilfrido.martinez@umich.mx

¹ Programa de Maestría en Ciencias de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

³ Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

⁴ CONAHCYT-Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

RESUMEN

El presente trabajo trata de determinar el comportamiento de un concreto modificado al adicionar fibras textiles y sustituir parcialmente el agregado grueso por residuos de concretos de demolición (RCD) en mezclas de concreto simple, analizando variación de la porosidad y la resistencia a la compresión. Así se realizaron mezclas de concreto que contienen 20% (en masa) de grava de RCD, además de tres adiciones diferentes de residuos textiles al 2% en la relación a la masa del cemento: Residuo de tercera trituración (RTT), residuo de última trituración (RUT) y residuo de hilo de alquitrán (RHA). El diseño de las mezclas fue por el método ACI, para un $f'c$ de 300 kgf/cm² (100% de resistencia). El resultado a compresión del testigo fue del 103%, mientras que las demás mezclas variaron del 86% al 97%; en porosidad efectiva fueron ligeramente inferiores al testigo en el siguiente orden: RHA, RTT, RUT y Testigo Reciclado (Testigo R). Esto indica que hay una relación con la resistencia a la compresión respecto a la porosidad efectiva en las mezclas Testigo, RHA y Testigo R.

Palabras clave: Compresión; Capilaridad; Concreto; Fibras textiles; Residuos sólidos.

1. INTRODUCCIÓN

La adopción de comportamientos más sostenibles, particularmente en lo que respecta a la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, es hoy en día una prioridad. En el sector de la construcción es una de las áreas clave de intervención, ya que presenta un alto consumo de recursos como materiales, energía y agua. Por lo tanto, es esencial adoptar acciones más eficientes durante todas las etapas del proceso de construcción, incluido el uso de materiales más sostenibles. La reutilización de diferentes tipos de residuos en la construcción o rehabilitación de edificios e infraestructura puede contribuir significativamente a la sostenibilidad (Briga-Sá et al., 2013).

Existen diversos residuos que se generan en grandes cantidades y pueden ser revalorizados, por ejemplo, la industria textil ha llevado a un alto nivel de consumo y residuo en la sociedad. Esto puede causar un impacto ambiental negativo ya que la industria textil y la industria de la confección es una de las industrias más contaminantes (Pensupa et al., 2017). La fabricación textil es un proceso intensivo en productos químicos y requiere un alto volumen de agua en sus diferentes procesos internos. Las aguas residuales y los residuos de fibra son los principales residuos generados durante el proceso de producción textil. Por otro lado, los residuos de fibra se generan principalmente de ropa no deseada en la cadena de suministro textil. Este desecho de fibras incluye fibras naturales, fibra sintética y mezclas naturales/sintéticas (Pensupa et al., 2017).

Los productos químicos utilizados en la producción de cada tipo de fibra son diferentes. Para la producción de fibra de celulosa, los productos químicos que se utilizan normalmente son pesticidas, insecticidas y fertilizantes, cuando los recursos naturales no son suficientes para el cultivo de plantas. Mientras que la fibra proteínica requiere productos químicos para controlar los parásitos de los animales y, una vez triturada la fibra, se necesitan productos químicos para limpiarla. Para la producción de fibra sintética se utiliza como materia prima el aceite de petróleo, al que normalmente se aplican pigmentos y colorantes (Pensupa et al., 2017).

Por ejemplo, los residuos textiles que se generaban anualmente en viviendas de la ciudad de Morelia, Michoacán rondaban el 1.4% del total, mismos que se incrementaron a un 3.5% en el año 2013 con una generación de los residuos sólidos domésticos de 442 toneladas por día (Hernández-Berriel et al., 2016). Se estima que 73 por ciento de las prendas producidas anualmente termina incinerada o en basureros, lo que contribuye a la polución del suelo y aire (Monachon, 2021). Se considera que la producción en la industria textil es de las más dañinas y contaminantes para el medio ambiente, ya que es responsable de 20 por ciento de las aguas residuales globales y 10 por ciento de las emisiones totales de carbono (Monachon, 2021). La producción textil emite el equivalente a 1,2 billones de toneladas de CO₂, más que el transporte marítimo y la aviación internacional (Acosta, 2021).

Se estima que, en el mundo, se fabrican alrededor de 25 billones de toneladas de concreto cada año. Esto representa más de 1.7 billones de cargas de camiones anuales. La cantidad de concreto utilizado en construcción dobla la cantidad del resto de materiales utilizados incluyendo madera, acero, plástico, y aluminio (MEPDS, 2009). Lograr que materiales considerados como residuos sólidos, como el caso del concreto demolido o colapsado, se reúsen para elaborar nuevas mezclas de concreto, resuelve entre otros objetivos:

- A) Reúso de residuos sólidos, abatiendo la cantidad de estos que se depositan y dañan al medioambiente y por ende a los humanos, por ejemplo, problemas de lixiviados.
- B) Diseño, innovación y elaboración de nuevos materiales de construcción eco amigables.

C) Conservación de los minerales naturales, canteras que abunda. Evitar la explotación de materiales para preservar el hábitat natural de la flora y fauna nativa. Conservación de la arquitectura del paisaje, así como de geoparques. Lo anterior debido a que los recursos minerales son no renovables.

D) Disminución de la contaminación atmosférica, al darle un nuevo uso al concreto de residuo de demolición que para su producción emitió CO y CO₂ (Martínez-Molina et al., 2015).

2. PROCEDIMIENTO

Los materiales que se utilizaron en la presente investigación fueron materiales pétreos provenientes de la ciudad de Morelia, se utilizó arena volcánica del banco de “joyitas”, grava triturada del banco la “la roka”, así como RCD obtenidos de las diferentes edificaciones demolidas dentro de la misma ciudad. A estos materiales se les realizaron las pruebas de masa volumétrica seca suelta (MVSS), masa volumétrica seca varillada, densidad, absorción, granulometría, módulo de finura en caso de las arenas y tamaño máximo del agregado grueso para las gravas. En el caso del cemento se utilizó un Cemento portland compuesto de resistencia de 30 MPa resistente a sulfatos (CPC30 R RS) la cual se le realizo la prueba de densidad del cemento. Todas las pruebas fueron realizadas mediante los procedimientos que indican sus respectivas normas mexicanas.

Tabla 1. Datos de las pruebas de caracterización de calidad de los materiales en estudio.

Material	MVSS	MVSV	Absorción	Densidad	Módulo de finura	Tamaño máximo
Arena	1390.00	1508.00	5.13	2.28	3.04	
Grava "Triturada"	1391.00	1526.00	1.71	2.57		3/4"
Grava "RCD"	1083.00	1186.00	7.04	2.16		3/4"
Cemento	1490.00			3.10		

Se hizo un diseño de mezcla de concreto por el ACI con los datos de la Tabla 1, se elaboran: Mezcla testigo, mezcla testigo R con 20% de sustitución de grava natural por grava RCD, 3 mezclas con 20% de sustitución de grava natural por RCD y 2% de adición de fibras textiles respecto a la masa del cemento. Se hizo un diseño ACI con una relación agua/cemento de 0.55 y un revenimiento de 15 cm sin inclusión de aire. los cuales nos dio la siguiente cantidad de materiales para 1 m³ de concreto con su corrección por humedad de absorción de los materiales como se muestra en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2. Cantidad de materiales para 1 m³ de concreto por el diseño de ACI sin sustitución de RCD.

Corrección por humedad de absorción			
Materiales	Masa	Absorción	
		%	Kg
Cemento	392.73	N/D	N/D
Grava "Roka"	909.50	1.71	15.55
Arena	646.21	5.13	33.15
Agua	216.00	N/D	N/D
Suma	2164.43	Suma Corregida	2213.13

Tabla 3. Cantidad de materiales para 1 m³ de concreto por el diseño de ACI con sustitución de

RCD y adición de 2% respecto a la masa del cemento de fibras textiles.

Corrección por humedad de absorción			
Materiales	Masa	Absorción	
		%	Kg
Cemento	392.73	N/D	N/D
Grava "Roka"	727.60	1.71	12.44
Grava "RCD"	141.37	7.04	9.95
Arena	658.36	5.13	33.77
Fibras Textiles	7.85	100.00	7.85
Agua	216.00	N/D	N/D
Suma	2143.91	Suma Corregida	2207.93

Las mezclas de concreto fueron realizadas mediante una revolvedora de capacidad de un bulto de cemento. La elaboración de los cilindros fue mediante las especificaciones de la NMX-C-159-ONNCCE, 2016. Todas las mezclas cumplieron con la trabajabilidad que marca la NMX-C-156-ONNCCE, 2010.

Una vez realizada las mezclas se desmoldaron, se colocaron en una pila de curado y se dejaron 90 días. Para evaluarlos a edades tardías.

2.1. Pruebas destructivas.

Antes de determinar la resistencia a compresión simple, el cilindro se cabeceó con azufre para que la carga aplicada al cilindro fuera uniforme y continua como establece la NMX-C-083-ONNCCE, 2014. En esta prueba se realizaron 4 cilindros de 10 cm de diámetro con 20 cm de altura aproximadamente en cada una de las mezclas.

2.2. Prueba de porosidad capilar o Fagerlund.

En esta prueba se utilizaron 3 especímenes de 10 cm de diámetro x 5 cm de altura, las partes que se utilizaron fueron las partes inferiores de 3 cilindros diferentes. Para la prueba de absorción capilar o Fagerlund. Los especímenes se dejaron en el horno a una temperatura de alrededor de 50 °C para evitar que se incineraran las muestras que tenían fibras textiles, se dejaron los especímenes en el horno hasta alcanzar una masa constante, posteriormente el contorno de los cilindros fue recubierto con una mezcla de parafina con brea y en la cara superior cubiertos con plástico, esto para evitar que se infiltrara agua que no fuera mediante capilaridad. Finalmente se colocaron los especímenes en un recipiente con agua, colocando una base de esponjas para crear un tirante de agua y que las muestras de concreto no estuvieran en contacto directo con el recipiente. Se hicieron lecturas de masa mediante el procedimiento de la NMX-C-504-ONNCCE, 2015 hasta alcanzar nuevamente una masa constante en la absorción de los especímenes.

3. ECUACIONES

Las ecuaciones que se utilizaron en la presente investigación fueron las siguientes:



Resistencia de compresión:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a compresión en kgf/cm².

P = Carga máxima, en kgf.

A = Área de espécimen, en cm².

Resistencia a la penetración del agua (m)

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (2)$$

Donde:

m = Resistencia a la penetración del agua, en s/m².

t = Tiempo de absorción del agua, en s

z = Espesor de la muestra de concreto, en m

Coefficiente de absorción capilar (k)

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

Donde:

k = coeficiente de absorción capilar, en kg/m² s^{1/2}.

W_t = masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg.

W_0 = masa inicial del espécimen antes de ingresar al contacto con el agua, en kg.

A = Área del espécimen, en m².

t = Tiempo de absorción del agua, en s.

Porosidad efectiva (ϵe)

$$\epsilon e = \frac{k \sqrt{m}}{1000} \quad (4)$$

Donde:

ϵe = Porosidad efectiva, en %.



Sorción capilar (S)

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (5)$$

Donde:

S = La sorción capilar, en $m/s^{1/2}$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las siguientes figuras se pueden observar los resultados obtenidos del diseño de mezclas de 300 kgf/cm^2 (30 MPa) en 5 diferentes mezclas. En la primera figura (Figura 1) se observan los resultados a resistencia compresión simple, mientras que en las otras 4 figuras (Figuras 2-5) se observan los resultados en la prueba de Fagerlund. Los resultados que vemos en las gráficas fueron los promedios de los especímenes en el caso de resistencia a la compresión simple fueron 4 cilindros de cada mezcla y para la prueba de Fagerlund, son el promedio de 3 especímenes.

4.1 Resultados de resistencia a la compresión simple.

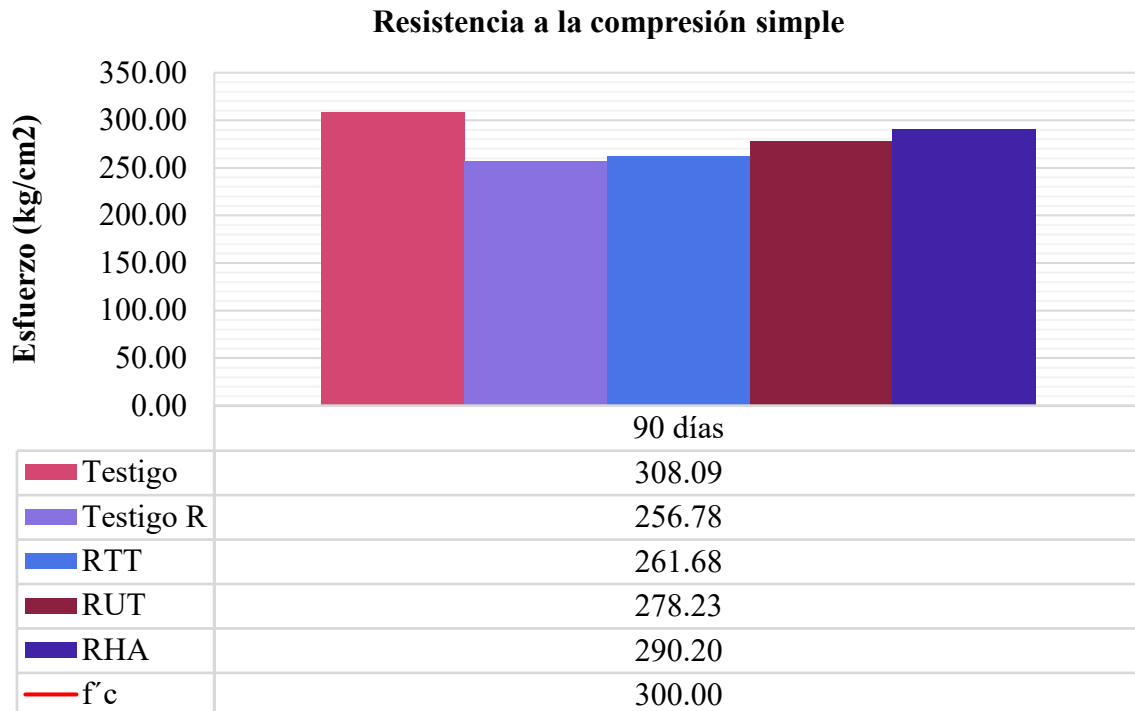


Figura 1. Comparación de mezclas de concreto por “resistencia a la compresión simple”.

Como se puede observar en la Figura 1, la mezcla testigo obtuvo resultados más altos de resistencia a la compresión simple que las mezclas con sustitución de residuos de concreto de demolición,

alcanzando un 103 % respecto a $f'c$ de diseño que es de 300 kgf/cm². La mezcla con RCD sin textiles alcanzan una resistencia del 86%, pero con textiles RHA alcanzan una resistencia del 97%. Mientras que en las mezclas RTT fue todo lo contrario presentando una resistencia del 87% del $f'c$ de diseño, en comparación con RUT que alcanzó un 93% del $f'c$ de diseño.

4.2 Resultados de porosidad capilar.

4.2.1 Resistencia a la penetración del agua (m).

Como se muestra en la Figura 2. La mezcla Testigo es la que mayor resistencia a la penetración del agua tiene con respecto a las mezclas que contienen RCD, debido a que la absorción de este material es mayor. Las mezclas con RCD adicionadas con fibras textiles incrementan dicha resistencia a la penetración del agua respecto a la muestra Testigo, lo que está ayudando a que su absorción capilar disminuya al adicionar fibras textiles a las mezclas de concreto.

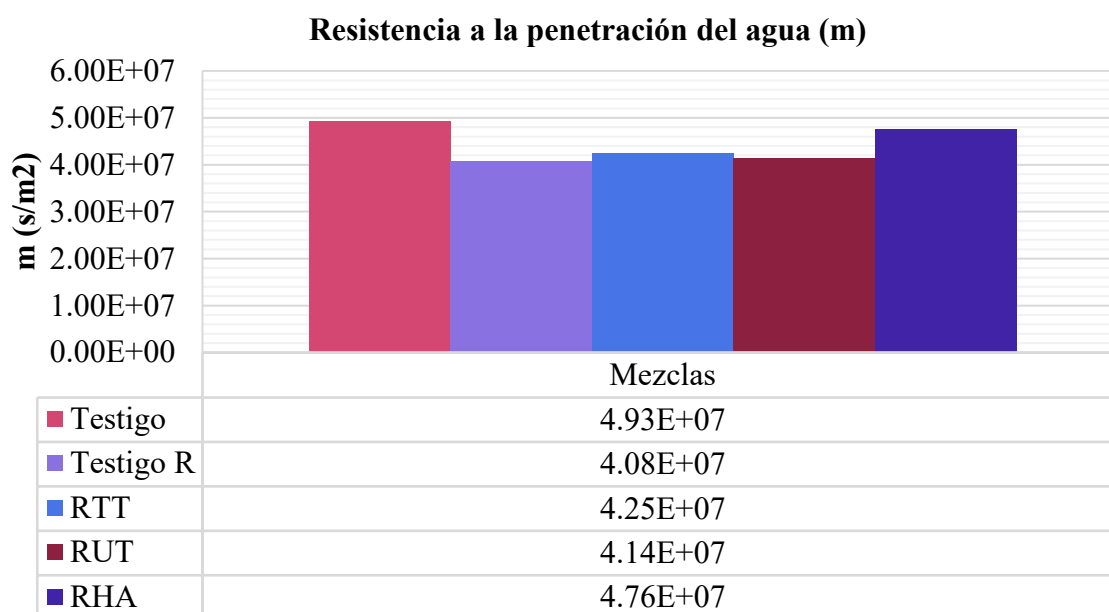


Figura 2. Comparación de las mezclas de concreto a la “resistencia a la penetración del agua” a 90 días de edad.

4.2.2 Coeficiente de absorción capilar (K).

La mezcla Testigo R presenta un valor de K de 0.0316 kg/m²s^{1/2} (Figura 3), siendo la de mayor absorción capilar. Mientras que, en las mezclas con adición de fibras textiles, el coeficiente de absorción capilar va disminuyendo, incluso la mezcla RHA presenta un valor de K menor que la mezcla testigo, el cual es de 0.0268 kg/m² s^{1/2}, las fibras textiles ayudan a disminuirlo hasta un 15% de la mezcla Testigo R a la RHA, e incluso la mezcla RHA tiene menor absorción capilar que la mezcla Testigo. Por todo lo anterior se puede concluir que estas fibras textiles disminuyen tanto la absorción capilar como porosidad efectiva con respecto a las mezclas de concreto testigo y testigo R.

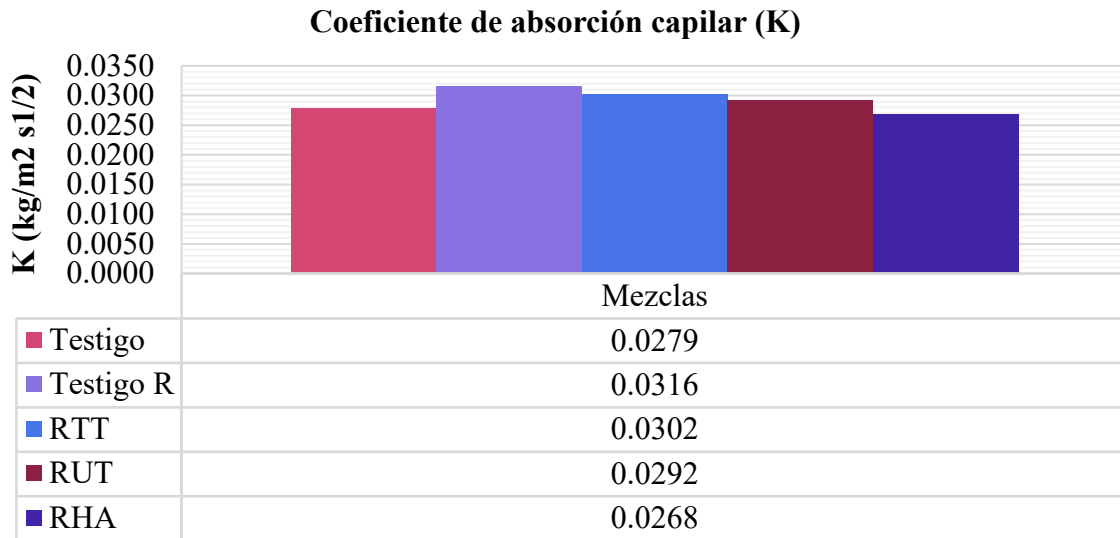


Figura 3. Comparación de las mezclas de concreto al “coeficiente de absorción capilar” a 90 días de edad.

4.2.3 Porosidad efectiva (ϵ_e).

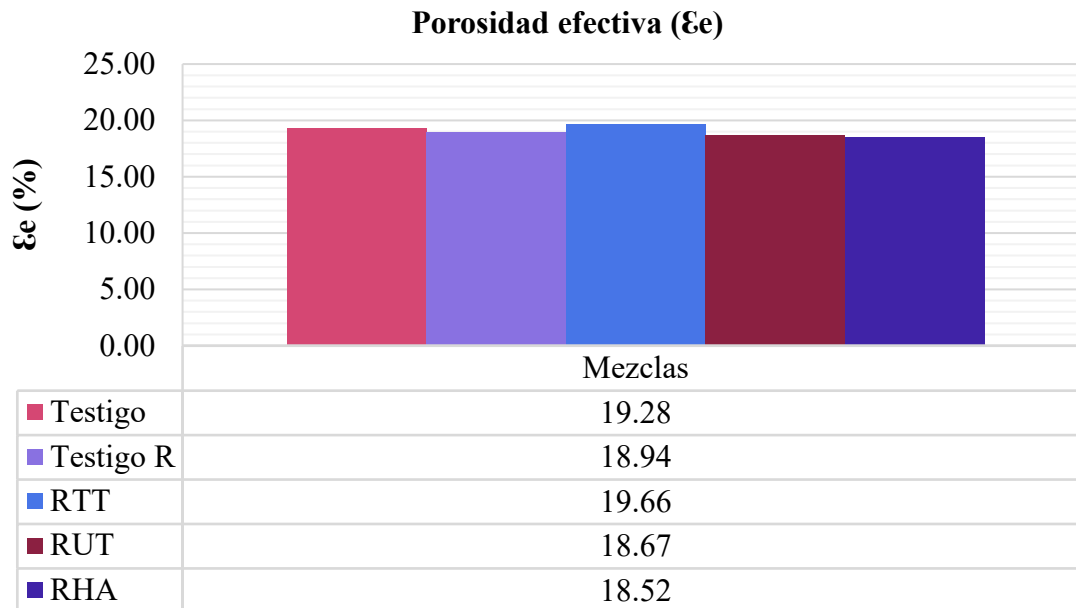


Figura 4. Comparación de las mezclas de concreto a la “porosidad efectiva”, a edad de 90 días.

Como se observa en la Figura 4, a mezcla RTT tiene la mayor porosidad efectiva, siendo del 19.66%, pero las demás mezclas adicionadas con fibras disminuyen su porosidad, incluso menor que la de los especímenes de Testigo (19.28%) y Testigo R (18.94%). Lo anterior puede deberse a que, dependiendo de su acomodo preferencial en el espécimen y tamaño de fibras, estos factores van a disminuir su porosidad efectiva actuando en ocasiones como poros que absorben agua y en ocasiones al estar saturadas impiden el paso del agua por el espécimen. Mientras que la mezcla

RHA presenta una diferencia de 1.14%. Por lo que se deduce que las fibras y los agregados pudieran actuar como poros dependiendo de su acomodo preferencial aumentando o disminuyendo la porosidad efectiva.

4.2.4 Sorción Capilar (s).

La mezcla Testigo y RHA (Figura 5) son las mezclas que menor sorción capilar presentan (0.000145 m/s^{1/2}), mientras que la testigo R (0.000164 m/s^{1/2}) es la que mayor valor presenta, esto tiene sentido ya que al calcularse mediante 1 entre la raíz de la resistencia a la penetración del agua, los resultados de las mezclas de concreto son inversos, debido al que el factor “m” pasa como divisor, por lo tanto, mientras más elevado sea este valor la sorción capilar disminuirá. Cabe destacar que la mezcla RUT fue mayor que la mezcla RTT. Por lo que se estima que, dependiendo del acomodo preferencial que tienen las fibras dentro del espécimen y su morfología, afectarán estos parámetros.

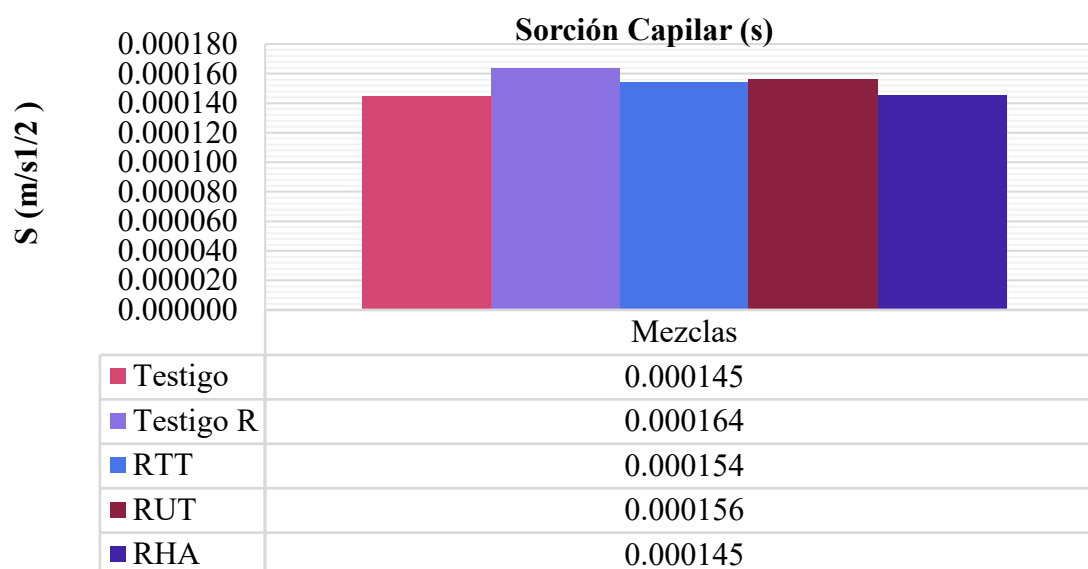


Figura 5. Comparación de las mezclas de concreto a la “sorción capilar”, a 90 días de dad.

5. CONCLUSIONES

Hay una ligera relación entre la resistencia a la compresión simple, con la resistencia a la penetración del agua y subsecuentemente con la sorción capilar. Ya que en algunos casos como en la mezcla Testigo, RHA y Testigo R, a mayor resistencia a la penetración del agua y menor sorción capilar, se incrementa la resistencia a la compresión simple.

En caso de corrección por humedad de las fibras textiles se optó de corregir por humedad al añadir el agua en la mezcla, ya que al intentar saturarlas y después adicionarlas a las mezclas de concreto tienden a aglomerarse, por lo que al momento de hacer cilindros la mezclas son heterogéneas y hace que las fibras tengan un acomodo preferencial en ciertas partes del espécimen. Al no tener un tamaño y grosor nominal en las mezclas adicionadas con fibras textiles, tienden también a tener acomodo preferencial en los cilindros. Las fibras textiles se decidió utilizarlas tal cual la recolectamos para ver su comportamiento, pero se recomienda hacer otro proceso en el cual se puedan tener en un tamaño nominal y disminuyendo su tamaño para así disminuir el acomodo

preferencial en las mezclas. Además de que al introducirlas a la revolvedora algunas fibras se quedaron enredadas en las aspas. Se pretende seguir estudiando las fibras textiles, para expandir la literatura de las pruebas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; del CONAHCYT con el Proyecto de Grupo de Ciencia de Frontera CF-2023-G-985, con el Proyecto de Ciencia Básica y de Frontera Investigadores Consolidados CBF2023-2024-1613, con el Pronace 321260; con el IXM-2313; del ICTI, Instituto de Ciencia y Tecnología del Estado de Michoacán, y del Laboratorio Ing Luis Silva Ruelas de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

7. REFERENCIAS

- Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., & Paiva, A. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, 38, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037>
- Hernández-Berriel, M. del C., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., & Buenrostro-Delgado, O. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América latina y el caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 11–22. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.02>
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., Martínez-Alonso, W., Pérez-Quiroz, J. T., Bedolla-Arroyo, J. A., & González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. In *Revista ALCONPAT* (Vol. 5). <https://www.veoverde.com/2014/01/llegaron-las-viviendas-sustentables-a-mexico/>
- MEPDS. (2009). Iniciativa por la sostenibilidad del cemento. *Mundial Empresarial Para Desarrollo Sostenible*.
- Monachon, D. (2021). Dar segunda oportunidad a la ropa reduce la contaminación. *Boletín UNAM-DGCS*.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo*.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*.
- NMX-C-504-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico-Método de Ensayo*.
- Pensupa, N., Leu, S. Y., Hu, Y., Du, C., Liu, H., Jing, H., Wang, H., & Lin, C. S. K. (2017). Recent Trends in Sustainable Textile Waste Recycling Methods: Current Situation and Future Prospects. In *Topics in Current Chemistry* (Vol. 375, Issue 5). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0165-0>





Significancia histórica de la Caliza, desde cementos ancestrales hasta los cementos de hoy y perspectivas de futuro

J. I. Escalante-García^{1*}, P. Perez-Cortes², J. Rodriguez-Morales¹,
J. M. Hernández Bielma¹, J. L. Reyna-Perez¹

*Autor de Contacto: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

¹ Cinvestav Unidad Saltillo, Grupo de Ingeniería Cerámica, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

² R&D Group Cementos Molins S.A., Barcelona, España

RESUMEN

El mineral de caliza ha sido históricamente fundamental en materiales de construcción, desde su uso inicial hace más de 11,600 años, hasta los cementos romanos a base de cal. Actualmente continua vigente en la producción de cemento Pórtland (CP), como la materia prima principal que entra a los hornos y como material cementoso suplementario; se usa también como grava y arena en morteros y concretos. Adicionalmente, es un precursor principal en aplicaciones innovadoras recientes en cementos alternativos como LC3 y cementos activados por álcalis (CAA) en combinación con precursores como el metacaolín. Cementos de metacaolín sustituido con 60 a 80% de caliza registraron +50MPa, con resultados similares al usarlos en concretos con 400 kg/m³ de cementante. Los residuos de construcción y demolición también pueden usarse como precursores en CAA. Cementos de 100% concreto (agregados calizos) reciclado alcanzaron 19MPa, y mezclas 40% CP, 45% concreto reciclado y 15% de activador alcalino resultan en 45MPa. Se discuten también cementos que incluyen el uso de otros precursores suplementarios como metacaolín y desechos de vidrio. Se analizan aspectos ambientales de estos cementos. Del análisis, puede verse que la piedra caliza sigue siendo teniendo un papel clave en el desarrollo de cementos sustentables alternativos al cemento tradicional, y la investigación continua contribuye a su integración prometedora en la industria de la construcción.

Palabras clave: Caliza; Sustentabilidad; Materiales de Construcción; Concreto Reciclado; Cementos Alcalinos.

1. USOS HISTÓRICOS Y ACTUALES DE LA CALIZA EN CEMENTOS

La caliza es una roca sedimentaria compuesta principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3). A escala global, las rocas de carbonatos cubren el 9.4% de la tierra libre de hielo, en forma de rocas carbonatadas continuas (Goldscheider, et.al., 2020). La Figura 1 ilustra la distribución rocas carbonatadas en el mundo. Se estima que 20.3 millones de km^2 , que representan el 15.2% de la superficie terrestre, contienen rocas carbonatadas (Rakhimova, 2022).

La caliza ha desempeñado un papel crucial como componente fundamental en los materiales de construcción durante milenios. Los primeros usos se remontan a hace más de 11,600 años, como lo evidencian los descubrimientos en el sitio arqueológico de Göbekli Tepe (Courland, 2011), donde se desenterraron labrados de caliza y productos a base de cal. Posteriormente, los romanos fueron pioneros en la aplicación de cementos basados en cal; estos mezclaron cal (caliza calcinada) con cenizas volcánicas y desechos de cerámicos silicoaluminosos para producir materiales para sus construcciones, creando estructuras perdurables que han resistido el paso de los siglos.

Los cementos a base de cal siguen siendo útiles y duraderos gracias a su naturaleza de "Ciclo Cerrado", ilustrado en la Figura 2, en la que el producto final de la reacción refleja la materia prima inicial, es decir, CaCO_3 , como se ilustra en la Figura 2. Sin embargo, estos cementos presentan inconvenientes en comparación con las variantes modernas, caracterizados principalmente por un fraguado y un aumento de resistencia más lentos. En la actualidad, su aplicación predominante se encuentra en la preservación y restauración del patrimonio cultural (Saba et.al., 2019).

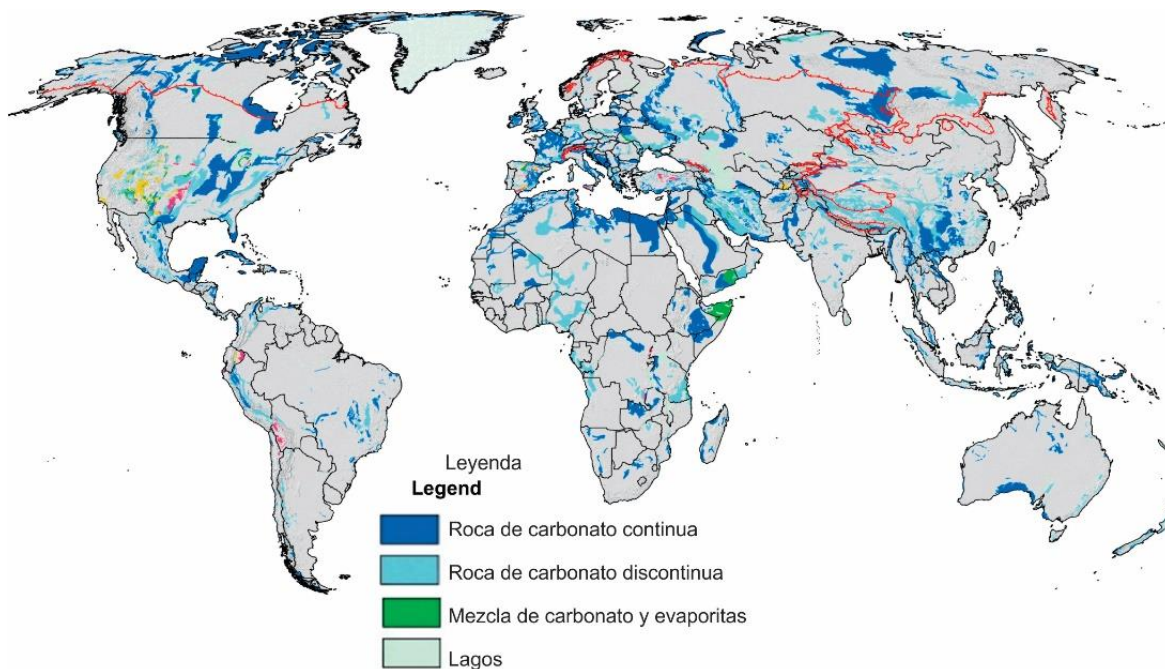


Figura 1 Distribución de rocas carbonatadas. Modificado de (Goldscheider, et. al., 2020).

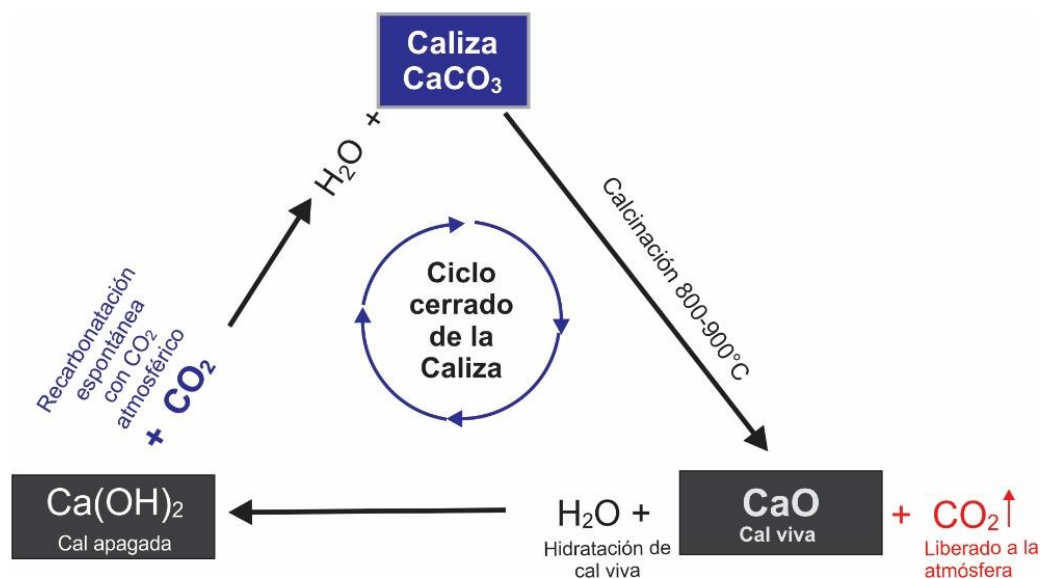


Figura 2 Ciclo cerrado de cementos a base de cal (caliza)

2. USOS ACTUALES DE LA CALIZA EN CEMENTOS

La caliza sigue siendo un mineral indispensable y versátil, de importancia en la industria global contemporánea del cemento y la construcción. Una aplicación notable involucra su uso extensivo como agregado para morteros y concretos (hormigón). La producción global anual de concreto es de aproximadamente 30,000 millones de toneladas/año (Monteiro et.al., 2017); esta depende en gran medida del uso de agregados (áridos), que pueden constituir hasta aproximadamente el 75% del volumen del concreto. Por otro lado, la caliza constituye alrededor del 80% de las materias primas para la producción de clínker de cemento Portland (CP), el cual se produce en hornos rotatorios operados a 1450°C utilizando combustibles fósiles, con requerimientos energéticos de alrededor de 3.5 GJ/t de clínker (Juenger et.al., 2019). Actualmente, la industria del CP produce más de 4.1 Gt/año y contribuye con más del 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂ (Ortega-Zavala et.al., 2019); se espera que la producción aumente hasta 4.68 Gt/año (Schneider, 2019).

Los siguientes son algunas aplicaciones adicionales de la caliza en cementos:

- Como material cementoso suplementario, actuando como aditivo mineral y reemplazando hasta un 35% del cemento Portland (Comisión Europea de Normalización, 2020; Cembureau, 1991). Sin embargo, existe controversia en aspectos relacionados con la durabilidad cuando se aplica en estructuras de concreto reforzado (Villagran-Zacardi et.al., 2022).
- Como ingrediente utilizado en aproximadamente un 15% en peso en los recientemente desarrollados cementos LC3, que son una alternativa sostenible prometedora (Scrivener et.al., 2018).
- Como componente en tecnologías innovadoras recientemente comercializadas en Europa, que incorporan 50% de caliza, aproximadamente 30% de materiales suplementarios cementicios bajos en carbono (SCM) y 20% de clínker (ECOCEM, 2024). Estas tecnologías aprovechan la distribución del tamaño de partícula e incorporan dispersantes.

Algunas de estas tecnologías aprovechan los efectos sinérgicos entre la alúmina de los SCM y el carbonato de calcio. Lo anterior denota pasos significativos hacia prácticas ambientalmente

conscientes, allanando el camino para soluciones sostenibles en la industria del cemento y el concreto.

Algunos desarrollos recientes han expandido la aplicación de la caliza al dominio de los cementos activados por álcalis (CAA, o cementos o materiales alcalinos). A continuación, se describen diversas funciones y beneficios de la caliza, subrayando su influencia en la sostenibilidad, el desempeño y consideraciones ambientales.

3. CALIZA EN CEMENTOS ACTIVADOS POR ÁLCALIS

Los CAA son distintos del cemento Portland tradicional. Los CAA se basan en las reacciones entre un precursor y un activador alcalino que actual químicamente sobre el precursor, formando productos de reacción cementosos, que fraguan y se endurecen en una masa sólida.

Los precursores más comunes son aluminosilicatos de bajos contenidos de CaO, que pueden ser de origen mineral, sintético o de subproductos. El uso de precursores ricos en CaO, como la escoria de alto horno, data de 1940 (Purdon, 1940) y ganó popularidad a partir del trabajo de Glukhovsky en 1950, como se describe en una revisión sobre activación alcalina (misma que no refiere el uso de caliza en CAA) (Krivenko, 2017).

Recientemente se ha reportado el uso de caliza, en varios niveles de sustitución, con otros precursores comúnmente usados en CAA. Un estudio de CAA basado en 100% caliza (Ortega-Zavala et.al., 2019) evidenció su reactividad química en un ambiente alcalino; dicho reporte también discute propiedades mecánicas y los aspectos estructurales de los productos de reacción. Otros estudios describen sustituciones de metacaolín (arcilla calcinada) con un 20% de caliza (Yip et.al. 2008) con ventajas limitadas, mientras que por otro lado el uso de un 50% de caliza redujo notablemente la resistencia mecánica a menos de 10 MPa (Cwirzen et.al., 2014). En un estudio sobre CAA basados mezclas de caliza con escoria de alto horno, se reportaron datos interesantes en términos de resistencia y bajos consumos de álcali (Sakulich et.al., 2009); sin embargo, la escoria tiene una disponibilidad limitada, primero por su concentración localizada y segundo ya que la mayor parte de ésta la consume la industria del cemento Portland. La combinación de caliza con otros precursores provenientes de efluentes de otros residuos como cenizas volantes (Gao et.al., 2015) o desechos de vidrio (Menchaca-Ballinas y Escalante-García, 2020) también ha mostrado resultados interesantes. En estos últimos, los CAA base desecho de vidrio mostraron solubilidad en agua, y la adición de caliza como precursor promovió el carácter hidráulico.

Una formulación ideal de CAA debería involucrar precursores derivados de materias primas que exhiban una abundancia global generalizada y de fácil acceso. La caliza y el metacaolín son particularmente adecuados para este propósito. La caliza es también barata, mientras que el metacaolín requiere un proceso de calcinación sencillo a menos de 750°C, que es menos exigente que el CP a 1450°C, es decir, el metacaolín requiere solo 0.35 GJ/t_arcilla (Juenger et.al., 2019). La confluencia de estos factores hace que la utilización de caliza y metacaolín como precursores de CAA factible y altamente ventajosa.

Reportes recientes de mezclas de caliza-metacaolín mostraron cómo la utilización de diseños de experimentos con enfoques estadísticos permite formular CAA con indicadores optimizados de resistencia y sostenibilidad (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020a; Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020b). Varias revisiones literarias recientes describen además el uso de caliza en cementos alcalinos (Rakhimova, 2022; Ma et.al., 2022; Rashad, 2022, Chan y Zhang, 2023), lo que indica interés e investigación activa globalmente sobre el tema.



3.1 Química de los CAA que involucran caliza

El papel de la caliza en la química de los CAA ha generado diversas perspectivas dentro de la literatura científica. En el contexto de cementos por 100% caliza, se ha observado que esta reacciona con los compuestos/activadores alcalinos, dando como resultado la formación de silicatos de calcio hidratados cementosos ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), similares a los que resultan de la hidratación del CP (Ortega-Zavala et.al., 2019). Algunos estudios sugieren que cuando se emplea caliza en combinación con otros precursores, un 10% de caliza se comporta como un relleno (filler) inerte (Aboulayt et.al., 2017; Quian y Song, 2015). En contraste, otros autores sugieren una interacción química, en la cual la caliza libera iones de Ca^{2+} , que se incorporan en los productos de reacción, modificando la estructura molecular y el ensamble de los productos de reacción cementosos formados, tales como fases de carboaluminato de calcio y posiblemente hidratos de (aluminio)silicato de calcio (Yip et.al., 2008; Rakhimova et.al., 2018; Cwirzen et.al., 2014).

Una investigación sobre la estructura molecular de los cementos basados en metacaolín ha demostrado que la introducción de caliza modifica la estructura del silicoaluminato de sodio formado ($\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) hacia ($\text{Na}_2\text{O-(CaO)-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020c), preservando su estructura 3D y mejorando la resistencia mecánica. Los resultados evidencian que la reactividad de la caliza hacia los álcalis es relativamente baja comparada con a otros precursores comunes utilizados en los CAA; se necesita más investigación para aumentar el conocimiento de estos sistemas complejos.

3.2 Indicadores de ambientales y de resistencia mecánica de CAA con caliza-metacaolín

La optimización estadística de cementos basados en caliza y metacaolín de alta pureza, indicó que una composición ideal involucraba 30% de caliza y el resto era metacaolín (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020a). Optimizaciones adicionales indicaron que una mezcla que consistía en 60% de caliza y 40% de metacaolín mostró propiedades notables, como resistencias a la compresión a 1 día de 56 MPa y 61 MPa a los 28 días; adicionalmente, se reportaron resistencias química y térmica, con resistencias residuales >50 MPa después de exposiciones a 0.1 N HCl, 5% MgSO_4 (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2023), o 300°C (Pérez-Cortés et.al. 2021). Estas propiedades podrían ampliar el campo de aplicaciones de estos CAA como cementos de alta durabilidad. La Figura 3 muestra como esta última mezcla exhibió notables ventajas ambientales y económicas, con un 62.9% menos de emisiones de CO_2 , 14% menos de consumo de energía y 15.5% de reducción de costos en comparación con una referencia de cemento Portland sustituido, como se muestra en la Figura 3 (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020a).

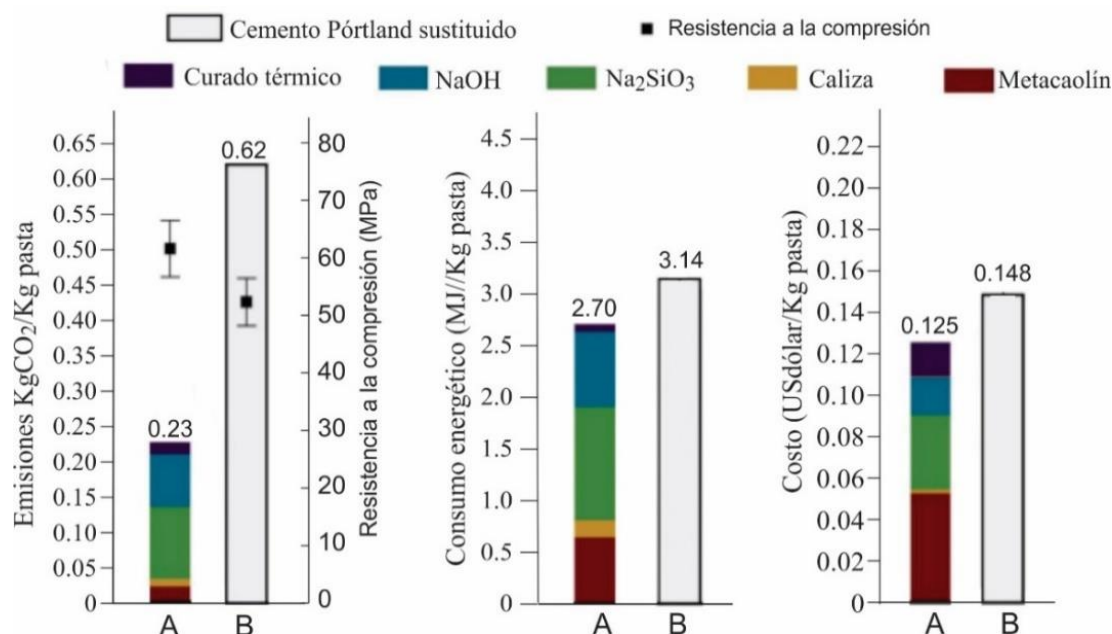


Figura 3. Comparación de emisiones de CO₂, consumo de energía y costo entre: (A) cemento Portland sustituido con (B) cemento alcalino de 60% de caliza, 40% de metacaolín, Adaptado de (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020a)

La sostenibilidad de los CAA es fuertemente influenciada por el consumo de compuestos alcalinos usados como activadores, mismos que contribuyen a altos costos y emisiones de CO₂. Un CAA de 100% metacaolín requiere comúnmente hasta 25% de Na₂O equivalente; sin embargo, cuando el metacaolín se reemplaza parcialmente con hasta un 80% de caliza, el consumo de Na₂O se reduce significativamente hasta 4% mientras que las pastas alcanzan hasta 50 MPa en compresión (Pérez-Cortés y Escalante-García, 2020b). Algunos reportes han indicado ventajas similares en cementos del tipo “one part” (a los que solo se les agrega agua) de un solo componente que combinaron 49% de caliza con CP y silicatos de sodio, tales cementos mostraron menores emisiones ambientales y resistencias similares a una referencia de cemento Portland (Santana-Carrillo et al., 2022).

Otros beneficios ambientales asociados con el uso de caliza se derivan de su exención de la necesidad de tratamiento térmico o calcinación, lo que se traduce en un ahorro de energía y una reducción de las emisiones de CO₂ que de otro modo se producirían por la descarbonatación y el consumo de combustibles fósiles, como en el caso de la producción de CP. Además, el procesamiento de la piedra caliza solo implica la molienda, que generalmente es más fácil en comparación con el clínker del cemento Portland, lo que reduce la demanda de energía.

3.3 Aplicación de cementos de caliza-metacaolín en concretos

La aplicación de cementos alcalinos de caliza-metacaolín en concretos se ilustra en la Tabla 1, que presenta ejemplos de formulaciones de concreto que incorporan CAA con 30% y 60% de caliza como reemplazo del metacaolín (Escalante-García y Pérez-Cortés, 2018). Estas formulaciones excluyeron el uso de aditivos especiales o ajustes a la granulometría de los agregados. Las tres formulaciones utilizaron 400 kg de ligante por m³ y combinaron diferentes cantidades de %Na₂O. Los concretos mostraron altas resistencias a la compresión a los 7 y 28 días, incluso cuando se curaron a 20°C. En comparación, para lograr resistencias comparables utilizando cemento Portland

se requeriría un mayor consumo de CP y/o consideraciones especiales de diseño. Por otro lado, concretos formulados con ligantes compuestos de 60% de caliza y 40% de metacaolín activados por álcalis, han demostrado una pasivación efectiva del refuerzo de acero (Vazquez-Leal et al., 2023), lo que convierte a estos cementos en una opción prometedora para aplicaciones estructurales.

Tabla 1. Resistencia a la compresión de varios concretos preparados con ligantes de caliza-metacaolín, curados bajo diferentes regímenes térmicos. La arena y grava usada fue de caliza

	Materias Primas	Consumo de ligante (Kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)	
			7 días	28 días
1*	60% Caliza	240	47	57
	40% Metacaolín	160		
	10.7% %Na ₂ O ⁺	42.8		
2**	60% Caliza	240	33	40
	40% Metacaolín	160		
	8.5% %Na ₂ O ⁺	34		
3*	Caliza	120	60	68
	Metacaolín	280		
	16.9% %Na ₂ O ⁺	67.6		

+ adicionado relativo a la masa de los precursores

* curado a 20°C; ** curado a 70°C por 24h, luego a 20°C

4. CONCRETO RECICLADO COMO MATERIAL CEMENTOSO

4.1 Concreto como desecho de construcción y demolición

La producción mundial de concreto es de aproximadamente 30,000 millones de toneladas por año (Monteiro et al., 2017). Esta cifra representa ~ 46% de todos los materiales extraídos de la Tierra (Shah et al., 2022), lo que necesariamente impulsa la necesidad de desarrollar materiales cementantes sustentables. Las actividades de construcción generan residuos, ya sea durante la construcción o por demolición al final de la vida útil de las estructuras, debido a la obsolescencia o circunstancias imprevistas. Estos se denominan en la literatura como *desechos de construcción y demolición (DCD)*, cuya tasa de generación es de aproximadamente 10,000 Mt/año globalmente, misma que constituye alrededor del ~ 30% del total de residuos sólidos generados mundialmente, de los cuales alrededor del 35% se deposita en vertederos (Chen et al., 2020).

La constitución de los CDC es heterogénea y variable dependiendo del tipo de infraestructura involucrada, el tipo y tecnologías de materiales de construcción (por ejemplo, concreto, morteros, ladrillos, madera, yeso, etc.), las tecnologías de demolición, la edad de las estructuras, las materias primas empleadas como agregados en concretos y morteros, el nivel de desarrollo regional, etc. Las tasas de reciclaje de CDC también varían, y países más desarrollados como Holanda, Dinamarca y Alemania reciclan más del 80% de los CDC (Özalp et al., 2016), mientras que países densamente poblados como China e India el reciclaje es de menos del 5% (Akhtar y Sarmah, 2018).

4.2 Concreto reciclado como precursor en cementos alcalinos

La forma convencional más usada actualmente para reciclar los CDC es en forma triturada, como agregados reciclados para producir nuevo concreto, contribuyendo a reducir la demanda de agregados de recursos naturales. Sin embargo, es posible enfocar este pasivo ambiental con un mayor valor agregado, esto es, como un recurso con potencial de comportarse como material cementoso, en línea con las tendencias de la promoción de la economía circular. Existen diversos reportes sobre el uso de CDC de diferente mineralogía como precursores para CAA, algunos reportan el uso de diferentes mezclas de precursores convencionales (Borrachero et al., 2022, (Ahmari et al., 2012, Villaquirán-Caicedo et al., 2021, Komnitsas et al., 2015). Sin embargo, hay 2 aspectos relevantes: (a) predomina el uso de cementos de dos partes (en los que el activador se aplica en solución) y (b) se usan activadores comerciales, como NaOH o mezclas de NaOH con silicatos de sodio, que tienen impacto ambiental y costo notables.

Tabla 2. Resistencia a la compresión de pastas cementosas de CAA con precursores de concreto reciclado pulverizado y otros precursores complementarios. Las formulaciones incorporan diferentes tipos de activadores comerciales y alternativos

	Concreto reciclado pulverizado (% peso)	Precursor complementario (% peso)			Tipo de activador alcalino	%Na ₂ O relativo a la masa del precursor	Resistencia a la compresión 28-días, MPa	Régimen de curado ⁺⁺
		Metacaolín	Cemento Pórtland	Desecho de vidrio				
1	55	45			Metasilicato de sodio comercial, Ms=1	10	30	60-20°C
2	75	25			Metasilicato de sodio comercial, Ms=1	12	28.5	60-20°C
3**	60			40	Metasilicato de sodio comercial, Ms=1	7.5	32	60-20°C
4**	32			68	Metasilicato de sodio comercial, Ms=1	7.5	46	60-20°C
5	45		40		15% de silicato de sodio comercial tipo G, Ms=3.2	2.9	45.2	20°C
6	45		50		5% Silicato de sodio a partir de desechos de vidrio, Ms=3.5	1.2	55.8	20°C
7	85	-	-	-	15% de silicato de sodio comercial tipo G, Ms=3.2	3.39	16	20
							12	60-20°C
8	80	-	-	-	20% Silicato de sodio a partir de desechos de vidrio, Ms=4	5%	12*	20°C
							19.8	80-20°C

Ms= modulo del silicato de sodio usado como activador

*aumentó a 19MPa después de 90 días. ** cementos de 2 partes (activador añadido en solución)

⁺⁺ 60-20°C o 80-20°C indica que las primeras 24 h de curado fueron a 60 u 80°C, luego continuó a 20°C



La Tabla 2 muestra diversas formulaciones alternativas de CAA del tipo “una parte” (“one-part”) a base de concreto endurecido pulverizado reciclado (CER) formulado con agregados de caliza. Algunos contienen CP, metacaolín o vidrio como precursores complementarios. Los activadores son de silicatos de sodio comerciales o de silicatos de sodio alternativos basados en el tratamiento termoquímico de residuos de vidrio (otro flujo de residuos global de aproximadamente 130 millones de toneladas/año).

Las mezclas de metacaolín sustituido con 55-75% de CER desarrollaron alrededor de 30 MPa usando activadores comerciales, mientras que los CAA de 32-60% CER y el resto de vidrio alcanzaron de 32 a 45 MPa. Por otra parte, para cementos de 45% CER con PC, el activador alternativo fue más efectivo para promover resistencia mecánica de hasta 55 MPa. Por otro lado, el ligante 100% CER también mostró su potencial para la activación, ya que las mezclas con 15-20% de activadores comerciales o alternativos resultaron en hasta 20 MPa. Las microestructuras mostradas en la Figura 4 CAA con precursores de 75% CER-25% metacaolín y 65% CER-20% PC, muestran la formación de matrices cementosas relativamente densas que corresponden con la resistencia mecánica medida.

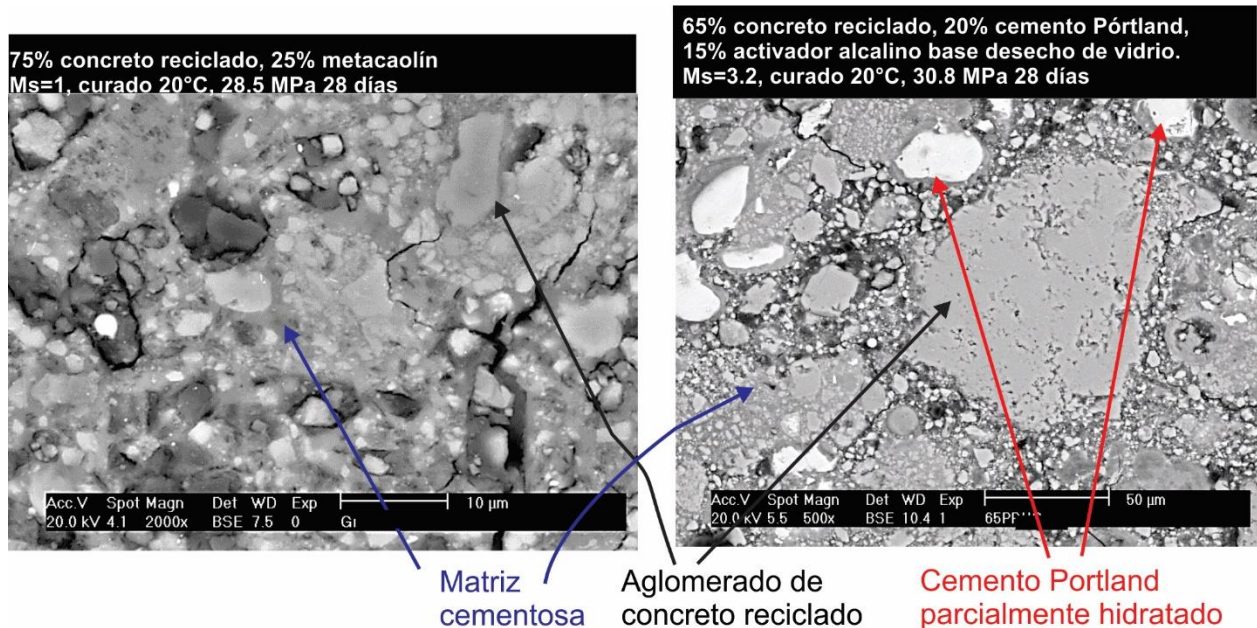


Figure 4. Microestructuras de AAC usando concreto reciclado como precursor. Imágenes por electrones retrodispersados.

La Figura 5 presenta una comparación de emisiones de CO₂, de demanda energética para producción y el costo de algunos concretos basados en CER, CER-metacaolín y CER-CP. Puede notarse la eficacia del activador alternativo a base desecho de vidrio en términos de reducir el impacto ambiental y costo. Adicionalmente, los CAA de CER con el activador alternativo resultan en propiedades similares al uso del activador comercial, lo cual es ventajoso y prometedor.

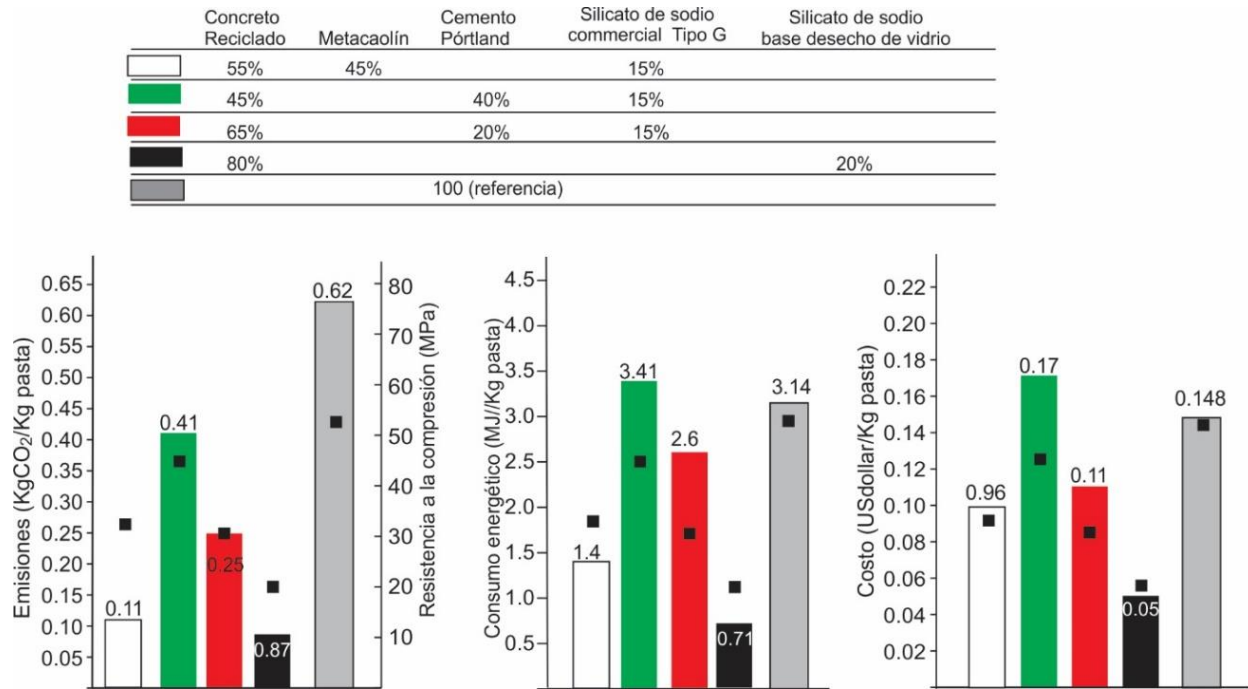


Figura 5. Comparativa de emisiones de CO₂, demanda energética y costo de algunos cementos alcalinos base concreto reciclado pulverizado y cemento Portland

5. RETOS Y PERSPECTIVAS

Las soluciones de construcción sostenibles son fundamentales para abordar los crecientes desafíos ambientales y garantizar un futuro viable para las generaciones venideras. El crecimiento demográfico global proyectado para las zonas urbanas, de 4,378 a 6,679 millones entre 2020 y 2050) (Naciones Unidas, 2018), demandará nueva infraestructura, lo que implicará una gran demanda de materiales de construcción como el concreto y por ende de materiales cementosos. Tal reto debe enfrentarse con enfoque de desarrollo sostenible.

Si bien la incorporación de caliza y concreto reciclado pulverizado en CAA tiene el potencial de revolucionar la industria de la construcción, creando materiales alternativos de alto rendimiento y bajo impacto ambiental, persisten desafíos. La durabilidad de estos CAA es un tema de investigación en curso. Sin embargo, los reportes de formación reportada de productos cementantes similares al CP y otros cementos alcalinos permite una perspectiva favorable. Adicionalmente, se requiere una mayor investigación en diversos dominios, como los de la reología, y los tiempos de fraguado, que impactan las operaciones de construcción. Los reportes recientes indican que estos cementos son prometedores para en impresión 3D (Perales-Santillan et al., 2024), lo cual también requiere investigación adicional. Otro aspecto importante es el estudio de la compatibilidad a largo plazo de la caliza y el CER con diferentes precursores y activadores alcalinos, así como las propiedades electroquímicas de estos cementos en concretos reforzados con acero.

6. CONCLUSIONES

La caliza ha sido y continúa siendo una materia prima clave para los materiales de construcción usados por la humanidad. Actualmente, es indispensable en la producción de cemento Portland y concreto. Sin embargo, su aplicación como precursor en cementos alcalinos y otros como los LC3 representa potencialmente un salto significativo en la industria de la construcción, constituyendo una alternativa sostenible al cemento Portland tradicional.

Las interacciones químicas entre la caliza, otros precursores y activadores alcalinos conducen a cementos con buen desempeño, menores costos, mayor durabilidad y beneficios ambientales. El uso generalizado de caliza en los cementos activados por álcalis tiene el potencial de mitigar drásticamente la huella ambiental de la industria de la construcción, dado que la caliza no requiere procesamiento térmico en comparación con el clínker del cemento Portland, por lo que se reduce el uso de combustibles fósiles e las emisiones de CO₂.

La posibilidad de reciclar concreto reciclado como material precursor, más allá del uso convencional como agregados reciclados, incrementa las posibilidades de promover una economía circular en la construcción, dando un mayor valor agregado a los desechos de construcción, reduciendo el consumo de recursos naturales y minimizando la generación de residuos. Adicionalmente, los cementos alcalinos base concreto reciclado promueven el desarrollo de cementos con menores emisiones ambientales y menor demanda de combustibles fósiles

La caliza como mineral per se o como componente en los agregados del concreto, sigue siendo una pieza clave para el desarrollo de cementos sostenibles, ofreciendo una solución viable para una industria de la construcción más ecológica y responsable con el medio ambiente.

La investigación continua y la implementación a gran escala prometen un futuro en el que la infraestructura se construya con materiales de menor impacto ambiental, en el marco de una economía circular, contribuyendo a un planeta más sostenible.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Conahcyt por el financiamiento con el proyecto CF-2023-G-405 Ciencia de Frontera y al Cinvestav y la SEP por el proyecto 154 SEP-Cinvestav 2018. También se reconocen las becas de posgrado de Rodríguez-Morales y Reyna-Perez.

8. REFERENCIAS

- Aboulayt, A., Riahi, M., Anis, S., et al. (2009). Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23(8), 2951–2957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.022>
- Aboulayt, A., Riahi, M., Touhami, M.O., Hannache, H., Gomina, M., Moussa, R. (2017). Properties of metakaolin-based geopolymer incorporating calcium carbonate. *Adv. Powder Technol.*, 28, 2393–2401. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.06.022>
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718-729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044>



- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Borrachero, M. V., Payá, J., Brito, S., Segura, Y. P., Soriano, L., Tashima, M. M., & Monzó, J. M. (2022). Reusing construction and demolition waste to prepare alkali-activated cement. *Materials*, 15(10), 3437 <https://doi.org/10.3390/ma15103437>
- Cembureau, The European Cement Association. (1991). *Cement Standards of the World*, Brussels, Belgium. Retrieved from <http://www.cembureau.eu> (Accessed: 20 January 2024).
- Chan, C.L., Zhang, M. (2023). Effect of limestone on engineering properties of alkali-activated concrete: A review. *Const BuildMater*, 362, 129709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129709
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., & Zhang, J. (2021). Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>
- Courland, R. (2011). *Concrete Planet*. Prometheus Books, New York. ISBN 978-1-61614-482-4.
- Cwirzen, A., Provis, J.L., Penttala, V., Habermehl-Cwirzen, K. (2014). The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Constr. Build. Mater.*, 66, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.022>
- ECOCEM Global, 2024. ACT The next generation of low carbon cement technology, <https://www.ecocemglobal.com/act/> (accessed 10 February 2024).
- Escalante-García, J. I., Pérez-Cortés, P., Hydraulic cement based on alkaline earth carbonates like limestone and calcined clay and process to make pastes, mortar and concretes of high performance (in Spanish), Patent application MX/a/2018/ 016140
- European Committee for Standardization. (2000). *Cement - part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements*. EN 197-1, Brussels. Retrieved from <http://www.rucem.ru/yabbfiles/Attachments/EN-197-1.pdf> (Accessed: 20 January 2024).
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. (2015). Properties of alkali activated slag–fly ash blends with limestone addition. *Cem. Concr. Compos.*, 59, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.007>
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Veni, G. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*, doi:10.1007/s10040-020-02139-5
- Juenger, M.C.G., Snellings, R., Bernal, S.A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cem Concr Res*, 122, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.012>
- Krivenko, P. (2017). Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. *J. Ceram. Sci. Technol.*, 08(3), 323-334. DOI: 10.4416/JCST2017-00042
- Ma, J., Wang, T., et al. (2022). A state-of-the-art review on the utilization of calcareous fillers in alkali-activated cement. *Constr Build Mater*, 357, 129348. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.129348.
- Menchaca-Ballinas, L.E., Escalante-García, J.I. (2020). Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH. *Constr. Build. Mater.*, 262, 120013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120013>



- Monteiro, J.M., Sabbie A, Horvath A. (2017). Towards Sustainable Concrete. *Nature Materials*, 16(7), 698–99. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Ortega-Zavala, D., Santana-Carrillo, J.L., Burciaga-Díaz, O., Escalante-Garcia, J.I. (2019). An Initial Study on Alkali Activated Limestone Binders. *Cem Concr Res*, 120, 267–78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.002>
- Özalp, F., Yilmaz, H. D., Kara, M., Kaya, Ö., & Şahin, A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Perales-Santillan, M.E., Díaz-Aguilera, J.H., Mendoza-Rangel, J.M. (2024). Evaluation of the rheological behavior for alkaline-activated cements of metakaolin and limestone for its potential application in 3D printing. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01363-3>
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J.I. (2020a). Alkali activated metakaolin with high limestone contents – Statistical modeling of strength and environmental and cost analyses. *Cem Concr Compos*, 106, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J.I. (2020b). Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin: a comparison of strength, microstructure, and sustainability with Portland cement and geopolymers. *J. Clean. Prod.*, 273, 123118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J.I. (2020c). Gel composition and molecular structure of alkali-activated metakaolin-limestone cements. *Cement Concr. Res.*, 137, 106211. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106211>
- P. Perez-Cortes, K. Cabrera-Luna & J.I. Escalante-Garcia, (2021). Alkali-activated limestone/metakaolin exposed to high temperatures: structural changes. *Cem. Concr. Compos.* 122, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104147>
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J.I. (2023). Effect of the Limestone Content on the Durability of Alkali-Activated Limestone-Metakaolin Subjected to Acidic and Sulfate Environments, in *Proc 75th RILEM Annual Week. RILEM Bookseries, Vol 40*, Escalante-Garcia J.I. et al. (eds), Springer, ISBN 978-3-031-21734-0 ISBN 978-3-031-21735-7 (eBook), https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_64
- Purdon, A. (1940). The action of alkalis on blastfurnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry - Transactions and Communications*, 59, 191-202.
- Qian, J., Song, M. (2015). Study on influence of limestone powder on the fresh and hardened properties of early age metakaolin-based geopolymer. In: K. Scrivener, A. Favier (Eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proc 1st Int Conf on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, Dordrecht, pp. 253–259.
- Rakhimova, N.R., Rakhimov, R.Z., Morozov, V.P., Gaifullin, A.R., Potapova, L.I., Gubaidullina, A.M., Osin, Y.N. (2018). Marl-based geopolymers incorporated with limestone: a feasibility study. *J. Non-Cryst. Solids*, 492, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.04.015>
- Rakhimova, N. (2022). Calcium and/or magnesium carbonate and carbonate-bearing rocks in the development of alkali-activated cements – A review. *Constr Build Mater*, 325, 126742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126742>
- Rashad, A.M. (2022). Effect of limestone powder on the properties of alkali-activated materials – A critical overview. *Constr Build Mater*, 356, 129188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129188>



- Rodriguez-Morales, J., Burciaga-Diaz, O., Gómez-Zamorano, L.Y., & Escalante-Garcia, J. I. (2024). Transforming construction and demolition waste concrete as a precursor in sustainable cementitious materials: An innovative recycling approach. *Resources, Conservation & Recycling*, 204 (2024) 107474. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107474>
- Saba, M., Hernandez-Romero, L.N., Lizarazo-Marriaga, J., Quiñones-Bolaños, E.E. (2019). Petrographic of limestone cultural heritage as the basis of a methodology to rock replacement and masonry assessment: Cartagena de Indias case of study. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00281. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00281>
- Sakulich, A.R., Anderson, E., Schauer, C., Barsoum, M.W. (2009). Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete. *Constr Build Mater*, 23, 2951–2957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.022>
- Santana-Carrillo, J.L., Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J.I. (2022). Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate - Effect on properties and CO₂ emissions. *CemConcr Compos*, 126, 104364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104364>
- Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cem Concr Res*, 124, 105792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem Concr Res*, 114, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Shah, I. H., Miller, S. A., Jiang, D., & Myers, R. J. (2022). Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons. *Nature communications*, 13(1), 5758. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33289-7>
- United Nations. (2018). World Urbanization Prospects. Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. Retrieved from <https://population.un.org/wup/dataquery/2018>.
- Vázquez Leal, F.R., Mendoza-Rangel, J.M., Andrade, C., Perez-Cortes, P., Escalante-García, J.I. (2023). Electrochemical Behaviour Of Steel Embedded In Alkali Activated Metakaolin/Limestone Based Mortar. In RILEM Bookseries Vol 40, Escalante-García, J.I. et al. (Eds.), Proc 75th RILEM Annual Week Mérida México. ISBN 978-3-031-21734-0 ISBN 978-3-031-21735-7 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7>.
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V.M. (2022). Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality. *RILEM Technical Letters*, 7, 30-46.
- Yip, C.K., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2008). Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. *Cement Concr. Compos.*, 30, 979–985. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.07.004>.





Uso de cáscara de coco como reemplazo parcial de agregado grueso en concreto

M. A. Maldonado-García^{1*}, G. Gómez-Hernández²

*Autor de Contacto: marco.mg@itoaxaca.edu.mx

¹ Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

² Doctorante, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

RESUMEN

El concreto es uno de los materiales de construcción mayormente empleados para satisfacer necesidades de infraestructura civil. Sin embargo, su elaboración requiere de grandes cantidades de agregados pétreos ocasionando la sobre explotación de bancos de material. Considerando lo anterior, investigaciones se han enfocado en buscar materiales alternos para sustituir parte de los agregados en el concreto, entre estos materiales se encuentra la cáscara de coco (CC). La CC es un material de desecho agrícola disponible México, es resistente y de fácil procesamiento mecánico. No obstante, su uso como agregado grueso en mezclas de concreto continua en desarrollo. En esta investigación se evalúa el potencial de uso de la CC basándose en tratamientos de mínima demanda energética para obtención del material. Se analizaron resultados en la literatura, diversas metodologías para el tratamiento de la CC, resultados de pruebas en estado fresco y de resistencia a compresión del concreto. Se concluye que es posible obtener concretos con resistencias a compresión aceptables incluyendo agregado de CC procesado con mínima demanda energética, que resulta benéfico para el desarrollo de vivienda. Así mismo se tienen recomendaciones para investigaciones siguientes.

Palabras clave: Concreto ecológico; Vivienda; Agregado grueso.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto se ha convertido en un material detonante para el desarrollo de infraestructura civil y satisfacer necesidades de vivienda en la sociedad. Se trata de un material de construcción versátil en cuanto a sus múltiples aplicaciones, viable económicamente hablando y durable. Sin embargo, su elaboración requiere de grandes cantidades de recursos naturales como lo son el agua, material de banco para la fabricación del cemento Portland y agregados naturales (arena y grava). En cuanto a los agregados pétreos estos ocupan entre el 70 y 80% del volumen total del concreto, estos agregados son obtenidos en bancos de material natural generando destrucción del medio ambiente y agotamiento de recursos naturales. De acuerdo con recientes investigaciones, el gran consumo de agregado para el concreto ha generado sobre explotación de bancos de material, además factores tales como una distribución ineficiente en conjunto causan problemas ambientales y sociales, por lo anterior es necesario que el consumo per cápita de estos materiales sea reducido. (Bisht, 2022). Existen diversos materiales de desechos o reciclados a los cuales después de darles algún tratamiento pueden emplearse como sustituto de los agregados en el concreto. Los efectos en el concreto de cada material dependerán de diversos factores entre ellos: el tipo de mezcla, el diseño de mezcla y por supuesto la metodología empleada para tratamiento del material tales como el molido, pulverizado o métodos químicos (Chinnu, 2021). Además de los factores antes mencionados, en la práctica existen otros criterios que deben considerarse para seleccionar que materiales de desecho o reciclados conviene emplearse como reemplazo de agregado en el concreto, uno de estos criterios y de gran importancia es la trabajabilidad de la mezcla de concreto conteniendo dichos materiales de desecho como agregado. Esta propiedad en estado fresco se verá afectada directamente por las características del material a emplearse como agregado y en específico la forma y absorción.

Otro criterio que debe considerarse para emplear un material de desecho como agregado en el concreto es la disponibilidad. Al tratarse de un material de desecho o reciclado generalmente no tiene costo alguno el obtenerlo, sin embargo, si un material debe de transportarse largas distancias entonces se tendrá un costo por este concepto el cual incrementará el costo del concreto haciéndolo económicamente poco viable y por ende con poca aceptación. Considerando lo anterior, es recomendable la evaluación para el uso de materiales de desecho regionales, entre ellos los desechos de origen agroindustrial, los cuales generalmente se encuentran dispuestos a cielo abierto ocasionando problemas de disposición.

Existen diversos materiales de desecho de origen agroindustrial y entre ellos se encuentra la cáscara de coco (CC), la cual puede resultar viable para su utilización como reemplazo de los agregados en el concreto (Mo, 2020).

La CC puede ser tratada de diversas maneras para utilizarse como agregado, pero lo relevante es su forma cóncava y delgada a comparación de la grava, lo cual debe ser evaluado a detalle para comprender los posibles efectos en las propiedades mecánicas, microestructurales y de durabilidad del concreto. No obstante, la CC tiene otras propiedades como son rigidez y resistencia al impacto las cuales podrían resultar a favor en una mezcla de concreto (Tomar, 2021). Diversos autores han evaluado el uso de la cáscara de coco como reemplazo del agregado fino o del agregado grueso en el concreto indicando que un porcentaje óptimo se encuentra entre 5 y 20% para no comprometer las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto, además de seguir siendo una alternativa ecológica (Gunasekaran, 2012; Rajeevan, 2015; Kanojia, 2017 Noruzman, 2020; Kumbhar, 2021, Mhaya, 2022).



2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión bibliográfica acerca del uso de la cáscara de coco como agregado en mezclas de concreto. Se identificaron diversas metodologías para tratamiento de la CC las cuales son diversas dependiendo si se empleará como agregado fino o grueso. Evidentemente el conseguir un agregado de CC más fino conlleva a mayor gasto de energía para reducir los tamaños de partículas por medio del molido, por ejemplo. En esta investigación se ha buscado emplear la CC con mínimo tratamiento con la finalidad de ser aplicable en proyectos de desarrollo social. Considerando lo anterior se optó por implementar la siguiente metodología.

Se decidió emplear la CC como agregado grueso lo cual permite reducir la cantidad de energía empleada para su tratamiento puesto que, en comparación a su uso como agregado fino, el proceso de reducción de tamaño de partícula es mayor. La CC fue recolectada en mercados locales en donde la mayor parte termina siendo considerado como desecho. La CC fue transportada en costales y posteriormente extendida al sol para su secado, el tiempo aproximado de secado fue entre 1 y 2 semanas. Una vez seco, se procedió a limpiarlo y a remover toda la fibra empleando un cuchillo. A continuación, se implementaron dos metodologías. La primera consistió en disgregar manualmente la CC utilizando un mazo de madera (CS). La segunda metodología consistió también en disgregar la CC manualmente con un mazo para posteriormente colocarla en una máquina de abrasión de los Ángeles hasta cumplir un ciclo de 400 revoluciones (CT). En ambas metodologías se recolectó el agregado de CC con tamaños de partículas comprendidas entre 4.75mm y 19mm.

Para las mezclas de concreto (25MPa a 28 días de edad) se tomó como base el método de volúmenes absolutos del ACI. Se diseñaron una mezcla control C y mezclas con 10 y 20% de CC como sustituto parcial de agregado grueso para ambas metodologías de obtención del agregado. Las mezclas conteniendo CC triturado con mazo corresponden a la nomenclatura 10CS y 20CS, mientras que las mezclas conteniendo CC desgastadas por 400 ciclos en la máquina de abrasión son 10CT y 20CT. El diseño de mezclas se realizó por durabilidad con una relación agua/cemento de 0.5. Los materiales empleados fueron CPC-30R Apasco, grava triturada, arena de río y agua potable. Los agregados de CS y CT fueron saturados durante 24 horas previo a la realización de las mezclas de concreto.

Durante la elaboración de las mezclas de concreto se realizaron pruebas en estado fresco de revenimiento. Posteriormente se elaboraron cilindros de concreto de 10cm de diámetro por 20cm de altura. Los cilindros fueron curados en una solución de hidróxido de calcio durante 28 días. A continuación, se realizaron pruebas de resistencia a compresión por triplicado para cada una de las mezclas de concreto. Estas pruebas fueron realizadas en una prensa hidráulica con capacidad de 200 ton marca Matest.

Tabla 1. Proporcionamiento de mezclas de concreto

Mezcla	Cemento (kg)	Grava (kg)	Cáscara de coco (kg)	Arena (kg)	Agua (lts)
C	408.4	875.2	0	682.9	227.7
10CS	408.4	787.7	49.6	682.9	226.1
20CS	408.4	700.7	99.3	682.9	224.4
10CT	408.4	787.7	49.6	682.9	226.1
20CT	408.4	700.7	99.3	682.9	224.4

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La CC es físicamente diferente en comparación con el agregado grueso empleado en concreto (Natural o triturado). Su forma es básicamente delgada, en forma de laja, cóncava y lisa, pero áspera en la cara convexa. Está conformada por lignina y celulosa, además, está conformada por una estructura celular transversalmente lo cual hace que este material absorba agua (Figura 1). Este tipo de estructura ha sido reportada en otras investigaciones (Gunasekaran, 2012).

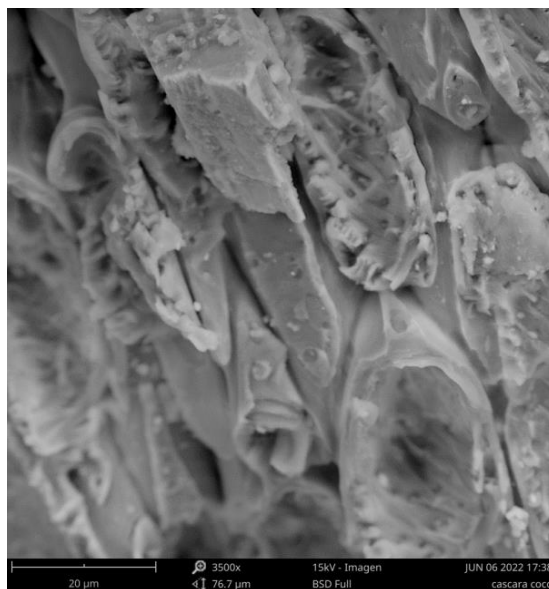


Figura 1. Micrografía de corte transversal de la cáscara de coco.

El porcentaje de absorción de la CC es 32%, mucho mayor que el porcentaje de absorción del agregado grueso, por lo tanto, se requiere que la CC sea saturada durante 24 horas antes de ser utilizada como agregado en mezclas de concreto. Se observa que el revenimiento de las mezclas de concreto conteniendo CS y CT es menor con respecto a la mezcla control. Así mismo, el revenimiento de las mezclas conteniendo CS es menor en comparación con las mezclas conteniendo CT para ambos porcentajes de sustitución. En la tabla 2 se muestran el revenimiento de las diferentes mezclas de concreto.

Tabla 2. Revenimiento de mezclas de concreto

Mezcla	Revenimiento, cm
C	7.0
10CS	4.0
20CS	2.5
10CT	6.50
20CT	5.25

Los resultados de resistencia a compresión muestran decremento conforme se tiene mayor contenido de CS y CT. Las mezclas con 10CS y 10CT alcanzan la resistencia de diseño. No obstante, los valores de resistencia a compresión de las mezclas conteniendo el mismo porcentaje

de CS y CT son prácticamente iguales. Lo anterior sugiere que con solamente triturar la cáscara de coco de manera manual es suficiente, teniendo menor gasto energético y por ende mayor aplicabilidad al no someter la CC a un tratamiento de desgaste después de su trituración. Sin embargo, aún se requiere mayor caracterización de mezclas conteniendo CC puesto que de acuerdo con lo reportado por diversos autores, existe gran variabilidad en el comportamiento mecánico del concreto y esto depende de la naturaleza de la CC y de las diferentes metodologías empleadas para tratar la cáscara (Gunasekaran, 2012; Faisal, 2018, Chinnu, 2021). No obstante, investigaciones afirman que el uso de la CC como agregado en el concreto ayuda a reducir problemas ambientales y también se tienen beneficios en el aspecto económico de la industria de la construcción (Yerramala, 2012; Kumar, 2019; Tomar, 2021).

Mezcla	MPA
C	34.8 ± 1.56
10CS	26.24 ± 1.45
20CS	20.35 ± 1.05
10CT	25.80 ± 0.44
20CT	20.90 ± 1.22

4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

De acuerdo con los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones: Se observó reducción en la fluidez de mezclas de concreto conteniendo CS y CT. Sin embargo, las mezclas pudieron colocarse adecuadamente. El uso de un aditivo hiperfluidificante queda a criterio de quien emplee la CC tratada con las metodologías aquí planteadas.

No se observó diferencia significativa de la resistencia a compresión de los concretos al comparar los dos tratamientos propuestos para la cáscara de coco, por tanto, se sugiere que el material triturado manualmente es suficiente para aplicación en proyectos de construcción. Lo anterior permite una mayor aplicabilidad al no requerir de equipo especializado para tratar la CC.

Se requiere de pruebas de caracterización mecánica a edades posteriores a fin de descartar posibles inconvenientes con el uso de la CC tales como su deterioro al encontrarse en un medio altamente alcalino.

Se sugiere estudios de durabilidad para las mezclas de concreto conteniendo CC. Es posible que los huecos en la cara transversal de la cáscara se llenen de pasta cementante al momento del mezclado y por ende se tenga una mayor densificación del concreto.

Con la finalidad de contrarrestar el decremento de resistencia a compresión al utilizar la CC como agregado en el concreto, se sugiere emplear algún otro material sustituto de área o en su defecto el empleo de algún material con potencial puzolánico como reemplazo parcial del cemento.

Se sugiere que los concreto conteniendo 20% de CC como reemplazo de agregado grueso sean utilizados solamente para fines no estructurales.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca por las facilidades económicas a través del proyecto de investigación 13277.21-P. Así mismo, por la beca de estudios de posgrado otorgada por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) al estudiante Gómez-Hernández Gildardo.

6. REFERENCIAS

- Bisht A. (2022), *Sand futures: Post-growth alternative for mineral aggregates consumption and distribution in the global south*. Ecological Economics.191(107233): 1-8.
- Chinnu S.N., Minnu S.N., Bahurudeen A., Senthilkumar R. (2021), Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: *A step towards production of concrete*. Construction and Building Materials 287:123056.
- Faisal S.K. (2018), *Review of coal bottom ash and coconut shell in the production of concrete*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 342.
- Gunasekaran K., Annadurai R., Kumar P.S. (2012), *Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete*. Construction and Building Materials 28(1):208-215.
- Kanojia A., Jain S.K. (2017), *Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete*, Construction and Building Materials 140:150-156.
- Kumar Verma S., Shrivastava S. (2019), *Use of coconut hell as partly substitution of coarse aggregate – An experimental analysis*, in AIP conference proceedings 2158, Proceeding of the International Conference on Sustainable Materials 020021;1-8.
- Kumbhar V.P., Pawar R.E. (2021), *Experimental analysis of concrete for replacement of sand by coconut shell crush*, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 12(7):420-424.
- Mhaya A.M. Algaifi H.A., Shahidan S., Mohd Zuki S.S, Azim M., Azmi M., Wan Ibrahim M.H., Huseien G.F. (2022), *Systematic evaluation of permeability of concrete incorporating coconut shell as replacement of fine aggregate*, Materials 5:1-19.
- Mo K.H., Thomas B.S., Yap S.P., Abutaha F. (2020), *Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability-related properties*. Journal of Cleaner Production 275:123062.
- Noruzman A.H., (2020), *Effects of waste coconut shell as partial replacement of sand on concrete mortar properties*, Diges Akademik, Centre for Research and innovation, Politeknik Sultan Salahuddin Abdul Aziz Shah 3:98-105.
- Rajeevan B., Shamjith K.M. (2015), *A study on the utilization of coconut shell as coarse aggregate in concrete*, International Journal of Engineering & Technology 4(07):77-80.
- Tomar R., Kishore K., Parihar H.S., Gupta N. (2021), *A comprehensive study of waste coconut shell aggregate as raw material in concrete*, Materials Today Proceedings 44(1):437-443.
- Yerramala A. (2012), *Properties of concrete with coconut shell as aggregate replacement*, International Journal of Engineering Inventions 1(6):21-31.





Desempeño de pastas y morteros a base de cemento portland con altos contenidos de adiciones de caliza

R. A. Méndez Páramo^{1*}, A. A. Torres-Acosta¹, C. Arista Perrusquía¹, E. S. Herrera Sosa¹

*Autor de Contacto: a01703671@tec.mx

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Querétaro, Querétaro, México.

RESUMEN

La estrategia de la industria del cemento en muchos países es reducir sus emisiones de CO₂ para disminuir los gases de efecto de invernadero (GEI). Esta estrategia consiste en reducir estas emisiones disminuyendo el contenido de clínker en sus nuevas formulaciones, reemplazándolo por el uso de materiales cementosos suplementarios o de rellenos inertes. Uno de las adiciones más utilizados en la industria cementera de América Latina son los rellenos inertes de caliza (RIC), que son los más económicos. Esta investigación incluye resultados experimentales obtenidos de pastas y morteros de cemento Portland donde se utilizaron RICs entre 3% y 35% por reemplazo de clínker. Los resultados obtenidos en pastas de cemento incluyen el contenido de agua consistencia normal y los tiempos de fraguado inicial y final. Los resultados obtenidos en mortero incluyen el desempeño mecánico (resistencia a la compresión), físico (resistividad eléctrica, contenido total de vacíos, porosidad capilar) y químico (carbonatación después de seis meses de exposición natural) de dichos morteros. Los coeficientes de carbonatación (kCO₂) obtenidos después de seis meses de exposición en un ambiente urbano natural fueron 17.3, 22.9 y 24.5 mm/año^{1/2} para cementos con RIC de 23%, 27% y 29%, respectivamente. Estos resultados fueron comparablemente más altos que los valores típicos de kCO₂ de ~ 4 mm/año^{1/2} obtenidos de morteros ordinarios a base de cemento Portland que tienen un contenido de clínker del 90-95 %.

Palabras clave: caliza; concreto; construcción; durabilidad; sustentabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de la construcción se encuentra en una transición hacia lo sustentable, un ejemplo son las cementeras que redujeron el clinker de sus mezclas con el fin de reducir las emisiones de CO₂ de sus plantas. Sin embargo, al ser soluciones específicas para el cemento únicamente no contemplan el producto final que en este caso es el concreto. Esta solución puede parecer al principio sustentable, no obstante, podría tener un impacto negativo a la durabilidad del concreto y por consiguiente a su sustentabilidad. Las estructuras de concreto son regularmente consideradas como estructuras durables con un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, en las últimas dos décadas se ha observado un incremento en agrietamientos y delaminaciones en estructuras de concreto que poseen tan solo entre 2 y 10 años en servicio (Torres Acosta 2022, Torres Acosta 2024).

En muchos de los casos se ha debido al conocimiento incipiente del comportamiento de los concretos endurecidos fabricados con las nuevas proporciones de los cementos Portland que conforman la fabricación de esta infraestructura. Principalmente el comportamiento de los cementos Portland compuestos (denominados en la normativa mexicana como CPC), cada vez más utilizados en la construcción en México y varios países latinoamericanos.

Los CPC's es el tipo de cemento que ha desplazado el uso de los cementos portland ordinarios (denominados CPO) que poseen un alto contenido de clinker (entre 90% y 95%). A estos CPC's se le añaden además del clinker otros productos alternativos que, de acuerdo con la Norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE (2017), pueden ser: escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales, ceniza volante, humo de sílice, caliza y minoritarios. De todos estos podemos dividirlos en dos tipos de adiciones: materiales cementantes suplementarios (MCS: escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales, ceniza volante, humo de sílice) y relleno inerte (caliza). Los primeros reaccionan con el agua para generar una microestructura densa; los segundos tienen una reacción baja o nula y solo funcionan como material de relleno en la fabricación de los nuevos cementos.

Dependiendo de los contenidos en porcentaje de estos seis componentes se definen seis diferentes tipos de cemento los cuales se enuncian en la Norma NMX-C-414-ONNCCE (2017). De éstos, el que actualmente se comercializa de manera más común es el CPC y los demás cementos se fabrican sobre pedido, incluyendo el CPO que corresponde al tipo de cemento que antes del año 1999 se fabricaba exclusivamente en México y muchos países latinoamericanos.

Cuando estos nuevos cementos denominados CPC poseen una adición, además del clinker, se le denominan cementos binarios. Cuando los CPC's poseen dos adiciones además del clinker se denominarán cementos ternarios. Y así sucesivamente si los CPC's poseen más de dos adiciones en su formulación.

El uso de cementos binarios o ternarios ha permitido a la fecha la reducción del clinker hasta en un 30% y 50%, remplazándose éste con adiciones puzolánicas activas o rellenos inertes con el agua para formar compuestos hidratados. Esto ha generado que la correlación entre la relación agua/cemento (a/c) y la resistencia a la compresión a 28 días (también llamada $f'c$) no se cumpla, por lo que la metodología de diseño de mezclas de concreto debe de replantearse tomando en cuenta las diferencias en los cementos actuales en nuestro país, y en muchos países Latinoamericanos (Torres Acosta et al. 2023).

También se ha observado que el concreto manifiesta contracciones en exceso promovido por estas mismas adiciones cementosas o inertes, por lo que la manifestación de grietas a temprana edad se presenta más frecuentemente en estructuras puestas en servicio en tiempos extremadamente cortos



(<5 años) en puentes y muelles (Torres Acosta 2022) y en edificaciones ubicadas en centros urbanos (Torres Acosta 2024).

Es por tal motivo que con este trabajo se evaluaron varios tipos de cemento, de dos marcas diferentes, siguiendo un programa experimental que incluyó la realización de pruebas de laboratorio para caracterizar los polvos de estos cementos, después el desempeño de pastas de cemento fabricados con estos seis tipos y por último se fabricaron morteros con los mismos cementos para también obtener su caracterización física, mecánica y por durabilidad.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales cementantes seleccionados para el estudio

Se seleccionaron seis diferentes tipos de cemento Portland, de dos marcas. De la marca definida como 1 se evaluaron cuatro tipos y de la marca definida como 2 se evaluaron dos cementos:

- Marca 1: CPC 20 F, CPC 30 R F, CPC 30 B F y CPC 40 F
- Marca 2: CPC 30 R RS BRA H y CPO 30 R RS BRA H

2.2. Pruebas de los polvos de cemento

Por situaciones de confidencialidad por parte de las cementeras no se conoce más información de estos cementos más que el tipo que se listó en el párrafo anterior. Es por ello que se decidió realizar las pruebas a los polvos para ver diferencias o coincidencias entre ellos sin la necesidad de tener información química o física de los mismos. Es por ello por lo que las pruebas físicas que se creen más objetivas para caracterizar estos polvos fueron la densidad (ρ), la pérdida por ignición (PPI) y el blaine o finura (F). Toda evaluación realizada en los polvos fue por triplicado y los valores presentados es el promedio de todos ellos.

Las pruebas de laboratorio realizadas con los polvos entregados por las fábricas de cemento fueron:

- Obtener la ρ siguiendo el procedimiento normado en NMX-C-152-ONNCCE-2015
- Obtener la PPI siguiendo el procedimiento normado NMX-C-414-ONNCCE-2017
- Obtención de la F siguiendo el procedimiento normado NMX-C-056-ONNCCE-2019

2.3 Pruebas de los polvos de cemento en pastas

Una vez caracterizados los polvos de cada uno de los cementos evaluados, el siguiente paso fue determinar las propiedades más comunes para las pastas de cemento, las cuales fueron:

- Obtención del agua necesaria para la consistencia normal de pastas, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-057-ONNCCE-2015
- Obtención de los tiempos de fraguado inicial y final, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-059-ONNCCE-2017
- Obtención del índice de blancura de la pasta de cemento, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-478-ONNCCE-2014

2.4 Pruebas de los polvos de cemento en mortero

Caracterizadas las pastas de cemento fabricadas con los seis cementos seleccionados, el siguiente paso fue caracterizar éstos mismos para determinar las características físicas, mecánicas y químicas si se utilizan en mortero. Las pruebas de caracterización incluyeron:

- Obtención de la cantidad de agua necesaria para obtener la fluidez normal en morteros, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-144-ONNCCE-2015

- Fabricación de cubos de mortero de 5x5x5 cm y obtención de la resistencia con estos cubos a edades de 3, 28, 90 y 180 días, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-061-ONNCCE-2015
- Obtención de la resistividad eléctrica saturada de los cubos de mortero a edades de 3, 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días, siguiendo el procedimiento normado NMX-C-514-ONNCCE-2019
- Obtención de la profundidad de carbonatación de los cubos de mortero expuestos a un ambiente natural urbano por 150 días. Siguiendo el procedimiento normado NMX-C-515-ONNCCE-2015
- Obtención de la contracción por secado de barras de mortero de 2.5x2.5x25 cm, siguiendo el procedimiento normado ASTM C-596 (2023)

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1 Pruebas de los polvos de cemento

Por situaciones de extensión del trabajo, se presentarán los resultados a manera de gráficas correlacionando la mayoría de éstos en función de la ρ , PPI y F de cada uno de los cementos. La Figura 1 muestra los resultados de una manera gráfica, así como las ecuaciones de tendencia y el coeficiente de correlación de éstos. Los valores obtenidos con el cemento tipo CPO se tomará como referencia, por ello el símbolo en todas las gráficas será de color negro y los demás se quedarán sin relleno alguno.

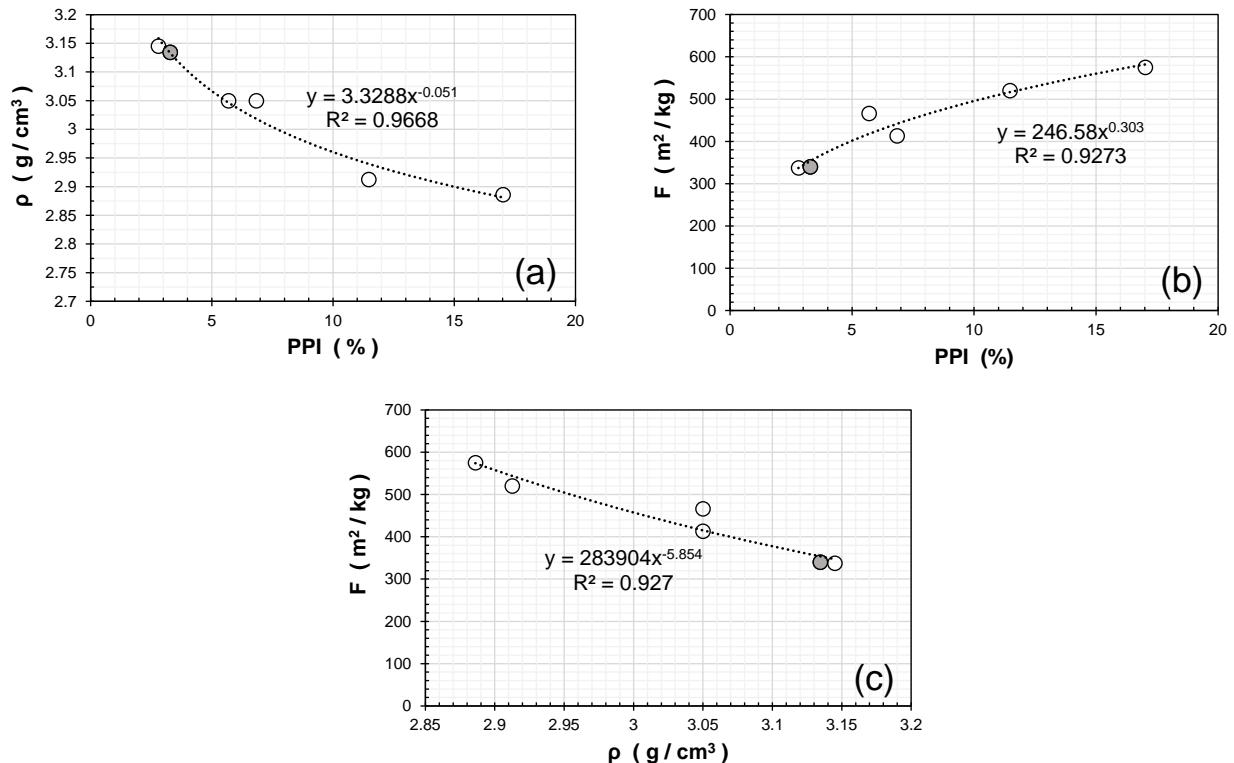


Figura 1. Principales parámetros medidos en los polvos de cemento representados en gráficas de correlación entre cada uno de ellos: (a) ρ vs PPI; (b) F vs PPI; y (c) F vs ρ .

Como puede observarse en las tres gráficas de la Figura 1, se obtuvieron excelentes correlaciones ($R^2 > 0.93$) para los tres parámetros de los polvos (ρ , PPI y F). También se observa que los cementos sin adiciones o con pocas adiciones como es el caso del CPO, obtuvo el mayor valor de ρ y los menores valores de PPI y F. Esto implica que los cementos con mayor contenido de adiciones tendrán valores contrarios: menores valores de ρ y los mayores valores de PPI y F. Esto claramente se observa también en las gráficas de la Figura 1, por lo que pudiera cualquiera de estos tres parámetros del polvo de cemento tomarse como referencia para saber la calidad de los cementos que se adquieren para una aplicación determinada.

Se tomará al valor de PPI como parámetro para estimar la cantidad de relleno inerte de caliza, conociendo que en un estudio previo se demostró que si se multiplica el valor de PPI por un factor de 2.0 se podría estimar con buena aproximación el contenido de relleno inerte de caliza (Torres Acosta 2024a), ya que el clínker regularmente su valor de PPI está entre 0.4 y 0.7, dependiendo de la pureza del mismo; los materiales cementosos como la escoria los valores de PPI son < 0.3 ; la ceniza volante tiene un PPI $< 1\%$; las puzolanas naturales están entre 1% y 2% ; y por último el relleno inerte de caliza posee una PPI entre 45% y 55% , dependiendo también de su pureza (Torres Acosta 2024a).

La Figura 2 muestra a los tres parámetros ρ , PPI y F de los cementos evaluados en función de la clase resistente (CR) definida por cada uno de los fabricantes. Si se considerara al desempeño del cemento solo con la CR, se observa una gran variabilidad en las propiedades físicas (ρ y F) como químicas (PPI) de los mismos. Un ejemplo es la gran variabilidad de la PPI de la CR 30, cuyo rango es de 3% hasta 16% lo que representa que puede esta CR tener contenidos de caliza entre 6% y 32% . Se recuerda que el símbolo relleno en color gris corresponde al CPO como referencia.

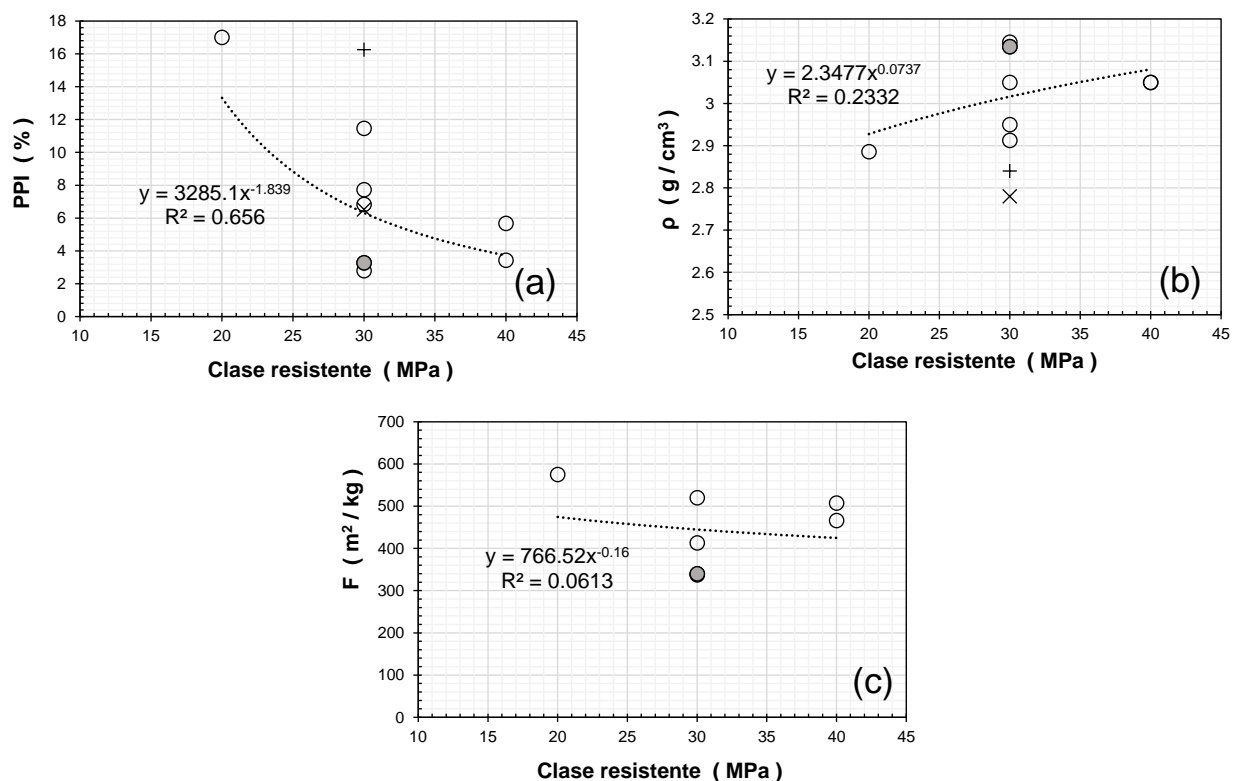


Figura 2. Principales parámetros medidos en los polvos de cemento en función de la clase resistente (CR) de los mismos: (a) PPI vs CR; (b) ρ vs CR; y (c) F vs CR.

Algo similar se observa en el parámetro ρ del polvo de cemento, cuyo rango, de acuerdo con los valores experimentales obtenidos, va de poco menos de 2.8 g/cm^3 hasta 3.15 g/cm^3 . Esta diferencia en los valores de PPI y ρ en la CR de 30 implicarán variaciones de consideración en el desempeño de pastas y morteros fabricados con esta clase de cemento.

3.2 Pruebas de los cementos en pastas

Tomando a la PPI como parámetro para evaluar la calidad de los cementos, la Figura 3 muestra los resultados obtenidos con las pastas de cemento evaluadas, cantidad de agua para consistencia normal como relación a/c tiempos de fraguado inicial y final e índice de blancura WI en función de la PPI. Los símbolos rellenos de color gris corresponden al cemento referencia CPO.

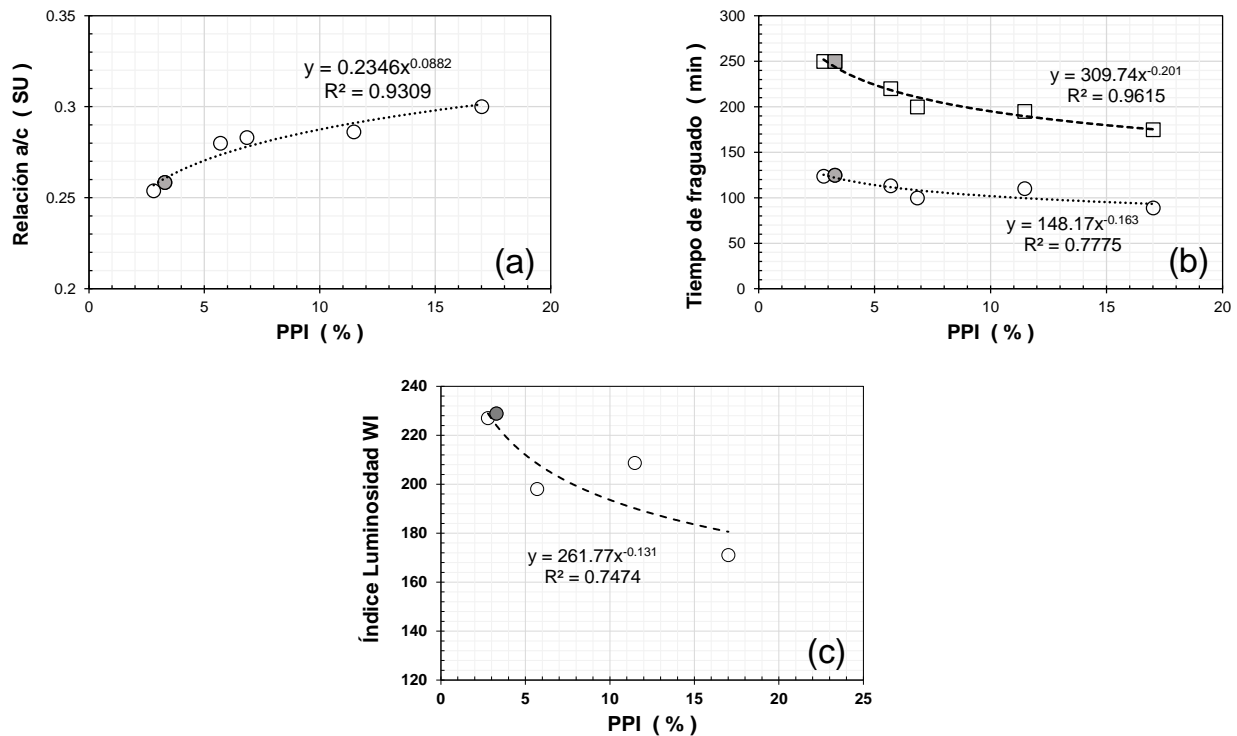


Figura 3. Principales parámetros medidos de los cementos evaluados en pastas, representados en gráficas de correlación entre cada uno de ellos: (a) relación a/c vs PPI; (b) Tiempos de fraguado inicial (\circ) y final (\square) vs PPI; y (c) WI vs PPI.

De nuevo se observan muy buenas correlaciones entre la PPI y los otros cuatro parámetros de las pastas, aunque los coeficientes de correlación R^2 en dos de ellas estuvieron por debajo de 0.8. Sin embargo, se observa que el parámetro de la PPI, que es realmente el contenido de relleno calizo, puede ser usado para pronosticar los tres parámetros de cantidad de agua para consistencia normal, y los tiempos inicial y final de fraguado de una manera aproximada.

El índice de luminosidad WI también ayudaría a determinar el contenido de caliza, al observarse que a mayor es el valor de la PPI del cemento, menor es el valor de WI, debido a que la pasta de cemento estaría más blanca de lo normal. Este valor se obtiene con un colorímetro, el cual es muy accesible para un laboratorio de control de calidad de materiales y pudiera así el usuario de un

cemento específico solicitar que se determine el valor de WI y así conocer el contenido de relleno inerte de caliza en el cemento que adquiere.

En la Figura 4 se muestran las gráficas de los tres parámetros evaluados a las pastas de cemento en función de su CR. De nuevo se observa una gran variabilidad en los resultados, dando así valores de R^2 muy bajos (entre 0.16 y 0.35). Esto implica que la cantidad de agua para consistencia normal, los tiempos de fraguado y la luminosidad serán impredecibles si no se acota el comportamiento de las pastas en función de los parámetros del polvo de cemento (ρ , PPI y F).

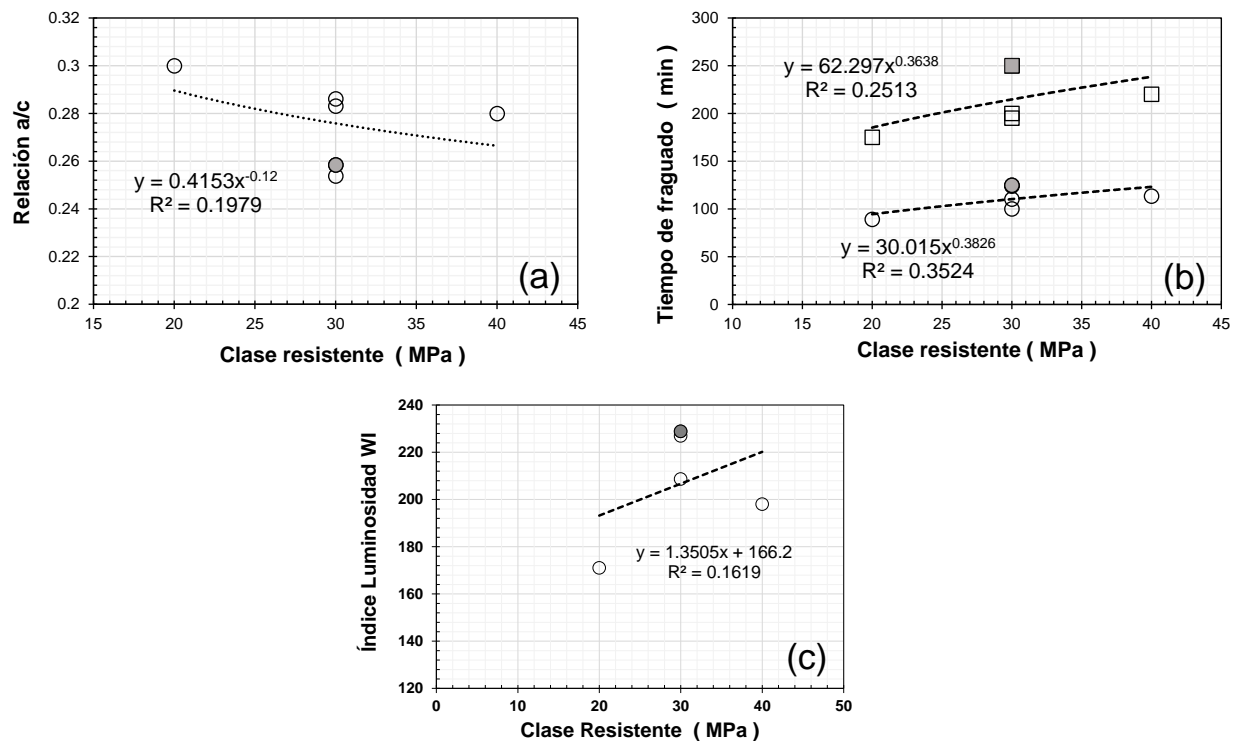


Figura 4. Principales parámetros medidos de los cementos evaluados en pastas en función de la CR de los mismos: (a) relación a/c vs CR; (b) Tiempos de fraguado inicial (\circ) y final (\square) vs CR; y (c) WI vs CR.

3.4 Pruebas de los cementos en mortero

Ahora se revisarán los resultados obtenidos de las mezclas de mortero fabricadas con los seis cementos evaluados. De igual manera, para reducir la extensión del trabajo, se presentarán los resultados a manera de gráficas en función del tiempo (entre 3 y 180 días de edad) o como correlación entre los parámetros del mortero y la PPI del polvo del cemento.

La Figura 5 presenta una gráfica donde se correlaciona las relaciones agua/cemento (a/c) para lograr la fluidez normal de $110 \pm 5\%$ definida en la Normativa. Se puede observar la gran variación que existe entre los tipos de cemento utilizados, así como una relación entre PPI y la relación a/c: a mayor es la PPI del cemento, mayor será la relación a/c para alcanzar misma fluidez normal. La Figura 5 muestra ambos parámetros del cemento (PPI) y el mortero (relación a/c), observándose una excelente correlación entre ambos parámetros.

Esta diferencia entre los tipos de cemento y la cantidad de agua (o relación a/c) para alcanzar la misma fluidez de los morteros evaluados, genera una incertidumbre en cuanto al desempeño físico

y mecánico de los morteros. Esto debido a que, a mayor agua en el mortero, mayor será la porosidad en el mismo, significando que existirá un menor desempeño físico y mecánico en los morteros con una mayor PPI, es decir, un mayor contenido de relleno calizo. Esto se corroborará con los datos obtenidos de las caracterizaciones tanto física como la mecánica.

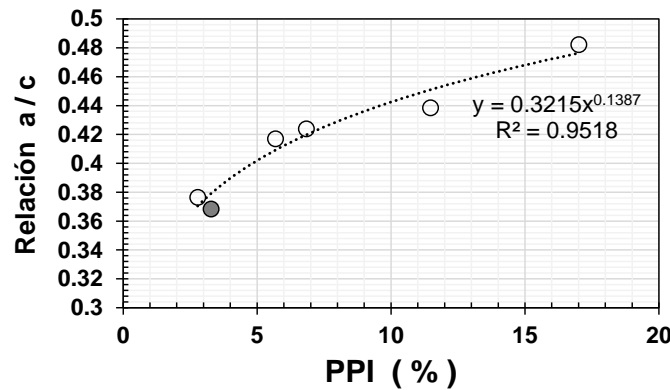


Figura 5. Correlación entre PPI del cemento y a/c del mortero para alcanzar una fluidez normal.

Los valores promedio de ρ_s del mortero (promedio de tres cubos) para los seis tipos de cemento se presentan en la Figura 6 en función del tiempo de la medición: 3, 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días. Los valores hasta los 90 días se obtuvieron con los cubos colocados en la tina de curado, a diferencia de los cubos que se caracterizaron a 180 días, que estuvieron entre los 28 y 180 días en exposición natural al ambiente y se saturaron por varios días para obtener ρ_s , como se explicó en el procedimiento experimental. Se observa en la Figura 6 que todos los morteros presentaron un aumento de la ρ_s en el tiempo. Este aumento fue gradual hasta los valores de 90 días, siguiendo aparentemente un patrón definido.

Una vez que los cubos se expusieron a la intemperie, los valores de ρ_s aumentaron considerablemente. El aumento de ρ_s observado con la edad del mortero podría ser indicativo de que los seis tipos de cemento continúan su hidratación después de los 28 días (fecha que regularmente se toma como base en la Norma para definir la resistencia del cemento) o porque existe una disminución de la porosidad interna por la carbonatación del mortero luego de su exposición al ambiente natural hasta los 180 días que se incluyen en el presente trabajo.

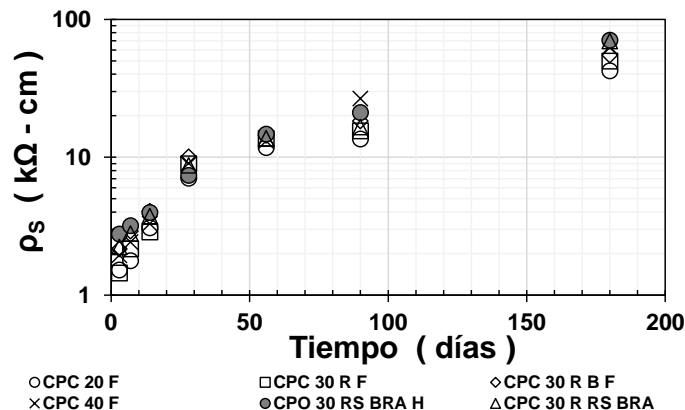


Figura 6. Valores promedio de ρ_s de los seis cementos evaluados vs tiempo.

Con los resultados de ρ_s a 28, 90 y 180 días de edad, se generaron gráficas de estos valores en función de la PPI de los cementos. Estas gráficas se muestran en la Figura 6. Se puede observar en esta figura que se obtuvo un mejor desempeño por ρ_s en los morteros que fueron fabricados con cemento con baja PPI. Sin embargo, las primeras dos fechas (28 y 90 días) los coeficientes de correlación fueron bajos comparados con los resultados obtenidos a 180 días de edad. El cemento que tuvo un mejor desempeño en ρ_s fue el del tipo CPO teniendo un valor a 180 días de 70 k Ω -cm mientras que el más bajo es el que tiene mayor contenido de caliza, siendo este el CPC 20 con un valor a 180 días de 42.5 k Ω -cm.

Esta correlación corrobora el efecto de la cantidad de agua que se debe añadir al mortero para que alcance una fluidez normal: a mayor PPI, o sea a mayor cantidad de caliza en el cemento, su desempeño físico por ρ_s disminuye. Esto a su vez generaría la necesidad de reducir la relación a/c del mortero para cementos con alta PPI para que éstos alcancen valores de ρ_s similares a los obtenidos con cementos de baja PPI. Esto implicaría la necesidad de reducir el agua y añadir aditivos químicos reductores de agua o aumentar el contenido de cemento adicionado en la mezcla. En ambos casos se reduciría la sustentabilidad de material mortero, ya que se aumentaría ya que se aumenta el costo al añadir aditivos químicos reductores de agua o por el aumento en la cantidad de cemento.

La siguiente propiedad del mortero evaluada fue la resistencia mecánica a compresión f_c . Los valores de f_c promedio corresponden al promedio de tres cubos por mezcla y por fecha de prueba, los resultados para todas las mezclas de mortero evaluadas se presentan en la Figura 8 en función de la edad de evaluación. Como se observa en la en esta figura, hubo dos mezclas de mortero que debían alcanzar el f_c nominal de tres días de 20 MPa como se define en el tipo de cemento CPC 30 R.

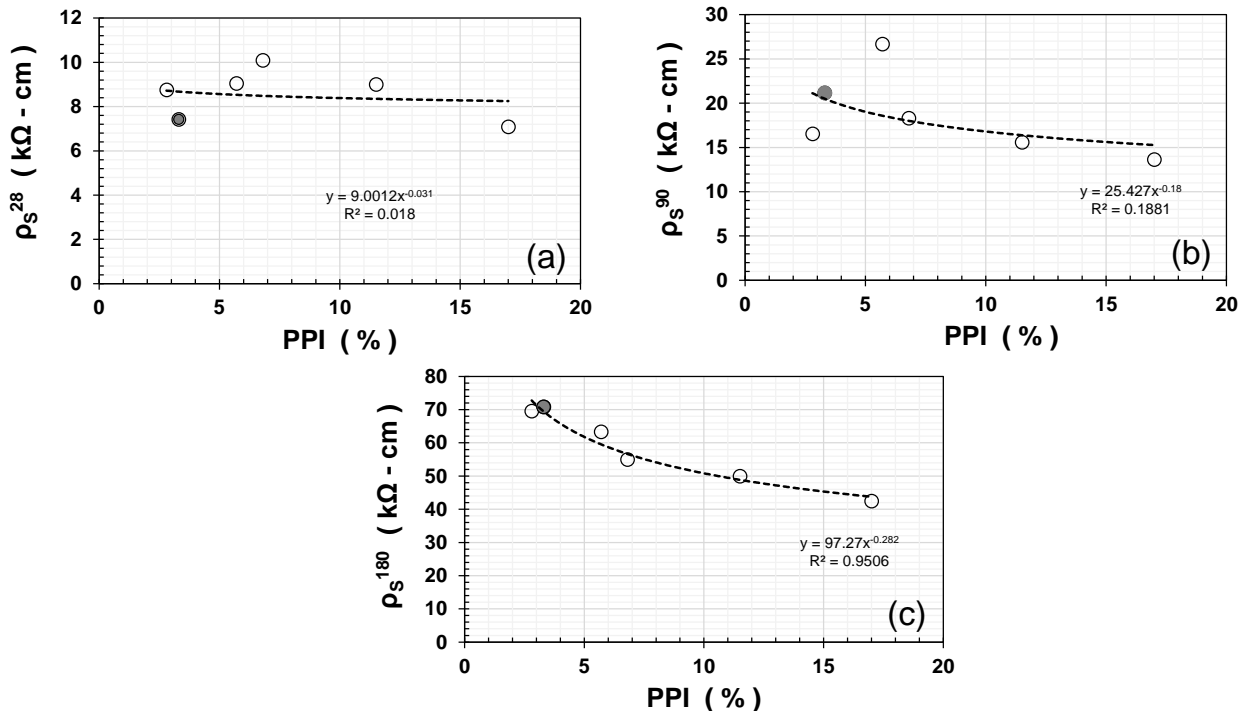


Figura 7. Correlación entre ρ_s vs PPI de los morteros evaluados a las edades de: (a) 28 días; (b) 90 días; y (c) 180 días.

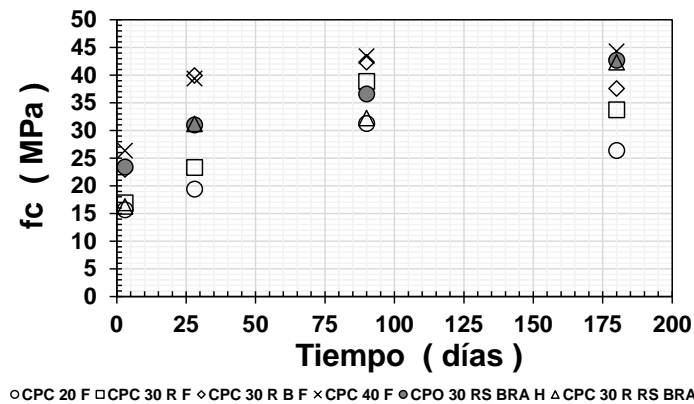


Figura 8. Valores promedio de f_c vs tiempo para los seis morteros evaluados.

Como se observa en la Figura 8, los valores de f_c para los seis tipos de cemento variaron a lo largo de las fechas de prueba. Para los resultados de f_c a 28 días se observó que tres mezclas no cumplieron su resistencia nominal: CPC 20 (19.403 MPa); CPC 30 R (23.327 MPa) y CPC 40 (39.38 MPa). Sin embargo, para los 90 días de edad ya todos los tipos de cemento habían cumplido su resistencia nominal.

Los valores de f_c a los 180 días aumentaron significativamente para dos tipos de cemento (CPO 30 RS BRA y CPC 30 R RS BRA), este aumento representó un aumento del 37% respecto a la edad de 28 días. Mientras que dos tipos de cemento redujeron a 180 días en dos tipos de cemento (CPC 20 y CPC 30 R) respecto a su resistencia a 90 días. Esto aparentemente se debe a que algunos cubos presentaban grietas superficiales formadas, aparentemente, por estar expuestas a los agentes químicos ambientales por estar expuestas directamente a la intemperie.

Con los resultados obtenidos de f_c se generaron gráficas correlacionando estos valores con respecto a la PPI del cemento. La Figura 9 muestra las gráficas obtenidas con los resultados de f_c a 28, 90 y 180 días. Como se observa en esta figura, se encontró una correlación muy buena entre la PPI del cemento y el f_c en las tres edades, sin embargo, la mejor correlación se obtuvo para los datos a los 180 días.

Se observa que las correlaciones entre f_c y PPI a edades de 28 y 90 días son bajas, lo que implica que el comportamiento mecánico de los morteros no podría pronosticarse con base solo a la PPI del cemento. Alguna otra acción deberá considerarse para que solo el estimado de la PPI del cemento ayude a diseñar morteros por su resistencia a estas edades. Sin embargo, la correlación de f_c del mortero con la PPI del cemento mejoró a la edad de 180 días ($R^2=0.7488$) por lo que la hidratación de los compuestos del clínker o las puzolanas que puedan tener estos cementos, aparentemente finalizaron sus reacciones y por ello se obtuvo una mejor correlación con respecto al PPI del cemento.

Esta correlación corrobora el efecto de la cantidad de agua que se debe añadir al mortero para que alcance una fluidez normal: a mayor PPI, o sea a mayor cantidad de caliza en el cemento, su desempeño mecánico se reduce. Esto a su vez generaría la necesidad de reducir la relación a/c del mortero para cementos con alta PPI para que éstos alcancen valores de f_c similares a los obtenidos con cementos de baja PPI.

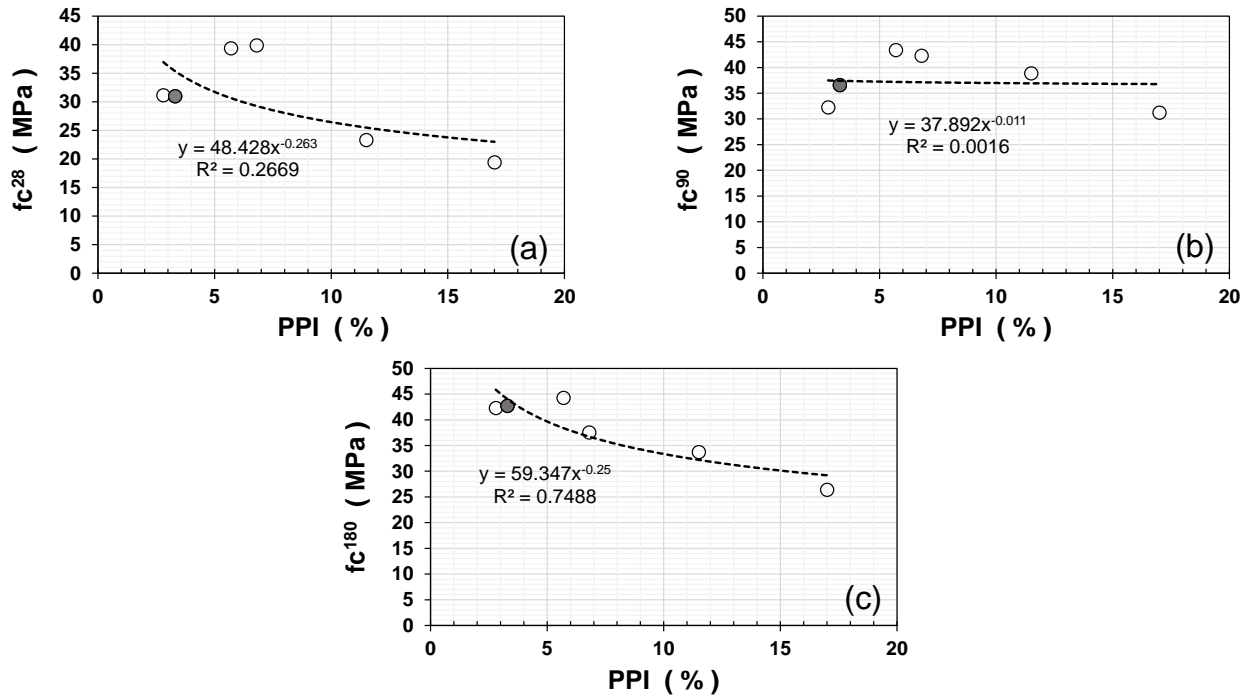


Figura 9. Correlación entre f_c vs PPI de los morteros evaluados a las edades de: (a) 28 días; (b) 90 días; y (c) 180 días.

Esta reducción en la relación a/c para alcanzar valores similares de f_c si se utilizan cementos adicionados con altos contenidos de caliza inerte (>10%), implica (como ya se explicó en la sección anterior de la propiedad física p_s) incluir a la mezcla una adición reductora de agua y/o incrementar el contenido del cemento (que implicaría incluir también un aditivo químico reductor de agua para no aumentar el agua), reduciendo así la sustentabilidad del material final que es el mortero o el concreto.

La última propiedad evaluada con los morteros fue el cambio de pH (químico) del material debido a la carbonatación de éste por exposición directa al medio ambiente urbano. Por obvias razones, solo se determinó la profundidad de carbonatación (x_{CO_2}) en los cubos a 180 y 365 días de exposición natural al ambiente urbano, externo al laboratorio. Esto porque a las otras edades de las pruebas destructivas (3, 28 y 90 días), los cubos se sacaban de las tinas de curado evitándose la carbonatación de los morteros por estar sumergidos en agua.

En este trabajo se presenta solo los valores a 180 días, ya que no se ha cumplido la edad de 365 días y se presentará en un futuro cercano cuando se obtengan los resultados. A la edad de 180 días los cubos de mortero se rompieron con un martillo después de realizar las pruebas de f_c . Rotos los cubos se rociaron con fenolftaleína y se registraron y promediaron los valores de x_{CO_2} (promedio de al menos siete mediciones por cubo). Los resultados se presentan a manera de gráfica en función de la PPI del cemento en la Figura 10.

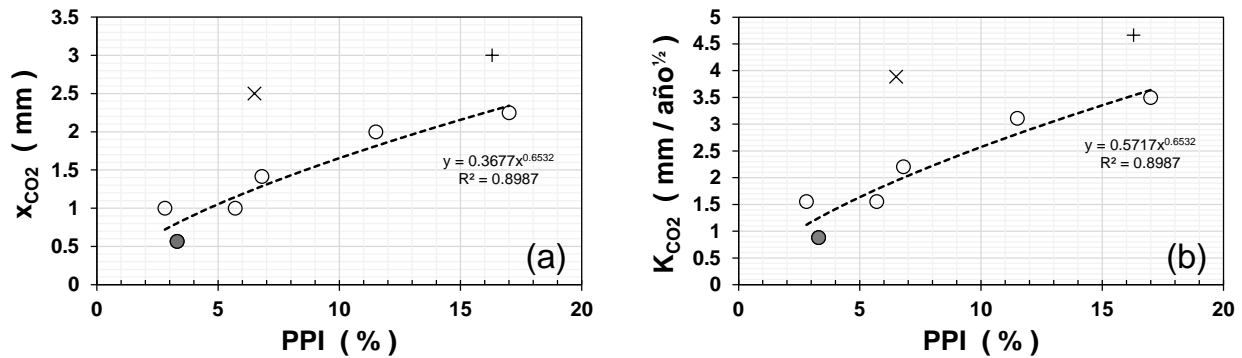


Figura 10. Resultados de la profundidad de carbonatación (a) y velocidad de carbonatación (b) en función de la PPI del cemento evaluado.

Como se observa en la Figura 10, los valores promedio de x_{CO_2} a 180 días para todas las mezclas de mortero evaluadas presentaron una muy buena correlación con respecto a la PPI del cemento: los valores de x_{CO_2} obtenidos en promedio fueron directamente proporcionales por la PPI del cemento, cuanto mayor es la PPI del cemento, mayor es el valor de x_{CO_2} obtenido debido a dicha exposición natural por ~ 150 días.

Al igual que la caracterización física y mecánica de los morteros evaluados, se puede observar que a mayor la PPI del cemento, el desempeño del mortero se reduce, siendo este caso el desempeño por durabilidad de este material. Esto se debe a que la reducción del clínker del cemento por materiales de menor alcalinidad (como es el caso de la caliza inerte o cualquier tipo de puzolana natural o artificial), reduce los componentes alcalinos que están presentes en el clínker. De esta manera, las nuevas formulaciones de cementos Portland permiten que exista menos contenidos de estos productos alcalinos, por lo que la velocidad de reacción del CO_2 con éstos es más rápida y la carbonatación se acelera.

4. CONCLUSIONES

Con la información experimental obtenida en la presente investigación se obtienen las siguientes conclusiones:

Como polvo de cemento en los CPCs será necesario registrar tres propiedades de este material para caracterizarlo: densidad (ρ), pérdida por ignición (PPI) y finura o blaine (F). Estos registros deberán de anunciarse obligatoriamente en las fichas técnicas de este tipo de material cementante. De preferencia, deberían los productores anunciar los contenidos de clínker, materiales cementosos y rellenos inertes de caliza en sus cementos. Se observa que a mayor PPI del cemento se tendrá una menor ρ y una mayor F en el mismo, por lo que si se necesita controlar la calidad de los cementos la PPI se podría utilizar como parámetro de aceptación o rechazo.

Como pasta de cemento, los CPCs con mayor PPI (mayor contenido de relleno inerte de caliza) necesitarán mayor cantidad de agua para obtener una consistencia normal en comparación con CPCs de menor valor de PPI. También se observa que las pastas de cemento producidos con CPCs de mayor PPI tienen tiempos de fraguado inicial y final más cortos que aquellos con menores valores de PPI. Igualmente, se encontró que la técnica para determinar la blancura de una pasta de cemento, utilizando un colorimetría, puede aproximar los valores de PPI y, a su vez, los contenidos de caliza en un CPC.

Como mortero, los CPCs con mayor PPI también necesitarán mayor contenido de agua para obtener una fluidez normal. Este aumento en el agua de mezclado redujo el desempeño de los morteros tanto en sus propiedades físicas (resistividad eléctrica), mecánicas (resistencia a la compresión) y químicas (velocidad de carbonatación). A mayor PPI en los CPCs: se redujo la resistividad eléctrica saturada, la cual es una medida de la interconectividad de los poros en el material; se redujo la resistencia a la compresión a las edades evaluadas (3, 28, 90 y 180 días) siendo que los valores a 180 días de edad se redujeron hasta un 20% por microfisuración de los cubos al estar expuestos por ~150 días en ambiente natural fuera de la tina de curado; se aumentó la profundidad y la velocidad de carbonatación después de ~150 días de exposición natural.

Con todo lo anterior se recomienda que los fabricantes de concreto premezclado, constructores y diseñadores deban de conocer mejor los cementos que usarán en sus proyectos, definiendo cada uno los valores de PPI que deberán cumplir los cementos que adquirirán para sus proyectos. De esta manera se controlará el desempeño mecánico y por durabilidad de sus materiales de construcción donde esos cementos serán utilizados.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo recibido por parte del Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Campus Querétaro por las facilidades brindadas para la generación de este documento y la presentación de éste en el evento al que se participó.

6. REFERENCIAS

NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), CdMx, México.

A.A. Torres-Acosta y M. Martínez Madrid (2001). “Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad,” Publicaciones Técnicas IMT, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México.

A.A. Torres Acosta (2022). “¿Por qué la infraestructura vial de concreto en el país sufre daño en tan pocos años?,” Vías Terrestres, Número 78, Año 13, julio-agosto, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 23-31.

A.A. Torres Acosta, R.A. Méndez Páramo y E.S. Herrera Sosa. (2023). “Evidencias en el desarrollo de resistencia a la compresión y contracción plástica de concretos fabricados con cemento portland compuesto (CPC),” Vías Terrestres, Número 86, Año 16, noviembre-diciembre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 17-22.

A.A. Torres Acosta, R.A. Méndez Páramo y E.S. Herrera Sosa. (2024). “Desempeño de concretos fabricados con cementos portland compuestos, CPC: Evidencias de su durabilidad en ambientes marino, urbano o industrial,” Vías Terrestres, Número 87, Año 16, enero-febrero, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 9-15.

A.A. Torres Acosta (2024). “Efecto de las contracciones por secado y por carbonatación en estructuras de concreto en servicio,” Congreso Nacional del ALCONPAT México, Oaxaca, Oaxaca, septiembre.



A.A. Torres Acosta (2024a). “Concrete’s mechanical performance when > 15% limestone is added in Portland cements,” ACI Materials Journal, In press.

NMX-C-152-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Densidad, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-057-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Consistencia Normal, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-056-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Finura de los Cementantes Hidráulicos (Método de Permeabilidad al Aire), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-059-ONNCCE-2017. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación del Tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método Vicat), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-144-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Requisitos para el Aparato Usado en la Determinación de la Fluidez de Morteros, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-514-ONNCCE-2019. Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-515-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Durabilidad - Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico - Especificaciones y Método de Ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-478-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Método para la Determinación de la Blancura del Cemento, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

ASTM C-596 (2023). “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement,” American Society of Testing Materials, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.





Propiedades en estado fresco y resistencia a compresión de concretos conteniendo cáscara de coco como agregado grueso

G. Gómez-Hernández¹, S. O. Ramírez-Martínez², E. López-Vázquez², M. A. Sánchez-Medina²,
M. A. Maldonado García^{3*}

*Autor de Contacto: marco.mg@itoaxaca.edu.mx

¹ Doctorante, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

² División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

³ Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

RESUMEN

El concreto es considerado uno de los materiales esenciales para el desarrollo de infraestructura civil. Sin embargo, el concreto consume grandes cantidades de agregado pétreo para su elaboración generando inconvenientes tales como la sobre explotación de bancos de material. De acuerdo con lo anterior, es necesaria la búsqueda de materiales alternos para su uso como reemplazo parcial o total de los agregados. Uno de estos materiales es la cáscara de coco, la cual tiene características físicas favorables tales como su dureza, además de estar disponible en la región sureste de México favoreciendo el desarrollo social de la región. En esta investigación se propone un tratamiento para la cáscara de coco considerando de mínima demanda energética para su uso como reemplazo parcial de la grava en el concreto. Se evaluaron distintos porcentajes de remplazo, las propiedades en estado fresco del concreto conteniendo este material y la resistencia a compresión. Se reporta que la metodología empleada puede ser fácilmente repetible para elaborar concretos ecológicos para infraestructura en zonas de desarrollo donde el recurso económico puede ser limitado.

Palabras clave: Concreto; Agregado; Cáscara de coco; Trabajabilidad del concreto; Resistencia a compresión.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el concreto ha formado parte fundamental en el área de construcción para el desarrollo de infraestructura civil que satisfaga las demandas de vivienda de la sociedad. Se ha reportado que actualmente el consumo del concreto es solamente superado por el consumo del agua (Sourabh Sharma, 2017), esto permite imaginar la basta cantidad de concreto elaborado. No obstante, la elaboración del concreto requiere del consumo de diversos materiales naturales entre ellos los agregados pétreos como la grava y la arena, causando la sobre explotación de los bancos de material (Bisht, 2022).

Considerando lo anterior, la búsqueda de nuevos materiales que puedan ser empleados en la elaboración del concreto ha atraído la atención de investigadores en todo el mundo. Existen diversas alternativas que podrían sustituir a los agregados en el concreto, esto con la finalidad de contribuir a reducir la huella ambiental que genera el consumo de este, entre dichos materiales se encuentran aquellos de desecho y/o reciclados. Una primera alternativa es reciclar el concreto usado convirtiéndolo en parte de los agregados para la producción de nuevos concretos. Entre otras alternativas se encuentra el emplear materiales de desecho agrícola como reemplazo parcial de agregados en mezclas de concreto (Tongbram, 2023). La efectividad de estos materiales dependerá de diversos factores entre ellos del tipo de mezcla de concreto, la dosificación de la mezcla de concreto y del tipo de tratamiento que se dé al material tales como molido o disgregado (Chinnu, 2021).

Entre los materiales de origen agrícola disponibles para su uso como agregado en mezclas de concreto se encuentra la cáscara de coco. Este material es un desecho disponible en la región sursureste de México y es posible colectarla en mercados locales puesto que solo una pequeña cantidad es empleada en la manufactura de artesanías. Diversos autores han reportado el uso de la cáscara de coco como agregado en mezclas de concreto indicando que estos concretos pueden ser empleados para fines estructurales, además de tener reducción de costos (Azunna y Aziz, 2019). Lo anterior debido a algunas propiedades físicas de la cáscara de coco tales como resistencia al impacto y rigidez (Tomar, 2020). Lo anterior resulta benéfico para contar con una industria de la construcción más sustentable.

Investigaciones sugieren que la cáscara de coco puede emplearse como sustituto parcial del agregado pétreo en porcentajes de hasta 15 a 20% sin afectar las propiedades mecánicas del concreto (Aziz, 2022). En general se reporta que este material es empleado en condición de saturación superficialmente seco debido a la alta demanda de agua de este material durante el proceso de mezclado (Kanoja, 2017). Finalmente, en otras investigaciones se ha publicado que no existe evidencia de descomposición biológica del agregado de cáscara de coco en el concreto después de 365 días (Gunasekaran, 2012).

2. METODOLOGÍA

El experimento consistió en sustituir parte del agregado grueso por agregado de cáscara de coco. La metodología para la obtención de la cáscara de coco consistió en probar metodologías las cuales puedan considerarse de mínima demanda energética. Por lo tanto, el primer paso consistió en secar al sol la cáscara de coco por un periodo de 1 a 2 semanas dependiendo de las condiciones climáticas. El siguiente paso fue limpiar la cáscara con herramienta manual quitándole el material fibroso e impurezas ajenas. A continuación, se trituro la cáscara de coco manualmente utilizando un mazo



de madera hasta lograr un tamaño de partícula máximo de 19mm. Cabe mencionar que el material menor a 4.75mm fue descartado. En seguida se obtuvo la granulometría del material de cáscara de coco, posteriormente se evaluó su resistencia al desgaste mediante la prueba de abrasión en una máquina abrasión de los Ángeles y se obtuvo la absorción.

El diseño de mezclas de concreto se realizó con base en el método de volúmenes absolutos del ACI. Se diseñaron una mezcla control (MC) y tres mezclas conteniendo 10, 15 y 20% cáscara de coco (mezclas 10CS, 15CSy 20CS, respectivamente) como reemplazo parcial del agregado grueso. El proporcionamiento de mezclas puede visualizarse en la tabla 1. El diseño de mezclas se realizó por durabilidad considerando una relación agua/cemento de 0.5. Así mismo, se emplearon arena de rio, cemento Portland CPC marca Holcim Apasco y agua potable para la elaboración de las mezclas de concreto. Las mezclas fueron realizadas en una revolvedora eléctrica. Se realizó una mezcla de concreto preliminar conteniendo 10% de cáscara de coco seca observando una gran pérdida de trabajabilidad debido a la alta absorción del material. Por lo tanto, se consideró saturar el agregado de cáscara de coco durante 24 horas antes de utilizarla en la elaboración de los concretos.

Tabla 1. Proporcionamiento de mezclas de concreto

Mezcla	Cemento (kg)	Grava (kg)	Cáscara de coco (kg)	Arena (kg)	Agua (lts)
MC	408.4	875.2	0	682.9	227.7
10CS	408.4	787.7	49.6	682.9	226.1
15CS	408.4	744.2	74.4	682.9	225.1
20CS	408.4	700.7	99.3	682.9	224.4

Una vez mezclado el concreto se realizaron pruebas en estado fresco de revenimiento (ASTM C 143), contenido de aire (ASTM C 231), peso volumétrico (ASTM C 138) y temperatura. Posteriormente se elaboraron probetas cilíndricas de concreto de 10cm de diámetro por 20 cm de altura. Las probetas fueron desmoldadas transcurridas 24 horas y curadas en una solución de agua e hidróxido de calcio durante 7, 28 y 90 días. Transcurrido este tiempo, las probetas fueron ensayadas a resistencia a la compresión (3 probetas por cada edad en todas las mezclas de concreto) en una prensa hidráulica con capacidad de 200 ton marca Matest automática. Para los ensayos a compresión se emplearon cabeceadores de neopreno. Finalmente se observó el plano de falla de los cilindros de concreto y la distribución de los agregados de cáscara de coco.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 1. Apariencia física del agregado de cáscara de coco.

En la figura 1 se observa el agregado de cáscara de coco después de ser limpiado, secado, disgregado y tamizado de acuerdo con la metodología descrita. Se tienen partículas alargadas y cóncavas de diversos tamaños comprendidos entre el material retenido por el tamiz de 4.75mm y que pasa el tamiz de 19mm. Se observa una granulometría con partículas mayormente pequeñas y gruesas debido al proceso de triturado manual. Sin embargo, se cumplen con los límites de la curva de granulometría (Figura 2).

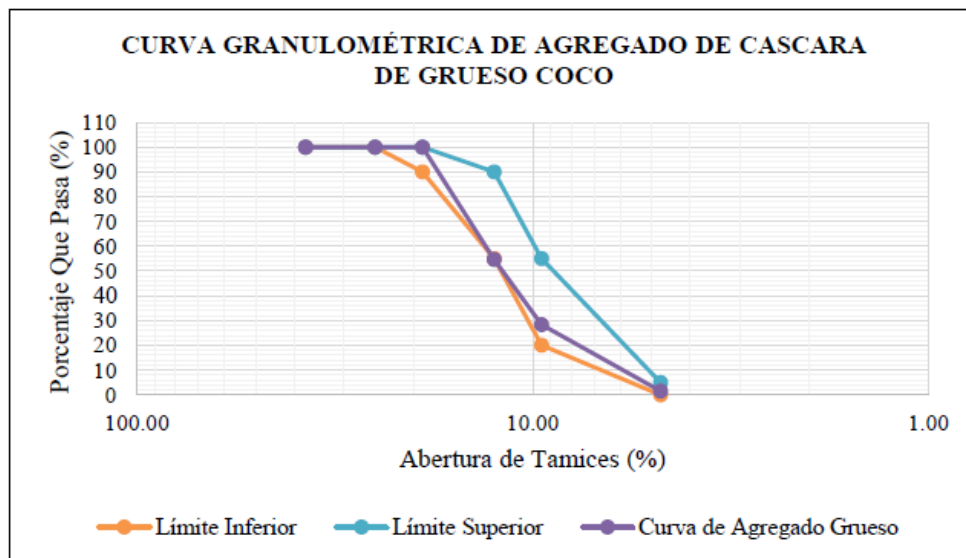


Figura 2. Curva granulométrica del agregado de cáscara de coco

La tabla 2 muestra una comparación de las propiedades físicas del agregado grueso y la cáscara de coco. Los resultados muestran que el agregado de cáscara de coco tiene un porcentaje de absorción de agua bastante elevado en comparación con la grava. Esto justifica el hecho de que la cáscara de coco deba saturarse previamente al mezclado a fin de evitar pérdida de agua de mezclado. El material en estudio tiene menor densidad y menor peso volumétrico teniendo una gran diferencia, 2.04 y 65% respectivamente, en comparación con la grava. La forma física debido a la propia naturaleza de la cáscara de coco es diferente, este material consiste en partículas alargadas con concavidades. No obstante, los resultados de resistencia al desgaste mostraron una diferencia de 22.3% al comparar el agregado grueso triturado empleado y el agregado de cáscara de coco, teniendo el menor porcentaje de desgaste este último.

Tabla 2. Propiedades físicas de la grava y de la cáscara de coco

Propiedad	Grava	Cáscara de coco
Absorción (%)	1.95	31.9
Densidad (kg/l)	3.07	1.03
Peso volumétrico (Kg)	1495	675
Forma	Angular	Alargada y cóncava
Resistencia al desgaste (%)	25	2.7

Los resultados de las pruebas en estado fresco de las mezclas de concreto se muestran en la tabla 3. Se observa que el revenimiento decremanta conforme se tiene mayor contenido de cáscara de coco. Este efecto puede atribuirse a la forma física de las partículas de cáscara de coco las cuales son alargadas mostrando concavidad. Así mismo, a pesar de que las partículas de cáscara de coco se encuentran saturadas podrían estar absorbiendo un pequeño porcentaje de agua en el momento del mezclado debido a su alto índice de absorción.

Tabla 3. Resultados de pruebas en estado fresco de concretos conteniendo cáscara de coco como reemplazo parcial de agregado grueso

Mezcla	Revenimiento (cm)	Contenido de aire (%)	Peso volumétrico (kg)	Temperatura (°C)
MC	6.5	1.80	29.778	24.5
10CS	4.0	1.85	29.224	24.7
15CS	4.0	1.90	28.936	24.4
20CS	2.5	2.10	28.664	24.5

Por otra parte, se observa que el contenido de aire de las mezclas incrementa conforme se sustituye el agregado grueso debido a que la cáscara de coco al ser un material de origen agrícola tiene poros en el sentido transversal. Se observa que el peso volumétrico del concreto disminuye conforme se tiene mayor contenido de agregado de cáscara de coco. Lo anterior se atribuye a que la cáscara de coco pesa 65% menos que el agregado grueso (ver tabla 1).

Tabla 4. Resultados promedio de pruebas de resistencia a compresión de concretos (promedio de 3 probetas por cada edad en todas las mezclas de concreto)

Mezcla	MPa		
	7 días	28 días	90 días
MC	25.91	34.82	36.91
10CS	20.05	26.24	30.94
15CS	18.06	22.88	26.62
20CS	14.35	20.35	22.52

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión se muestran en la tabla 4. Se observa que conforme incrementa la edad la resistencia a la compresión también incrementa. Los mayores incrementos se observaron entre 7 y 28 días de edad para todas las mezclas. No obstante, al comparar los resultados de resistencia a compresión de 28 y 90 días se obtuvo solamente un incremento del 6% en la mezcla MC, mientras que el incremento en las mezclas 10CS y 15CS fue considerablemente alto, teniendo 17.9% y 16.3% respectivamente. La mezcla 20CS solamente tuvo un incremento de resistencia con respecto a estas mismas edades de 10.6%.

Los resultados muestran que las mezclas que contienen cáscara de coco continuaron incrementando su resistencia a compresión, entre 28 y 90 días de edad. Estudios recientes también han reportado el incremento de la resistencia a compresión en concretos conteniendo cáscara de coco conforme se tiene mayor edad, demostrando que el agregado de cáscara de coco no se debilita o degrada una vez embebido en la matriz cementante (Azunna y Aziz, 2019).

Los resultados también mostraron que la resistencia a compresión de los concretos conteniendo cáscara de coco incrementa en mayor medida al compararlos con el concreto control de 28 a 90 días de edad. Este comportamiento es de esperarse cuando se sustituye una parte del cemento por algún material suplementario con propiedades cementantes. Sin embargo, en estos concretos no se empleó algún material suplementario al cemento. El cemento empleado en esta experimentación fue un cemento tipo CPC y se conoce que este tipo de cementos contiene alguna puzolana en su composición, lo cual se hace evidente en los resultados de la mezcla MC entre 28 y 90 días al presentar un incremento en su resistencia a compresión. Considerando lo anterior, el incremento de la resistencia a compresión en los concretos conteniendo cáscara de coco entre 28 y 90 días de edad puede atribuirse a otras causas. Entre dichas causas se pueden encontrar el hecho de que la cáscara de coco no sufra degradación estando dentro del concreto como se mencionó en el párrafo anterior (Gunasekaran, 2012, Azunna y Aziz, 2019). Lo anterior resulta de gran importancia puesto que en este caso el concreto conteniendo hasta 15% de cáscara de coco podría ser empleado para fines estructurales. Otra posible causa es que la pasta cementante penetra en los poros de la cáscara de coco y como resultado se tiene una óptima adherencia entre la cáscara y la matriz cementante del concreto llegando hasta un límite de 10% de sustitución de la grava para compensar la pérdida de resistencia (Stel'makh, 2023). No obstante, se continúa con la evaluación a edades posteriores. En los resultados de esta investigación se observa que conforme el contenido de cáscara de coco incrementa el porcentaje de incremento de resistencia a compresión de 28 a 90 días de edad disminuye. De acuerdo con la tabla 4 hasta un 10% de contenido de cáscara de coco mantiene esta tendencia.



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados experimentales se pueden escribir las siguientes conclusiones y recomendaciones:

La metodología empleada para el tratamiento de la cáscara de coco es replicable y de fácil implementación puesto que no se requiere del uso de equipo sofisticado, esto permite elaborar concretos con un material disponible en la región de manera sencilla y económicamente viable. Sin embargo, la metodología para el tratamiento de dicho material consume mayor tiempo en la elaboración de concretos.

El uso de la cáscara de coco disminuye la trabajabilidad del concreto debido a la alta absorción de la cáscara, No obstante, saturar el agregado de cáscara de coco durante 24 horas resulta benéfico al disminuir el decremento en la trabajabilidad de la mezcla de concreto en estado fresco.

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión obtenidos, se puede utilizar 10 y 15% de cáscara de coco como reemplazo del agregado grueso en mezclas de concreto. Los resultados fueron óptimos para las mezclas con 10 y 15% a 28 días de edad y con mayor incremento a 90 días, superando la resistencia de diseño. Sin embargo, se sugieren pruebas de resistencia a compresión a edades posteriores con la finalidad de descartar decremento en la resistencia del concreto ocasionado por degradación de la cáscara de coco en un medio alcalino. Así mismo pruebas de deformaciones y resistencia a la flexión a edades tempranas y tardías.

Los concretos con reemplazo de 20% de grava por cáscara de coco puede ser empleado con fines no estructurales.

5. FUTUROS TRABAJOS

Con base en el presente trabajo se tienen los siguientes trabajos de seguimiento:

- 1.- Evaluar propiedades mecánicas de deformación y flexión de concretos conteniendo cáscara de coco.
- 2.- Evaluar propiedades mecánicas (resistencia a compresión, flexión deformaciones) a edades tardías (mayores a 90 días)
- 3.- Evaluar la posible degradación de la cáscara de coco en ambientes altamente alcalinos.
- 4.- Evaluar el comportamiento térmico de concretos conteniendo cáscara de coco, esto con la finalidad de poder implementarse en muros divisorios, entre otras aplicaciones.
- 5.- Evaluar la durabilidad de concretos conteniendo cáscara de coco considerando que es un material de origen agrícola.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca por las facilidades económicas a través del proyecto 13277.21-P. Así mismo, por la beca de estudios de posgrado otorgada por parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) al estudiante Gómez-Hernández Gildardo.



7. REFERENCIAS

- Aziz W., Aslam M., Ejaz M., Ali M.J., Ahmad R., (2022), *Mechanical properties, drying shrinkage and structural performance of coconut shell lightweight concrete*, Structures 35:26-35
- Azunna U., Aziz F.N. (2019), *Characterization of lightweight cement concrete with partial replacement of coconut shell fine aggregate*. SN Applied Science 1:649.
- Bisht A. (2022), *Sand futures: Post-growth alternatives for mineral aggregate consumption and distribution in the global south*. Ecological Economics 191:107233.
- Chinnu S. N., Minnu S.N., Bahurudeen A., Senthilkumar R. (2021), *Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates*. Construction and Building Materials 287:123056.
- Gunasekaran K., Annadurai R. (2012), *Long-term study on th compressive strength and adhesión of coconut shell aggregate concrete*. Construction and Building Materials 28(1):208-215.
- Kanoja A., Jain S.K., (2027), *Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete*. Construction and Building Materials 140:150-156.
- Sourabh Sharma E. A. (2017), *A review on using coconut shell as coarse in concrete*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering 6(10): 1651-1658.
- Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Shcherban E.M., Mailyan L.R., Meskhi B., Shilov A.A., El'shaeva D., Chernil'nik A., Kurilove S. (2023), *Alteration of structure and characteristics of concrete with coconut shell as a substitution of a part of coarse aggregate*. Materials 16:4422.
- Tomar R. Kishore K. Parihar H.S., Gupta N., (2020), *A comprehensive study of waste coconut shell aggregate as raw material in concrete*, Materials Today: Proceedings 44:437-443
- Tongbram B. D., Singh H. K., Devi V. V. (2023), *A comparative study on partial replacement of coarse aggregates in concrete with sustainable waste materials*. Materials Today: Proceedings, In Press.





Basalto como cementante en la elaboración de concreto

A. A. Morales Cervantes¹, F. J. Olguin Coca¹, A. L. López León²,
I. E. Castañeda Robles¹, F. Almeraya Calderon³, L. D. López León^{1*}

*Autor de Contacto: luis_lopez@uaeh.edu.mx

¹ Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Pachuca de Soto CP 42082, Hidalgo, México.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro No.450 Nte. Col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

³ Universidad Autónoma de Nuevo León, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA), FIME, San Nicolás de los Garza 66455, México.

RESUMEN

El reutilizar el basalto como sustituto del cemento en concreto es el tema de este estudio, evaluando su viabilidad utilizando parámetros de resistencia a la compresión y tracción indirecta. La caracterización del basalto por SEM/EDS reveló altos contenidos de Si y Ca, similares a la composición del cemento. Se diseñó una mezcla para $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$ con basalto reemplazando el cemento en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20%. Los ensayos de compresión y tracción indirecta mostraron que hasta un 10% de basalto reduce la resistencia solo en un 13% comparado con concreto convencional. Sin embargo, con más del 15% de basalto como sustituto de cemento, la resistencia disminuye significativamente. El basalto en mayores proporciones altera la cohesión y adhesión entre las partículas de cemento y los agregados, resultando en una microestructura más susceptible a microfisuras. Este estudio busca fomentar la sostenibilidad explorando materiales alternativos y reduciendo el consumo de cemento, promoviendo prácticas más ecológicas en la construcción.

Palabras clave: Concreto; Basalto; Resistencia a la compresión; Tracción indirecta.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción, como motor clave del desarrollo económico, se enfrenta a la imperativa necesidad de adoptar prácticas sostenibles y eficientes que minimicen su impacto ambiental (Bian et al., 2023). En este contexto, la investigación y aplicación de tecnologías innovadoras para la producción de concreto se erigen como elementos cruciales. Uno de los enfoques más prometedores en este ámbito es la utilización de residuos mineros en la elaboración de concretos, una práctica que no solo busca mitigar la acumulación de desechos industriales, sino también mejorar la sostenibilidad de la construcción.

La utilización de residuos mineros en la producción de concreto constituye un campo de estudio que ha ganado atención en los últimos años. La incorporación de residuos industriales en la producción de concreto no solo responde a la necesidad de reducir la huella de carbono de la construcción, sino que también puede conducir a soluciones económicamente viables para la gestión de desechos (Uddin, et al., 2021). La investigación continua sobre la viabilidad técnica y ambiental de la incorporación de residuos mineros en la elaboración de concreto es esencial para el avance hacia prácticas más sostenibles en la industria de la construcción (Ou, et al., 2023).

En este contexto, la presente investigación se centra en los "Concretos Elaborados con Residuos Mineros", con énfasis en el material extraído de basaltos en el municipio de Zempoala, Hidalgo, México. La elección de este enfoque no solo responde a la necesidad de gestionar eficientemente los residuos mineros locales, sino que también busca contribuir al cuerpo de conocimientos sobre la aplicabilidad y ventajas de incorporar estos residuos en la producción de concreto en el ámbito regional y más allá.

La revisión de la literatura revela que, si bien existen estudios que abordan la incorporación de residuos industriales en el concreto, aún queda mucho por descubrir en términos de las propiedades físicas, químicas y mecánicas específicas que los residuos mineros de basalto pueden aportar a la formulación de concretos (Khan & McNally, 2023). Esta investigación aspira a llenar este vacío, proporcionando una evaluación exhaustiva de la viabilidad técnica de los concretos elaborados con residuos mineros en la región de Zempoala, Hidalgo.

La industria de la construcción, en su continuo desarrollo, enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos naturales. La presente investigación se enfoca en la elaboración de concreto utilizando residuos de basalto extraídos en el municipio de Zempoala, Hidalgo, México. Este tema adquiere relevancia en el contexto de la creciente conciencia ambiental y la necesidad de encontrar soluciones innovadoras para reducir la huella ecológica de la construcción. En síntesis, la presente investigación se presenta como una contribución significativa al campo de la construcción sostenible, al explorar y validar la aplicación práctica de los residuos mineros de basalto en la producción de concreto, promoviendo así un enfoque más eficiente y eco amigable en la industria de la construcción (Al Shouny, et al., 2023).

1.1 Problemática

En el municipio de Zempoala, Hidalgo, México, se ha generado una problemática ambiental y económica debido a la gestión ineficiente de los desechos mineros de basalto. Se requiere una acción inmediata para solucionar esta situación. Aunque la extracción de basalto produce una gran cantidad de desechos, la falta de uso de estos en la fabricación de concreto ha causado un problema de acumulación de desechos. Este desecho minero, que podría ser considerado un recurso valioso, se desaprovecha y, en lugar de ser reincorporado de manera sostenible en la cadena de producción,



termina contribuyendo a la degradación ambiental y al agotamiento de los recursos naturales.

La falta de una estrategia integral para la gestión de estos desechos es un factor importante que impide no solo la optimización de los recursos, sino también la creación de oportunidades económicas locales a través de la reutilización y reciclaje de estos (García, 2019). Además, la gestión tradicional de los desechos mineros implica costos significativos para el transporte y la disposición final, lo que resulta en una carga financiera para las compañías extractoras y la comunidad en general (Martínez, 2018).

Desde una perspectiva más amplia, la falta de investigación y aplicación de los desechos de la minería del basalto en la producción de concreto es una oportunidad perdida para avanzar hacia prácticas de construcción más sostenibles (Hernández, 2020). El uso de enfoques innovadores y sostenibles en la producción de materiales esenciales como el concreto podría beneficiar significativamente a la industria de la construcción, conocida por su intensivo consumo de recursos naturales y su importante contribución a las emisiones de carbono (Ji, et al., 2024).

La urgencia de abordar la gestión de los desechos mineros de basalto desde una perspectiva integral y sostenible surge como una preocupación importante (Malhotra, 2002). La acumulación de desechos continúa como resultado de la falta de uso de estos desechos en la producción de concreto (Noh, et al, 2024). Además, impide aprovechar una oportunidad estratégica para mejorar la sostenibilidad ambiental, reducir los costos para las empresas locales y avanzar hacia una construcción más ecológica (Pérez, 2017). La investigación actual se presenta como un esfuerzo necesario para comprender y abordar esta problemática, proponiendo soluciones que no solo disminuyan los efectos ambientales, sino que también fomenten el crecimiento económico local y fomenten prácticas más responsables en la industria de la construcción.

2. METODOLOGÍA

En este apartado se detalla la metodología empleada en el estudio de la elaboración de concreto utilizando residuos de basalto como material en la mezcla de concreto. Se abordan aspectos como el diseño de la mezcla, la elaboración de los especímenes, el curado y la evaluación de propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y tracción indirecta. Además, se realiza una caracterización del basalto utilizado, proporcionando una base sólida para comprender su influencia en las propiedades del concreto resultante. Se aborda el aprovechamiento del Basalto como material de construcción mediante la adición en la mezcla de concreto. Debido a sus características fisicoquímicas, el basalto actuará como sustituto del cemento en una proporción de: 5 %, 10%, 15% y 20%.

Para la realización de los ensayos de compresión y tracción indirecta se construyeron cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para los ensayos de compresión, cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para los ensayos de tracción indirecta por cuadruplicado para cada sistema en estudio. Los especímenes se elaboraron con base a la normativa (ASTM C31, 2001): “Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra”, siguiendo los procedimientos establecidos. Para la determinación de la resistencia del concreto, la norma (ASTM C31, 2001) formula procedimientos para las pruebas de curado; las probetas se sometieron a ensayos de acuerdo con la normativa (ASTM C39M-16b, 2017), “Método Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”.

Para la determinación de las características físicas y químicas del Basalto, fue necesario realizar



un muestreo sobre el banco de extracción de material pétreo, se analizó material de desecho tomando muestras significativas de la mina.

2.1 Caracterización química del basalto

Para la caracterización química del banco de material se realizó Microscopía Electrónica de barrido con microanálisis por dispersión de energía de Rayos X (SEM-EDS) esto se utilizó para realizar el estudio de morfología de las partículas del Basalto (ver figura 2.1), así como el estudio del microanálisis con el objeto de determinar la naturaleza del material estudiado tabla 1. Se utilizó SEM, marca Oxford instruments, modelo AZteclite, equipado con EDS.

Tabla 1. Composición química del basalto

Elemento	Wt%
O	47.44
Na	3.90
Mg	0.90
Al	9.31
Si	29.60
K	1.51
Ca	3.93
Fe	3.41
Total	100

En la figura 1 por SEM - EDS, se observa la presencia de elementos mayoritarios de silicio, aluminio, calcio, hierro; como elementos minoritarios: potasio y magnesio.

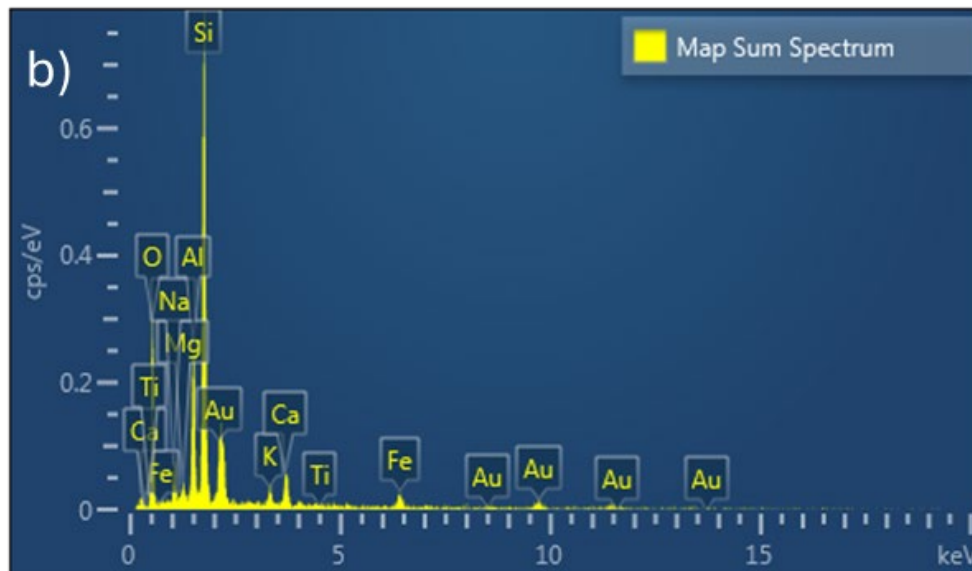
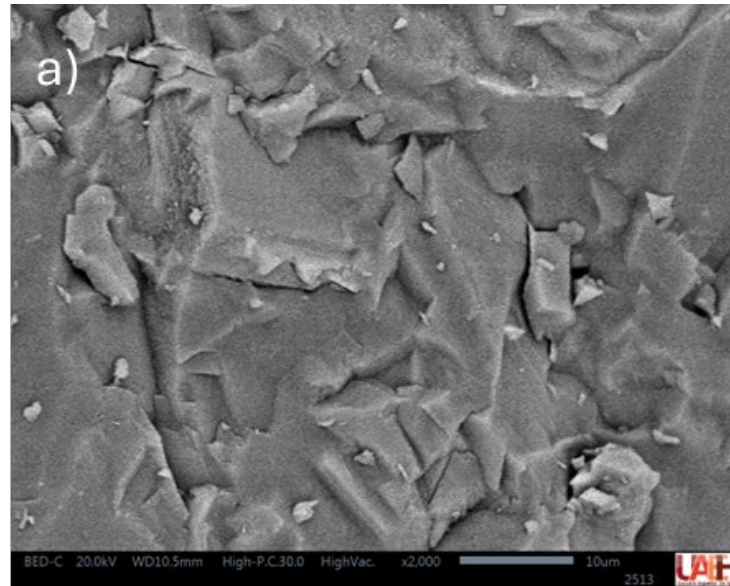


Figura 1: Microfotografía del basalto: a) Imagen general SEM, b) resultado del microanálisis general SEM-EDS.

Procedimiento pulverización del basalto

- Se selecciono y preparo las muestras de basalto, asegurando de que estén secas y limpias. Luego, pesamos 5 Kg de basalto, y lo colocamos en el cilindro de la máquina de abrasión de los Ángeles.
- A continuación, se añade las 12 esferas de acero abrasivas, junto con el basalto al contenedor de la máquina.
- Se configuró la máquina para realizar un número específico de revoluciones, en este caso 2500 ciclos por hora. Durante este tiempo, la fricción y el impacto entre las esferas de acero y el basalto triturarán el material.
- Una vez que la máquina ha completado el número de ciclos. Se retira el contenido, incluyendo el material pulverizado y las esferas de acero, y se coloca en una bandeja para su recolección.

- El siguiente paso es utilizar la malla de tamizado número 200 para separar las partículas finas. Se coloca el material pulverizado en el tamiz con una tamizadora mecánica. Recolectamos el material que pasa a través de la malla en un recipiente limpio. Este material representa el polvo de basalto fino que hemos pulverizado para uso como sustituto de cemento.

2.2 Elaboración de especímenes de concreto

Una vez definida la composición de la mezcla, se procede a la elaboración de los especímenes de concreto. Este proceso implica la preparación cuidadosa de muestras representativas, siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados experimentales.

Los especímenes de concreto se elaboraron con un diseño de mezcla de media sollicitación, correspondiente a una resistencia de 200 Kg/cm²; la cual es utilizada para construir edificaciones de poca altura. Para la obtención de la mezcla de concreto, diseñada por el método de peso (ACI 211.1-91, 2002). “Práctica Estándar para Seleccionar el Proporcionamiento de Concreto de Peso Normal, Pesado y Masivo”, se eligió para la realización de los especímenes debido a ser un método de diseño empírico – mecanicista, donde la mayoría de sus datos son parámetros conocidos, hay una mejor reproducibilidad de la mezcla.

2.2.1 Diseño de mezcla

El diseño de la mezcla se realizó bajo las siguientes consideraciones. Para el diseño se utilizó el software libre (Concrete Mix Design, 2024) con los siguientes parámetros (tabla 2).

Tabla 2: Diseño de mezcla de concreto

Parámetro	
Revenimiento (mm)	75 máximo
	25 mínimo
Tamaño máximo agregado (mm)	19
Cantidad de agua de mezcla (kg/m ³) de acuerdo con el tamaño máximo de agregado	205
Porcentaje de aire en mezcla sin entrada de aire	2
Relación agua cemento de acuerdo con la resistencia a la compresión	0.69
Módulo de finura agregado fino	2.8
Porcentaje de absorción de agregado grueso	1.5
Porcentaje de absorción de agregado fino	5

Como se mencionó anteriormente, se elaboraron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para la prueba de compresión y cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para el ensayo de tracción indirecta; el residuo de mina (basalto) se utilizó como sustituto de cemento pasando por la malla N° 200 (0.074 mm) con una dosificación de: 5%, 10%, 15% y 20% (Tabla 3), en sustitución del cemento portland compuesto.

Tabla 3: Dosificación de concreto con basalto como sustituto de cemento

Sistema	Agua Kg/m ³	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Basalto Kg/m ³	Relación A/C
0%	260.26	297.1	1054	788.9	0	0.69
5%	260.26	282.25	1054	788.9	14.85	0.69
10%	260.26	267.39	1054	788.9	29.71	0.69
15%	260.26	252.53	1054	788.9	44.56	0.69
20%	260.26	238.88	1054	788.9	58.22	0.69

Procedimiento para elaboración de la mezcla

Para la elaboración de la mezcla se siguió el procedimiento que establece la Norma Mexicana (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), que se describe a continuación.

- Inicialmente, se procedió a medir los materiales, tanto la arena como la grava, en conformidad con el diseño de la mezcla establecido.
- Seguidamente, se procedió a preparar la cantidad necesaria de agua según lo indicado en el diseño de la mezcla.
- Los agregados, tanto la arena como la grava, fueron esparcidos sobre una superficie de acero de manera uniforme.
- Posteriormente, se fragmentaron los agregados y la pasta (compuesta por cemento y basalto), mezclándolos en un proceso que se desarrolló desde el exterior hacia el interior, formando una pila con una disposición similar a la de un volcán.
- De manera gradual, se incorporó el agua a la mezcla seca, mezclando con palas desde el exterior hacia el interior, en la región donde se añadió el agua, hasta alcanzar una consistencia homogénea.
- Finalmente, el contenido de la mezcla se vertió siguiendo el procedimiento especificado para la elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.

2.2.2 Curado de los cilindros de concreto

El curado adecuado de los cilindros de concreto es esencial para maximizar su resistencia y durabilidad. Se implementan técnicas específicas de curado, adaptadas a las características particulares de los materiales utilizados, con el fin de optimizar el proceso de endurecimiento y minimizar la aparición de posibles defectos.

- Se desmoldaron las muestras de concreto después de un tiempo mínimo de 24 horas, siguiendo las recomendaciones de la normativa (ASTM C31/C31M, 2001).
- Se sumergieron inmediatamente las muestras en agua a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ según lo establecido por la normativa (ASTM C192/C192M, 2014).
- Se mantuvieron las muestras de concreto sumergidas en agua durante un período de 28 días, cumpliendo con los requisitos de la normativa (ASTM C192/C192M, 2014).

2.2.3 Ensayo de compresión de los especímenes de concreto

Para las pruebas de compresión de cada cilindro se realizó el ensayo de acuerdo con las especificaciones de la normativa (ASTM C39/C39M, 2018). Aplicar una carga axial gradual y continua a cada cilindro a una velocidad prescrita hasta que se alcance la falla, registrando la carga máxima aplicada. Registrar la resistencia a la compresión máxima alcanzada por cada cilindro. Por último, se compara los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los distintos sistemas en estudio.

2.2.4 Ensayo de tracción indirecta con uso de la celda brasileña.

Para evaluar la resistencia a la tracción indirecta de los especímenes de concreto, se llevó a cabo el ensayo con ayuda de una celda brasileña (ver figura 2), conforme a las especificaciones de la normativa (ASTM C496/C496M, 2017). Este método implica la aplicación de una carga axial gradual y continua a cada muestra a una velocidad prescrita, hasta que se observe la falla por tensión diagonal. Durante el ensayo, se registró la carga máxima aplicada justo antes de la falla, así como la resistencia máxima a la tracción indirecta alcanzada por cada espécimen.



Figura 2: Celda brasileña para ensayo de tracción indirecta

3. RESULTADOS

3.1 Prueba de resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo utilizando una prensa de compresión de cilindros de concreto marca Controls, modelo 50-C43C04, conforme a la normativa (NMX-C-083-ONNCCE, 2003). Los ensayos se realizaron 28 días después del curado por inmersión de los especímenes, asegurando así que el concreto alcanzara su resistencia máxima según los estándares establecidos.

Los resultados de los ensayos de compresión revelaron una disminución en la resistencia a la compresión con la adición de basalto como sustituto parcial del cemento figura 3. En concreto, la incorporación de hasta un 10% de basalto resultó en una reducción del 15% en la resistencia a la compresión en comparación con el concreto convencional sin adiciones de basalto, como se muestra en la Tabla 4.

Por otro lado, los especímenes con sustituciones de basalto del 15% y 20% mostraron una disminución aún más significativa en la resistencia a la compresión. Estos resultados indican que hay un límite en la cantidad de basalto que puede ser añadido sin comprometer la integridad estructural del concreto (Tam & Tam, 2019).

La adición de basalto al concreto como sustituto parcial del cemento influye notablemente en la resistencia a la compresión del material. La reducción observada en la resistencia a la compresión con un 15 y 20 % de basalto puede deberse a varios factores. Uno de ellos es la posible alteración de la matriz de cemento, donde el basalto no se hidrata de la misma manera que el cemento, afectando la cohesión y la integridad estructural del concreto. Esto sugiere que la estructura interna

del concreto se ve comprometida a medida que aumenta la cantidad de basalto, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica. En comparación con el concreto convencional, los especímenes con basalto muestran que, aunque el basalto puede actuar como un sustituto parcial del cemento, su efectividad está limitada por la cantidad utilizada. Los resultados sugieren que hay un umbral crítico en la sustitución de cemento por basalto, más allá del cual la resistencia del concreto disminuye significativamente. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para el diseño de mezclas de concreto. La reducción de la resistencia a la compresión con la adición de basalto debe ser cuidadosamente considerada en aplicaciones estructurales donde esta propiedad es crítica. Aunque el uso de basalto puede ofrecer ventajas en términos de costos y sostenibilidad, su impacto en la resistencia mecánica del concreto limita su utilización a porcentajes relativamente bajos.

Tabla 4: Parámetros de resistencia a la compresión de concreto con basalto como sustituto de cemento

Sistema	Especímen 1 (kg/cm ²)	Especímen 2 (kg/cm ²)	Especímen 3 (kg/cm ²)	Especímen 4 (kg/cm ²)
0 %	222.74	220.20	190.32	219.22
5 %	209.76	213.18	212.30	211.98
10 %	190.91	189.58	185.19	187.77
15 %	120.77	111.43	111.43	113.10
20 %	85.19	79.45	92.25	86.03

3.2 Ensayo de tracción indirecta con uso de la celda brasileña

Las pruebas de resistencia a la tracción indirecta se llevaron a cabo utilizando una celda brasileña conforme a la normativa (ASTM C496/C496M, 2017) y una prensa de compresión de cilindros de concreto marca Controls, modelo 50-C43C04. Este método de ensayo se aplicó a los cilindros de concreto después de 28 días de curado, garantizando así que el concreto alcanzara su resistencia máxima de acuerdo con los estándares establecidos.

Para cada prueba, los especímenes cilíndricos fueron colocados en la celda brasileña y sometidos a una carga gradual y continua hasta alcanzar la falla. Se registró la carga máxima aplicada en el momento de la falla, así como la resistencia máxima a la tracción indirecta obtenida para cada espécimen.

Los resultados del ensayo de tracción indirecta mostraron variaciones en la resistencia según la cantidad de basalto añadido como sustituto parcial del cemento. La incorporación hasta un 10% de basalto como sustituto de cemento resultó en una disminución del 12% en la resistencia a la tracción indirecta en comparación con el concreto convencional, como se muestra en la Tabla 5.

Por otro lado, los especímenes con sustituciones de basalto del 15% y 20% presentaron una disminución más pronunciada en la resistencia a la tracción indirecta. Estos resultados sugieren que hay un límite en la cantidad de basalto que puede añadirse sin comprometer la integridad estructural del concreto.

La adición de basalto al concreto como sustituto parcial del cemento afecta notablemente la resistencia a la tracción indirecta del material. La reducción observada con un 15% y 20% de basalto podría deberse a varios factores. Uno de ellos es la posible alteración de la matriz de cemento, donde el basalto no se comporta de la misma manera que el cemento durante el proceso de hidratación, afectando la cohesión y la integridad estructural del concreto. Esto sugiere que la

estructura interna del concreto se ve comprometida a medida que aumenta la cantidad de basalto, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica (Vásquez, et al., 2020).

En comparación con el concreto convencional, los especímenes con basalto muestran que, aunque el basalto puede actuar como un sustituto parcial del cemento, su efectividad está limitada por la cantidad utilizada. Los resultados sugieren que hay un umbral crítico en la sustitución de cemento por basalto, más allá del cual la resistencia del concreto disminuye significativamente.

Tabla 5: Parámetros de tracción indirecta de concreto con basalto como sustituto de cemento.

Sistema	Especímen 1 (kg/cm ²)	Especímen 2 (kg/cm ²)	Especímen 3 (kg/cm ²)	Especímen 4 (kg/cm ²)
0 %	21.36	20.19	20.15	21.66
5 %	18.99	17.87	18.01	20.09
10 %	18.75	17.56	17.05	18.56
15 %	11.51	13.08	11.11	10.98
20 %	8.44	8.31	7.52	9.24

3.3 Micrografías de ruptura de concretos ensayados mecánicamente

En los especímenes elaborados con sustituciones de cemento por basalto en hasta una proporción de 10%, se revelaron la presencia de formaciones alargadas similares a bastones en la ruptura generada después de los ensayos mecánicos. Estas formaciones desaparecieron en los sistemas mayores de 15 % de sustituto de basalto (ver figura 3).

La presencia de bastones, observados en mezclas con 5% y 10% de basalto, podrían estar relacionadas con una distribución de tensiones más uniforme, lo que podría contribuir a parámetros mayores de resistencia a la compresión y tracción indirecta (Bai, et al., 2022). En contraste, las rupturas en mezclas con 15% y 20% de basalto podrían indicar una mayor fragilidad y, por tanto, una menor resistencia en los parámetros mecánicos estudiados.

Este comportamiento podría explicarse por la naturaleza del basalto y su interacción con la matriz del concreto. La presencia de basalto en mayores proporciones podría alterar la cohesión y la adhesión entre las partículas de cemento y los agregados, resultando en una microestructura más propensa a la formación de microfisuras bajo carga (Zhang, et al., 2024). Esto sugiere que la estructura interna del concreto se ve comprometida a medida que aumenta la cantidad de basalto, posiblemente debido a una menor cantidad de productos de hidratación que contribuyen a la resistencia mecánica (Yao, et al., 2024).

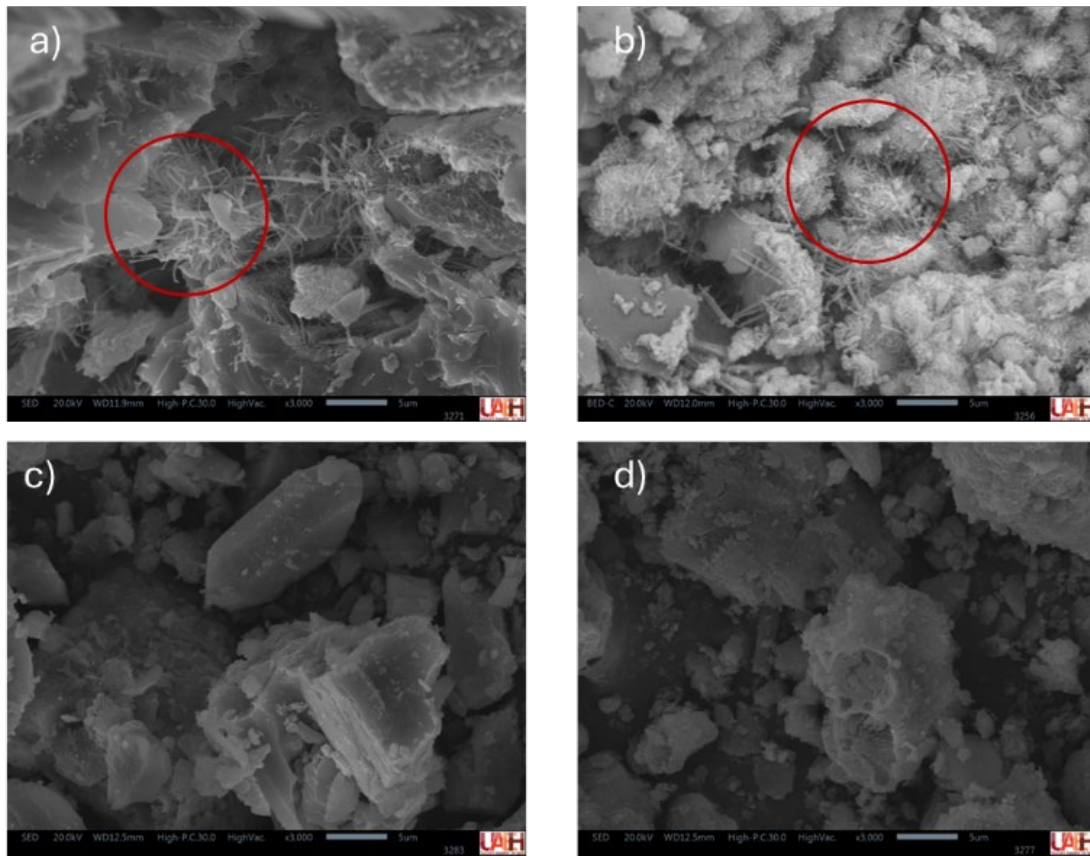


Figura 3: Micrografías de ruptura de concretos después de pruebas mecánicas. a) Ensayo de compresión del sistema 10 % de basalto, b) Ensayo de tracción del sistema 10 %, c) Ensayo de compresión del sistema 15 % de basalto, d) Ensayo de tracción del sistema 15 %, de basalto.

Estos resultados subrayan la importancia de considerar cuidadosamente la proporción de basalto utilizado como sustituto del cemento en el diseño de mezclas de concreto. Aunque el basalto puede ofrecer beneficios en términos de costos y sostenibilidad, su impacto en la resistencia a la compresión debe ser cuidadosamente evaluado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que la incorporación de basalto en proporciones de hasta un 10% como sustituto del cemento disminuye la resistencia a la compresión y tracción indirecta en solo un 14% y 12 % respectivamente en comparación con el concreto convencional. Esta reducción es manejable y puede ser aceptable para ciertas aplicaciones estructurales.

Para sustituciones superiores al 15%, se observó una disminución significativa en los parámetros mecánicos. Esto sugiere que hay un límite óptimo para la cantidad de basalto que puede ser utilizado sin comprometer la integridad estructural del concreto.

Se observaron en las micrografías formaciones alargadas similares a bastones en especímenes de concreto con sustituciones de cemento por basalto hasta un 10%, las cuales desaparecieron en sustituciones mayores al 15%. La presencia de estos bastones en mezclas con 5% y 10% de basalto podría estar relacionada con una distribución más uniforme de las tensiones, lo que contribuiría a

una mayor resistencia a la compresión y a la tracción indirecta. Por el contrario, las mezclas con 15% y 20% de basalto mostraron una mayor fragilidad, indicando una menor resistencia en los parámetros mecánicos evaluados.

Este comportamiento se explica por la interacción del basalto con la matriz del concreto, donde mayores proporciones de basalto pueden alterar la cohesión y adhesión entre las partículas de cemento y agregados, resultando en una microestructura más propensa a la formación de microfisuras bajo carga.

5. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a Jorge Martín Borbolla Delgadillo por su generosa provisión de basalto y por permitir el uso de las instalaciones de su mina, fundamentales para la realización de esta investigación. Agradecemos también a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el acceso a sus instalaciones, que fue crucial para el desarrollo de este trabajo. Su apoyo y colaboración fueron invaluable para llevar a cabo este estudio.

6. REFERENCIAS

- Al Shouny, A., Issa, U. H., Miky, Y., & Sharaky, I. A. (2023). Evaluating and selecting the best sustainable concrete mixes based on recycled waste materials. "Case Studies in Construction Materials", 19, e02382.
- American Concrete Institute. (2002). "ACI 211.1-91 Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo."
- ASTM International. (2001). "ASTM C 31/C 31M: Cast and laboratory cure two sets of two standard cylinder specimens for each composite sample."
- ASTM International. (2014). "ASTM C192: Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory."
- ASTM International. (2017). "ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens."
- ASTM International. (2018). "ASTM C33 / C33M: Standard Specification for Concrete Aggregates."
- ASTM International. (2018). "ASTM C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". West Conshohocken, PA.
- Bai, W., Shen, J., Guan, J., Wang, J., & Yuan, C. (2022). Study on compressive mechanical properties of recycled aggregate concrete with silica fume at different strain rates. "Materials Today Communications", 31, 103444.
- Bian, X., Mei, C., Wu, L., & Zhao, Z. (2023). Experimental study on synergistic treatment of dredged sludge with cement-waste concrete fine aggregate. "Construction and Building Materials", 409, 133903.
- García, A. (2019). Gestión de residuos mineros de basalto: un enfoque integral para la sostenibilidad ambiental. "Revista de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible", 12(3), 45-56.
- Hernández, J. (2020). Perspectivas de la utilización de residuos mineros en la industria de la construcción. "Revista de Ingeniería Civil y Ambiental", 35(4), 112-125.
- Ji, H., Tian, Y., Fu, C., & Ye, H. (2024). Transfer learning enables prediction of steel corrosion in concrete under natural environments. "Cement and Concrete Composites", 105488.



- Khan, M., & McNally, C. (2023). A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. "Developments in the Built Environment", 100273.
- Malhotra, V. M. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. "Concrete International", 24(7), 30-34.
- Martínez, L. (2018). Cementos especiales: propiedades y aplicaciones en México. "Revista de Ingeniería Civil", 30(2), 78-91.
- Noh, H. W., Lee, S., Cho, J. Y., & Kim, D. J. (2024). Investigating dynamic compressive strength of concrete by using high-rate hydraulic universal testing machine. "Construction and Building Materials", 411, 134402.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC. (2003). "NMX-C-083-ONNCCE-2002: Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba."
- Ou, Y. C., Joju, J., Lai, B. C., & Wang, J. C. (2023). Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint. "Engineering Structures", 288, 116186.
- Pérez, A. (2017). "Innovaciones en la industria del cemento en México". Editorial Tecnología de Materiales.
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2019). Sustainable Construction Using Recycled Materials for Pavements and Structural Concrete Constructions: Current Status and Future Research Prospects. "Resources, Conservation and Recycling", 141, 28-41.
- Uddin, M. J., Smith, K. J., & Hargis, C. W. (2021). Development of pervious oyster shell habitat (POSH) concrete for reef restoration and living shorelines. "Construction and Building Materials", 295, 123685.
- Vásquez, R. D., Julca, R. C., & Contreras, J. (2020). Resistencia a la compresión del concreto utilizado en cimentaciones de las edificaciones comunes en la ciudad de Jaén. "Revista Científica Pakamuros", 8(2).
- Yao, D., Li, J., Xiao, H., Yang, W., & Liu, R. (2024). Research on the surface abrasion resistance performance of basalt fiber reinforced concrete. "Journal of Building Engineering", 109125.
- Zhang, K., Wang, C., Zhao, Y., Bi, J., Shen, M., & Deng, X. (2024). Study on the effect of wood admixture on the physical and mechanical properties of corn cob ecological recycled concrete. "Journal of Building Engineering", 109116.



Curvas esfuerzo deformación para la obtención del módulo de elasticidad estático en núcleos de roca

M. A. Navarrete-Seras^{1*}, E. M. Alonso-Guzmán^{1,2}, W. Martínez- Molina¹,
H. L. Chávez-García¹, M. Arreola-Sánchez¹, J. A. Borrego-Pérez¹

*Autor de Contacto: mnavarrete@umich.mx

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, México

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Arquitectura, Morelia, México.

RESUMEN

En esta investigación se estudiaron rocas de canteras de material triturado, que es utilizado en los elementos estructurales en obras de ingeniería civil en la región Morelia Michoacán, México. Se obtuvieron probetas cilíndricas de aproximadamente 4.4 cm de diámetro y se realizaron pruebas físicas como absorción y densidad. Se realizaron pruebas destructivas y no destructivas las cuales fueron correlacionadas. La complejidad de estas pruebas sobre todo es obtener muestras labradas cilíndricas que permitan obtener módulos de elasticidad estáticos para la obtención de la curva esfuerzo deformación. Se encontró que las canteras de materiales triturados cumplen con la resistencia según la norma N-CMT-2-01-003/02, y se obtuvo un coeficiente de correlación aceptable entre densidad, resistividad eléctrica y módulo de elasticidad. Finalmente, los resultados sirven para clasificar las rocas trituradas y proporcionar al constructor datos referentes a pruebas físicas y mecánicas que le permitan inferir su comportamiento en la elaboración de concreto hidráulico o mezclas asfálticas.

Palabras clave: Curvas esfuerzo deformación; Módulo de elasticidad; Roca; Núcleos; Correlaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El módulo de Young es uno de los parámetros geomecánicos básicos utilizados para la definición de los fenómenos en el macizo rocoso. Se determina con base en una prueba de compresión uniaxial. Según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, se puede calcular de tres formas diferentes: módulo tangente, secante y medio (Małkowski & Ostrowski, 2017).

En general, los parámetros estáticos pueden reflejar con mayor exactitud las propiedades mecánicas de la roca sometida a geoesfuerzos reales. Al mismo tiempo, su determinación es difícil. Por lo tanto, uno de los mejores métodos es establecer la correlación entre los parámetros dinámicos y estáticos (Shen et al., 2024). Basado en lo anterior algunos investigadores han estudiado el módulo de Young o módulo de elasticidad estático de una muestra de esquisto a partir de varios métodos matemáticos de mejora de escala importantes y la comparación de los resultados con la prueba de resistencia a la compresión poliaxial y las mediciones de nanoindentación en la misma pieza (Sadeghpour et al., 2024). Por otro lado han estudiado simultáneamente las rocas de las que se deriva el agregado (basalto, granito, dolomita, cuarcita, grava) y 20 concretos ordinarios con alto rendimiento que contienen este agregado revelando los factores que afectan las propiedades de esfuerzo-deformación del concreto (Piasta et al., 2017). También existen estudios de ecuaciones de correlaciones entre los módulos elásticos estático y dinámico que son útiles para calcular el módulo elástico estático mediante técnicas no destructivas, en una amplia gama de materiales rocosos (Panchal et al., 2024).

El objetivo de esta investigación fue obtener las propiedades físico-mecánicas de la cantera de roca triturada denominada La Roka ubicada en Morelia, Michoacán, México, con la finalidad de estimar su comportamiento en la elaboración de elementos estructurales. Se realizó la prueba de módulo de elasticidad estático encontrando un aceptable coeficiente de determinación con la densidad y la resistividad eléctrica de cada una de las muestras.

2. PROCEDIMIENTO

Se seleccionaron los fragmentos de roca y fueron llevados al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”. Se labraron siete muestras cilíndricas de 4.4 cm de diámetro utilizando una extractora y una broca con punta diamante.

2.1. Densidad

El procedimiento consiste en marcar la muestra o numerarla para identificarla, se dejan saturar en el agua durante un periodo de 24 horas, después se procede a secar superficialmente y registrar su peso húmedo (W en gramos), posteriormente se procede a llenar con agua el picnómetro y se coloca dentro la muestra de roca, normalmente el volumen de agua desalojado (V en centímetros cúbicos) es medido con una probeta graduada (A. S. D18.12, 2015; Navarro et al., 2011).

2.2. Absorción

El objetivo de esta prueba es determinar el porcentaje de agua que puede absorber una muestra representativa de roca. El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a peso constante a una temperatura a $110\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante 24 horas, posteriormente se dejan enfriar para obtener su masa seca. Realizado el paso anterior se dejan saturando en un recipiente con agua durante 24



horas como mínimo. Se sacan del agua y se secan superficialmente con un lienzo o franela y se pesan para posteriormente realizar los cálculos correspondientes (A. S. D18.12, 2015; Navarro et al., 2011).

2.3. Resistencia a compresión uniaxial (UCS) y módulo de elasticidad estático (Es)

La resistencia a compresión simple o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica o cubica sin confinar en el laboratorio. La compresión requiere que la carga se distribuyera uniformemente por lo que se colocó azufre en las caras circulares de las probetas cilíndricas (Figura 1a, 1b).

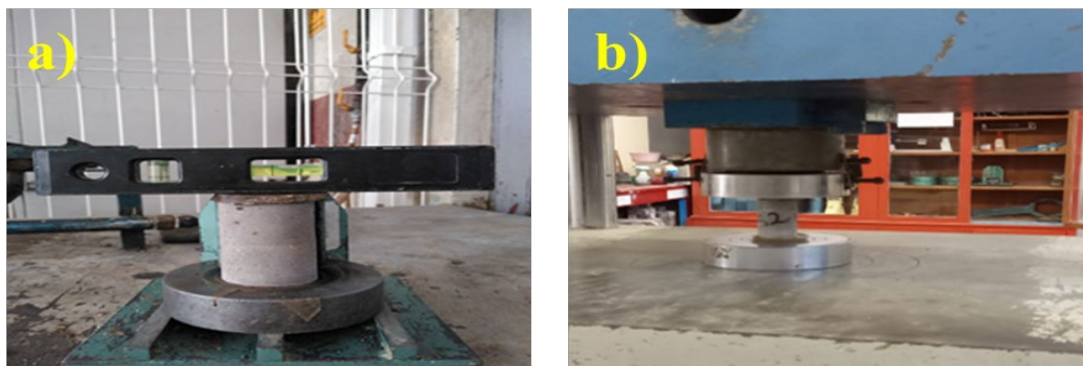


Figura 1. a) Cabeceo con azufre de las muestras cilíndricas y b) prueba de resistencia a compresión uniaxial.

Para la prueba de módulo de elasticidad estático se utilizó la máquina de pruebas Forney, deformímetro de dos anillos y dos extensómetros, micrómetro digital para deformímetro (Figura 2).



Figura 2. Probeta y micrómetro de carátula para la determinación del módulo de elasticidad estático.

Al realizar las pruebas, se siguió minuciosamente la norma ASTM D 2938 -95(2002) para obtener la resistencia a la compresión no confinada (UCS) del núcleo de roca con muestras cilíndricas, que expresa el valor en el que la muestra experimenta una pérdida total de cohesión a lo largo de la superficie de fractura (A. D18.12, 2002; Siegesmund & Dürrast, 2014).

Al principio del experimento suele observarse una consolidación de la probeta. Durante esta fase se van cerrando las microfisuras abiertas preexistentes, preferentemente las que están orientadas

perpendicularmente al eje de carga. Con ello, la probeta experimenta un acortamiento irreversible, pero con valores relativamente pequeños. Aproximadamente entre el 30% y el 70% del valor de la resistencia a la compresión, la muestra de roca experimenta un comportamiento elástico casi lineal. Más allá de ese valor se produce un aumento de la formación de microfisuras que, en última instancia, conduce al fallo total del material. El grado de consolidación depende en gran medida de la densidad de las microfisuras abiertas, mientras que este último comportamiento elástico lineal viene determinado principalmente por la composición mineral y sus propiedades elásticas (Siegismund & Snethlage, 2011). La relación esfuerzo-deformación de las probetas de roca intacta se comporta de forma lineal-elástica y, en algunos casos, casi elástica, mientras que en las etapas de meteorización progresiva, las probetas se deforman plásticamente con curvas características esfuerzo-deformación en forma de S (Figura 3) (Gupta & Rao, 2000).

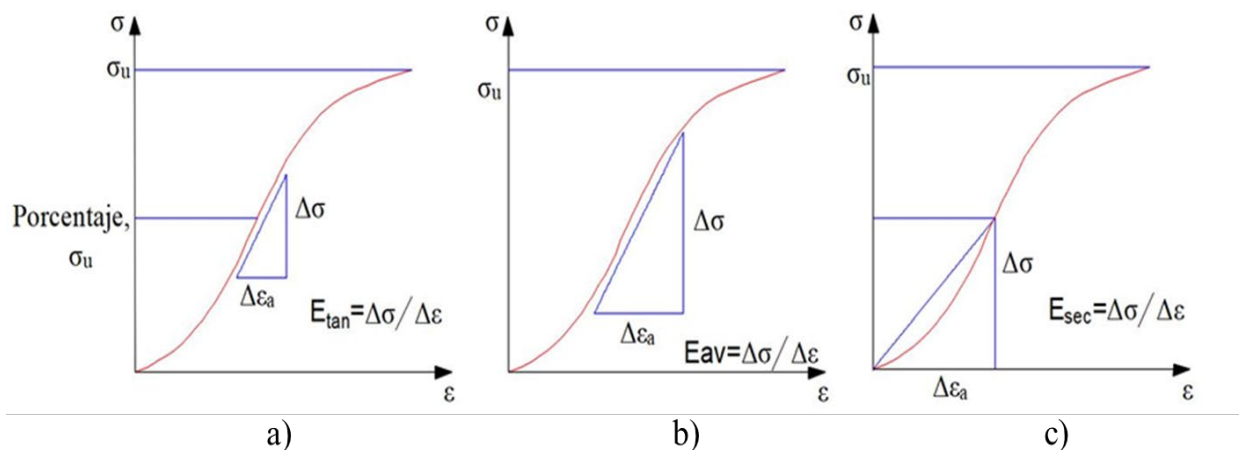


Figura 3. a) Módulo de Young tangente E_{tan} , b) Módulo de Young medio E_{av} y c) Módulo de Young secante E_{sec} (Santi et al., 2000).

El módulo de Young puede determinarse de las siguientes formas:

- Módulo medio E_{av} , o pendiente de la porción recta de la curva.
- Módulo tangente E_{tan} o pendiente de la curva en un punto determinado de la misma (generalmente al 50 % de la resistencia de pico).
- Módulo secante E_{sec} , o pendiente de la línea recta que une el origen de la curva con la resistencia de pico (González-De-Vallejo & Ferrer, 2011).

2.4. Resistividad eléctrica.

La prueba se realiza para roca tal como se describe en la obtención de resistividad en el concreto, las rocas se dejan saturando en el agua y posteriormente se sacan cubriendo con una franela húmeda antes de iniciar la prueba tanto en las probetas cilíndricas como en probetas cúbicas.

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica marca Nilsson (Figura 4) (DURAR, 1997).



Figura 4. Prueba de resistividad eléctrica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la tabla 1 se muestran los promedios de las pruebas realizadas a probetas cilíndricas de la cantera la Roka. Es importante mencionar que el módulo de elasticidad estático de 652,916.08 kgf/cm² mayor que lo reportado para un concreto hidráulico.

Tabla 1. Pruebas mecánicas, físicas y no destructivas de la cantera de roca triturada.

Cantera de Roca	E_s (kgf/cm ²)	UCS (kgf/cm ²)	Densidad (kg/m ³)	% Absorción	R(ohm-cm)
R	652,916.08	566.82	2,643.10	2.39	16,222.00

La Figura 5 muestra la relación que existe entre la resistividad, porcentaje de absorción y densidad de cada una de las muestras. Se observa una tendencia lineal en la resistividad eléctrica excepto en la muestra R5-1 la cual mostro una resistividad mucho mayor, sin embargo, la absorción fue menor y su densidad mayor. En general la absorción se encuentra en un rango de 2.2 y 3.3 por ciento.

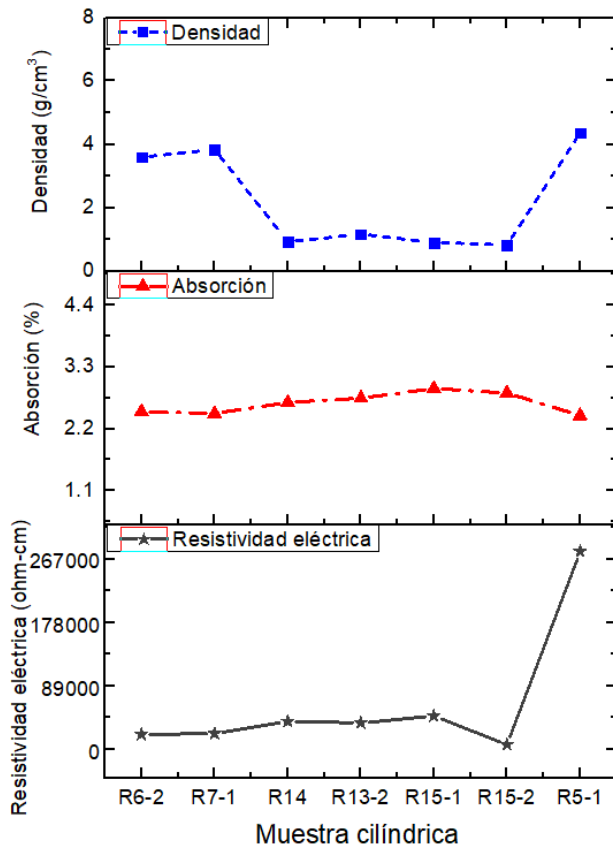


Figura 6. Resultados de las pruebas de densidad, absorción y resistividad eléctrica de las muestras cilíndricas de roca.

La figura 6 muestra un excelente coeficiente de correlación R2 igual 0.8574 entre densidad, resistividad eléctrica y módulo de elasticidad estático. El modelo matemático obtenido puede estimar el módulo de elasticidad estático para este tipo de rocas.

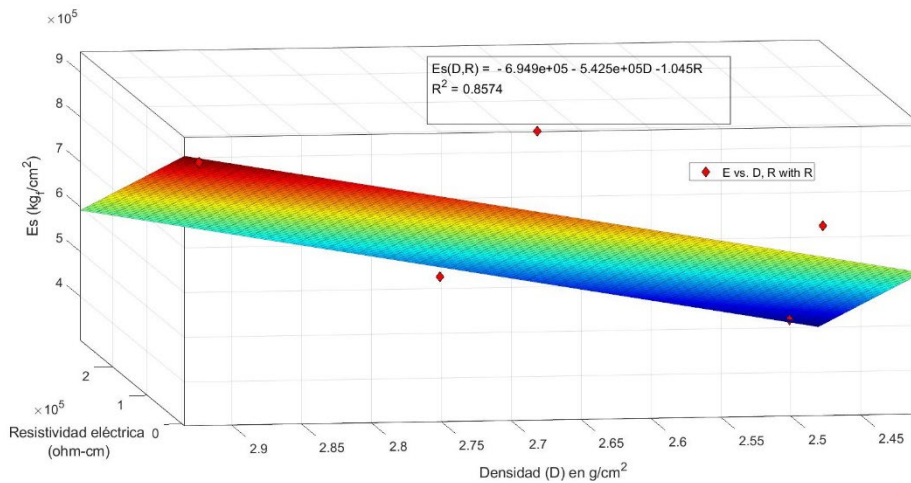


Figura 6. Correlación entre densidad, resistividad eléctrica y módulo de elasticidad estático.

En la figura 7 se muestran las curvas esfuerzo deformación para cada una de las muestras, se observan diferentes tendencias aun siendo el mismo tipo de roca. Las curvas con mayor tendencia es la muestra R14 y la de menor tendencia o pendiente es R5-1, coincidentemente esta muestra presentó la mayor resistividad, menor absorción y mayor densidad.

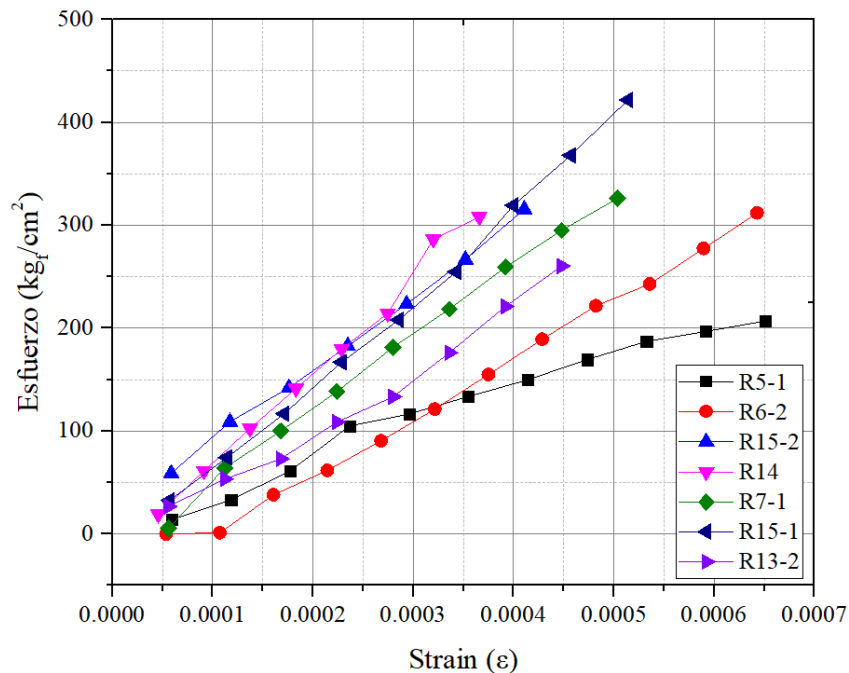


Figura 7. Curvas esfuerzo deformación de las muestras cilíndricas.

El módulo de elasticidad estático en cada una de las curvas esfuerzo deformación se estimó en base a una correlación lineal, de las cuales se obtuvieron ecuaciones lineales cuyas pendientes representan el E_s . Una vez que se obtuvieron los E_s se promediaron para determinar el módulo de elasticidad estático de la cantera de roca en estudio.

4. CONCLUSIONES

La resistencia a compresión uniaxial es 566.82 kgf/cm^2 por lo que cumplen con la norma N-CMT-2-01-003/02 que indica un valor 153 kgf/cm^2 para mampostería, la absorción no es mayor al 4 por ciento en las rocas estudiadas oscila entre 2.2 a 3.3 por lo que también cumple con la norma. Las curvas esfuerzo deformación son muy importantes, ya que permiten estimar el módulo de elasticidad estático cuyo dato es muy importante para estimar el comportamiento del agregado pétreo en mezclas de concreto hidráulico y mezclas asfálticas. En referencia al coeficiente de determinación (R^2 igual 0.8574) es aceptable y determina la calidad del modelo estadístico, permite además predecir el E_s en base a las pruebas de densidad y resistividad eléctrica para este tipo de rocas.

Se seguirá estudiando canteras de roca triturada para posteriormente correlacionar los datos y encontrar ecuaciones de correlación que permitan estimar el E_s de las rocas empleadas en la región Morelia, Michoacán. Dicha información permite al constructor conocer las características físico-mecánicas de las rocas a seleccionar y emplear en obras civiles.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; del CONAHCYT con el Proyecto de Grupo de Ciencia de Frontera CF-2023-G-985, con el Pronace 321260; con el IXM-2313; del ICTI, Instituto de Ciencia y Tecnología del Estado de Michoacán y con proyecto ICTI-PICIR23-0142, y del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

6. REFERENCIAS

- D18.12, A. (2002). *Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression (ASTM D3148-02)*.
- D18.12, A. S. (2015). *Standard Test Method for Laboratory Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C127-04*. American Society for Testing Materials (ASTM).
- DURAR. (1997). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión En Estructuras de Hormigón Armado*. CYTED, Red temática XV.B- Durabilidad del Hormigón.
- González-De-Vallejo, L.-I., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. CRC Press/Balkema.
- Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56(3), 257–274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00090-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00090-3)
- Małkowski, P., & Ostrowski, Ł. (2017). The Methodology for the Young Modulus Derivation for Rocks and Its Value. *Procedia Engineering*, 191, 134–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.164>
- Navarro, L., Martínez, W., & Espinoza, A. (2011). *ANÁLISIS DE MATERIALES, Manual de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales (FIC-UMSNH (ed.))*.
- Piasta, W., Góra, J., & Budzyński, W. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Construction and Building Materials*, 153, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.167>
- Sadeghpour, F., Darkhal, A., Gao, Y., Motra, H. B., Aghli, G., & Ostadhassan, M. (2024). Comparison of geomechanical upscaling methods for prediction of elastic modulus of heterogeneous media. *Geoenergy Science and Engineering*, 239, 212915. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212915>
- Santi, P. M., Holschen, J. E., & Stephenson, R. W. (2000). Improving elastic modulus measurements for rock based on geology. *Environmental and Engineering Geoscience*, 6(4), 333–346. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.4.333>
- Shen, S., Gao, Y., & Jia, L. (2024). A Comparison of the Relationship between Dynamic and Static Rock Mechanical Parameters. *Applied Sciences*, 14(11), 4487. <https://doi.org/10.3390/app14114487>
- Siegesmund, S., & Dürrast, H. (2014). Physical and Mechanical Properties of Rocks. In S. Siegesmund & R. Snethlage (Eds.), *Stone in Architecture: Properties, Durability* (pp. 97–224). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3_3
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). *Stone in Architecture Properties, Durability* (Springer (ed.); Fourth). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>





Diseño de un dispositivo para la alineación de fibras de acero utilizadas como refuerzo en elementos de concreto mediante el empleo de campos electromagnéticos

D. Cavazos de Lira^{1*}, C. A. Juárez Alvarado¹, B. T. Terán Torres¹

*Autor de Contacto: diego.cavazosd@uanl.edu.mx

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León UANL, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, México.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo presentar las experiencias recabadas en el diseño de dispositivos alineadores de fibras de acero, con la finalidad de orientarlas en la dirección de los esfuerzos principales de tensión presentes en elementos de concreto. Se examinó la orientación de fibras mediante la influencia de campos electromagnéticos originados mediante la interacción de imanes permanentes y electroimanes, mostrando el grado de alineación e inclinación de las fibras dentro de geles transparentes, así como la caracterización experimental de los campos magnéticos generados mediante el empleo de un medidor de teslas. La novedad, con respecto a los dispositivos existentes, radica en la activación y desactivación de los electroimanes, permitiendo inclinar a las fibras en las zonas recomendadas mediante un análisis estructural. La principal limitación es el decaimiento de la influencia del campo magnético conforme la distancia entre el dispositivo alineador y las fibras se incrementa. Los resultados indican que los dispositivos desarrollados son capaces de manipular efectivamente la orientación espacial de las fibras de acero dentro de medios viscosos, prometiendo su aplicación en elementos de concreto de cualquier dimensión.

Palabras clave: Refuerzo; Fibras; Alineación; Electromagnetismo; Electroimán.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos estructurales, al verse sometidos a la acción de cargas, experimentan diferentes estados de esfuerzos. Como el concreto es un material cerámico, exhibe un buen comportamiento a compresión, siendo necesario reforzarlo en las regiones en que experimente tensiones. Esta tarea se consigue mediante el uso de varillas de acero, confiriendo una resistencia localizada al elemento. Por su parte, el empleo de fibras provee de una resistencia diseminada a lo largo de la masa de concreto, promoviendo un mejor desempeño ante cargas estáticas, de fatiga o de impacto, así como una mayor ductilidad, tenacidad y durabilidad, por lo cual una solución híbrida, que involucre tanto refuerzo localizado como fibras de acero resulta conveniente (CEP-FIB, 2022).

En algunos elementos de las edificaciones, tales como los firmes industriales, las técnicas de construcción actuales recurren al mezclado aleatorio de fibras con concreto. Éstas ocupan el espacio entre las partículas de agregado grueso y forman una armadura que lo rodea, sirviendo como tensores, mientras que la matriz de concreto funge como puntal, tomando las compresiones (Singh, 2017). De tal manera, se proporciona un refuerzo local, evitando la apertura y engrosamiento de grietas, con lo cual se incrementa la capacidad de deformación, así como la resistencia residual a la tensión posterior al agrietamiento. Sin embargo, esta aleatoriedad refuerza también zonas que no lo necesitan, disminuyendo la eficiencia mecánica. Además, estudios (Kang et al., 2011), (Abrishambaf et al., 2017), han demostrado que la inclinación de las fibras es relevante. Si ésta es mayor a 60° , la eficiencia de las fibras se reduciría hasta un 10% en comparación a si estuvieran orientadas en la dirección de la tensión.

Por su parte, el Código Modelo para Estructuras de Concreto (CEP-FIB, 2013) también reconoce la influencia del factor de orientación en sus expresiones de diseño. Consecuentemente, se han emprendido esfuerzos para alinear fibras, siendo las fibras de acero susceptibles a ser alineadas mediante métodos de inducción magnética. En general, se han explorado dos tipos de dispositivos: aquellos basados en el uso de solenoides y los que sustentan su funcionamiento en el uso de imanes permanentes.

1.1 Alineación basada en el uso de solenoides

Se describe a un solenoide como un alambre enrollado en forma de hélice con espiras muy próximas entre sí (Tipler y Mosca, 2010). Este dispositivo crea un campo magnético intenso y uniforme en su interior, ante el cual las fibras tienden a alinearse.

En general, la metodología consiste en someter a una mezcla de mortero o concreto con fibras a la acción de un campo magnético uniforme, suministrado al electrificar un solenoide durante cierto tiempo, a la vez que se acompaña (o no) de un proceso de vibrado. De preferencia, se trabaja con un molde paramagnético. En la Tabla 1 se resume una serie de artículos que trabajaron con el principio del solenoide. En la Figura 1 se muestra una imagen ilustrativa de estos dispositivos.

Merece la pena destacar que, para evaluar la efectividad de la alineación de las fibras, también se han utilizado medios transparentes como pegamento de papel tapiz (West et al., 2005), aceite de silicón (Wijffels et al., 2017), (Xiong et al., 2023), hidrogel (Pérez Villar y Flores Medina, 2017), gel ultrafirme y sonogel (Lovichova et al., 2019).



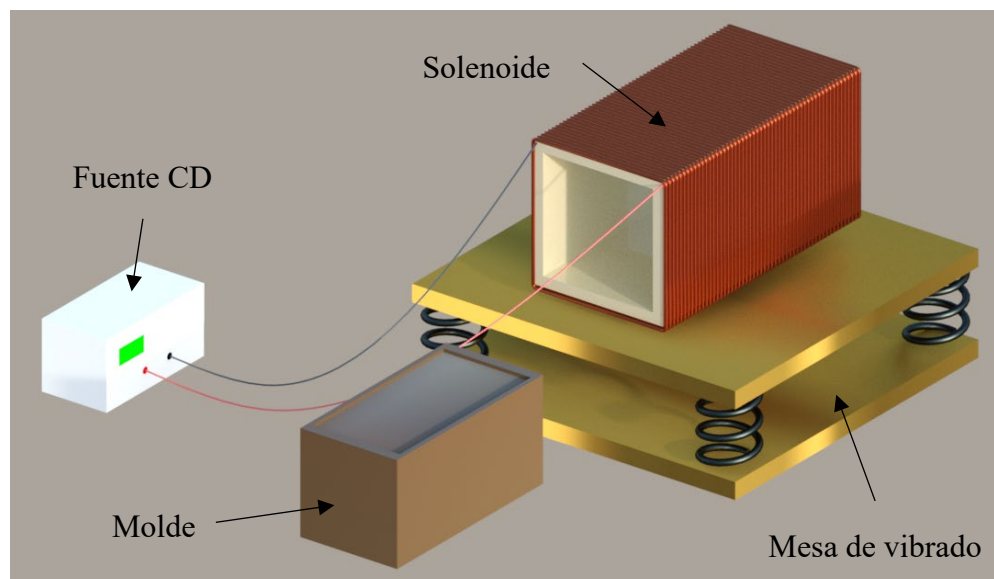


Figura 1. Vista esquemática de dispositivos basados en solenoide. Adaptado de (Mu et al., 2017).

Tabla 1. Literatura que reporta el empleo de solenoide como método de alineación de fibras.

Referencia	Tipo de mezcla	Tamaño probeta (mm)	Solenoide	Campo (mT)	% de Fibras	Tipo de vibrado
(Michels y Gams, 2016)	Mortero	37x36x130	100 vueltas	134.2	0.39%-0.52%	Mesa de flujo
(Wijffels et al., 2017)	Mortero autocompact.	100x100x400	1936 vueltas, 2.36 mm Ø	20	0.50% local	Auto nivelación
(Ghailan y Al-Ghalib, 2019)	Concreto autocompact.	100x100x500	165 vueltas, 2.8 mm Ø	7.5	0.35%-1.05%	Mesa de vibrado
(Hajforoush et al., 2020)	Concreto con aditivos	70x70x280	1100 vueltas, 1.35 mm Ø	500	1.50%	Súper-fluidificante
(Kheml et al., 2022)	Concreto HP, sonogel	100x100	1000 vueltas, 1.8 mm Ø	55	N/A	Corriente alterna
(Künzel et al., 2021)	Sonogel	150x150	112 vueltas	50	N/A	Corriente alterna
(Carrera et al., 2023)	Concreto HP	40x40x160	2300 vueltas, 0.8 mm Ø	100 (60-120)	1.50%	Corriente alterna
(Mu et al., 2017)	Morteros fluidos	100x100x400	480-810 vueltas	0.15	0.80%, 1.20%, 2.00%	Mesa vibratoria

(Mu et al., 2018)	Morteros fluidos	150x150x550	480-810 vueltas	9.83	0.80%, 1.20%, 2.00%	Mesa vibratoria
(Mu et al., 2021)	Morteros fluidos	40x40x100	1.5 mm Ø	N/A	0.80%, 1.20%, 2.00%	Mesa vibratoria
(Wang et al., 2022)	Morteros fluidos	50x100x700	50 vueltas, 1.5 mm Ø	30	Variable, de 0.50% - 2.00%	Mesa vibratoria
(Xiong et al., 2023)	Concreto UHPC	100x100x515	1000 vueltas	40	0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%	Auto nivelación

Ya que el proceso de alineación consiste en introducir al espécimen dentro del solenoide durante cierto tiempo, el tamaño del solenoide es la principal limitante de este método. Prueba de esto es el tamaño de las probetas reportadas en la Tabla 1. Esta problemática impide la alineación de fibras en elementos estructurales anchos, tales como paneles de losas o firmes, de ahí que se hayan explorado otras alternativas como las basadas en imanes permanentes.

1.2 Alineación basada en el uso de imanes permanentes

Recientemente, (Mu et al., 2021) recurrieron al empleo de campos magnéticos externos para alinear fibras en especímenes de concreto de 100x100x400 mm. Para ello, utilizaron imanes de rubidio-hierro-boro dispuestos en serie encima de todo el largo y ancho del elemento a alinear. Según se reporta, la intensidad del campo magnético fue de 100 mT en la superficie. De acuerdo con los autores, al colocar los imanes en serie, la interferencia de sus campos magnéticos da como resultado una línea de flujo magnético prácticamente plana, lo cual alinea horizontalmente a las fibras. Este dispositivo funciona en conjunto de una mesa vibratoria durante la alineación (ver Figura 2).

Siguiendo esta línea de investigación, (Wang et al., 2023) reforzaron losas de concreto, al utilizar un dispositivo similar al anterior haciéndole girar encima de la probeta durante el proceso de alineado. Si bien, la distribución de fibras es horizontal, su inclinación en el plano es aleatoria. Finalmente, (Xu et al., 2024) emplearon otro dispositivo similar a los ya reportados, pero de una longitud menor al de la probeta a alinear, juntando a los imanes en grupos de 130x150x26 mm y evaluando la influencia de colocarlos directamente sobre la probeta o a diversas separaciones, logrando alinear las fibras de manera horizontal.

El principal reto de este proceso de alineación reside en que el campo magnético que generan los imanes permanentes disminuye rápidamente conforme la distancia entre el imán y el punto de interés aumenta, a diferencia del campo del solenoide, el cual es uniforme. Si bien, la intensidad del campo magnético en la superficie de los imanes permanentes suele ser mayor, su rápido decaimiento en función de la distancia representa el mayor desafío a vencer.



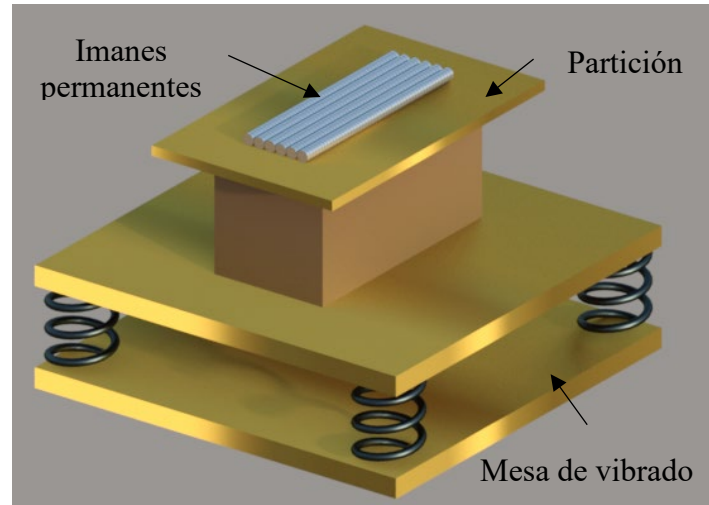


Figura 2. Vista esquemática de dispositivos basados en imanes. Adaptado de (Mu et al., 2021).

2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

De acuerdo con la literatura (Ghailan y Al-Ghalib, 2019), (Xu et al., 2024), el sistema en consideración se puede reducir a tres elementos: (1) la fibra, (2) el medio viscoso en el que se encuentra y (3) el campo magnético.

Por su parte, la fibra de acero experimenta cuatro fuerzas: su peso propio W dirigido hacia abajo, el empuje B hacia arriba debido a ubicarse en el medio viscoso, las fuerzas magnéticas F_m uniformemente repartidas a lo largo de la fibra en dirección normal a la misma y que van en direcciones opuestas en cada mitad de la misma, debido a que al introducirse en el campo magnético responde como un dipolo magnético, y las fuerzas de arrastre F_d , que representan la oposición del medio a que se gire la fibra. A continuación, se enuncian las expresiones de la fuerza magnética y de la fuerza de arrastre. La fuerza magnética F_m se define por la ecuación (1):

$$F_m = \frac{B^2 A_f}{2\mu_0} \left(\frac{\mu_m - \mu_0}{\mu_0} \right) \quad (1)$$

Donde B es la resistencia a la inducción magnética en teslas, A_f es el área de la sección transversal de la fibra en m^2 , μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ en N/A^2 y μ_m es la permeabilidad magnética del acero $\mu_m = 10^4 \mu_0$. Por su parte, la fuerza de arrastre F_d está dada por la ecuación (2):

$$F_d = \frac{C_D A l_f \rho v^2}{2} \quad (2)$$

Donde C_D es un coeficiente adimensional de arrastre que va de 0.9 a 1.2 (Malaika, 1985), A es el área proyectada de la fibra en el plano vertical en m^2 , l_f es la longitud de la fibra en m , ρ es la

densidad del concreto en kg/m^3 , y v es la velocidad de la fibra, igual a su velocidad angular que depende del tiempo por su radio de rotación (la longitud de la fibra entre dos).

Si bien, (Li et al., 2008) determinaron analíticamente la distribución del campo magnético alrededor de un imán rectangular permanente y (Xu et al., 2024) desarrollaron expresiones para varios imanes juntos, la determinación se suele realizar mediante mediciones experimentales con ayuda de una sonda Hall con la cual se validan las expresiones analíticas.

3. FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO ALINEADOR

Se procedió a evaluar el campo magnético ejercido por los imanes de Nd-Fe-B (ver Figura 3, inciso a). Primero se evaluó mediante el empleo de una película para ver el campo magnético (ver Figura 3, inciso b). De esta imagen se puede apreciar el fuerte decaimiento del campo con relación a las dimensiones del imán (5x5x2 mm). Después, con ayuda de una sonda Hall con capacidad de 0 a 200 mT y precisión de $\pm 2\%$ se encontró que la mayor intensidad de campo magnético en el imán era del orden de los 152 mT (ver Figura 3, inciso c). Esta intensidad varía con respecto a la posición de medición sobre el imán (según el patrón mostrado en la parte central de la Figura 6).

A pesar de que originalmente se inició con la fabricación de electroimanes (bobinas alrededor de un núcleo de hierro) a las cuales se les suministra un diferencial de voltaje y corriente, se encontraron dificultades como un calentamiento de la fuente de poder (baterías de 9 V). Consecuentemente, se procedió a la adquisición de electroimanes comerciales como los mostrados en la Figura 4 (inciso a) y se cambió la fuente de alimentación por una fuente de poder de corriente continua programable (ver Figura 4, inciso b). Con dicha fuente se aplicaron los 12 V especificados por el fabricante de los electroimanes, así como una corriente de 0.667 A. Posteriormente, se midió el campo magnético en la superficie del electroimán y únicamente se obtuvieron 71 mT (ver Figura 4, inciso c).

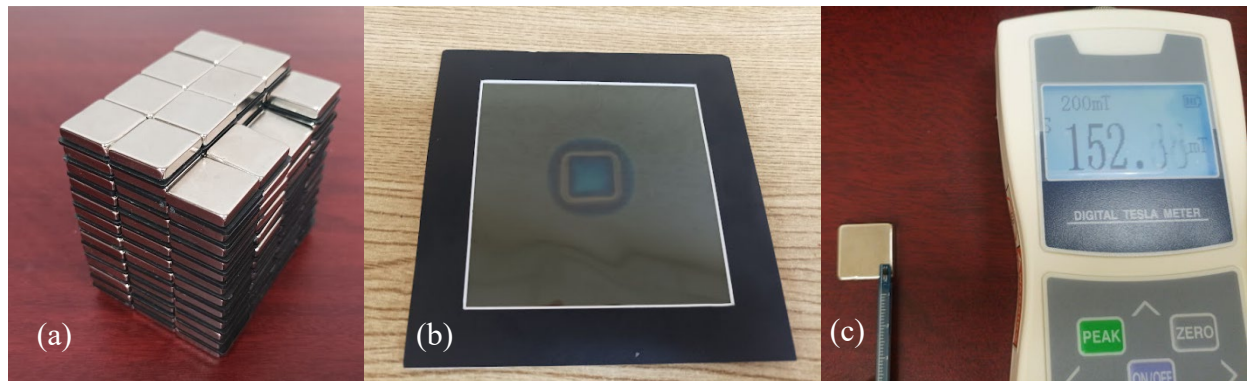


Figura 3. (a) Imanes permanentes de neodimio-hierro-boro de 5x5x2 mm. (b) Visión del campo magnético de un solo imán. (c) Medición del campo magnético en la superficie del imán, indicando 152 mT.

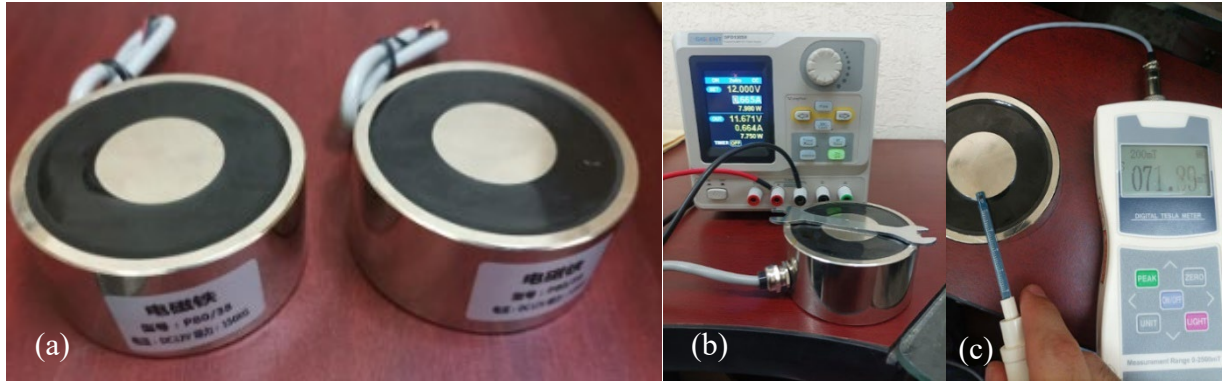


Figura 4. (a) Electroimanes P80/38 (80 mm de diámetro, 38 mm de alto), que funcionan con corriente continua y 12 V, produciendo una fuerza de sujeción 1470 N (150 kgf). (b) Fuente programable suministrando corriente continua y 12 V al electroimán. (c) Medición del campo magnético en la superficie del electroimán, indicando 71 mT.

De manera paralela, con la finalidad de evaluar la funcionalidad del dispositivo alineador, se decidió seguir la recomendación de estudiar su efectividad en un medio transparente, por lo cual se procedió a revisar las características reológicas de una mezcla de cemento y agua, así como de un gel transparente disponible comercialmente. De la Figura 5 (inciso b) se puede observar que la mezcla de cemento con agua presentaba una viscosidad menor que el gel. Se presume que dicho comportamiento se debe a que el funcionamiento del reómetro impide que se forjen los enlaces químicos que permiten que fragüe el cemento, por lo cual no aumenta de viscosidad. De tal manera, se puede presumir que si el dispositivo alineador es capaz de orientar fibras en el gel, también es capaz de hacerlo en una mezcla de cemento en estado fresco.

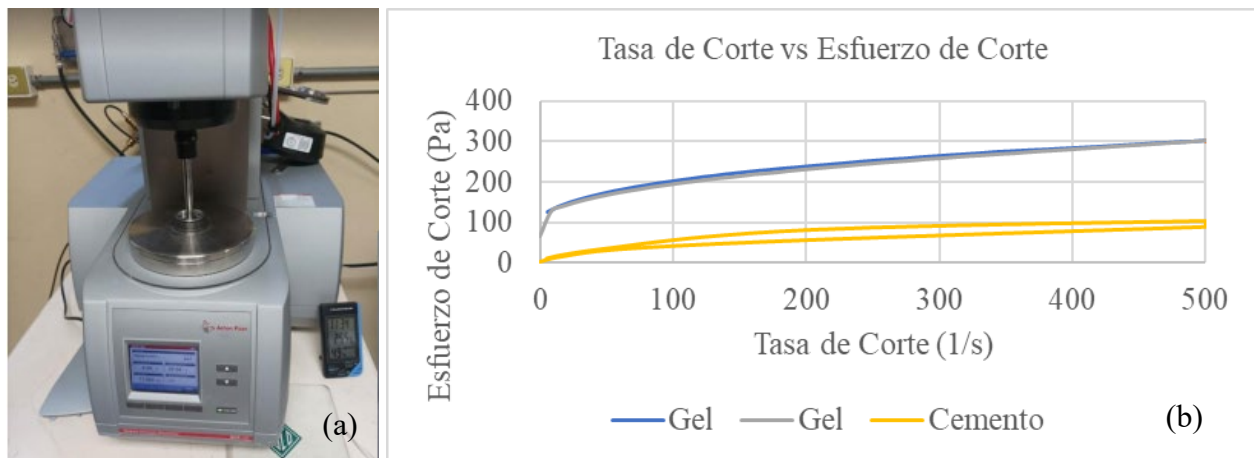


Figura 5. (a) Reómetro conduciendo la prueba de tasa de corte contra esfuerzo de corte para un gel transparente. (b) Resultados de la prueba y comparativa contra mezcla de cemento con agua.

Sin embargo, tras colocar los imanes sobre un recipiente con gel, el campo colocado no fue lo suficientemente fuerte como para lograr el movimiento de las fibras. Tras optimizaciones en el diseño del dispositivo se encontró que el orientar los imanes en cierta manera, denominada arreglo de Halbach incrementaría el campo magnético de un lado de los imanes y lo disminuiría del otro. Sin embargo, para mantener a los imanes en posición se requería de un molde lo suficientemente

fuerte. Primero, se realizó una simulación de elemento finito con ayuda del programa FEMM, en la cual se puede apreciar la modificación del campo magnético (ver Figura 6).

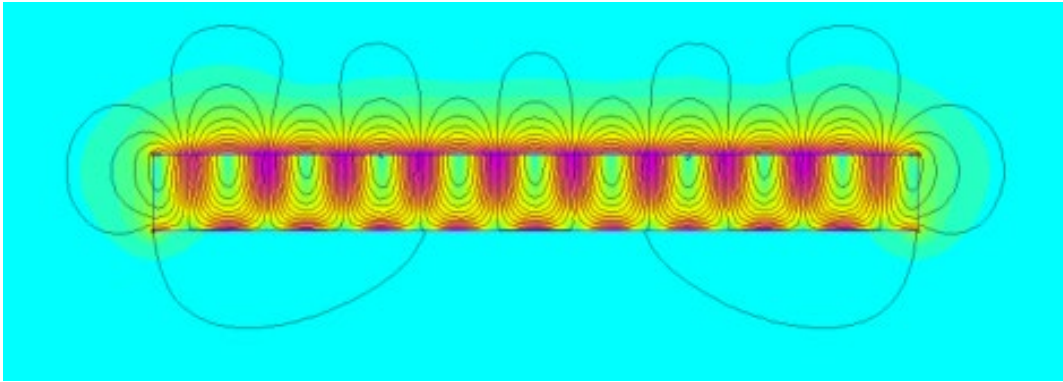


Figura 6. Modelo de elemento finito en el programa FEMM, donde se demuestra que si se cambia la orientación del norte en grupos de imanes es posible incrementar la intensidad de campo magnético (parte superior de la imagen) a costa de reducirlo en la otra (parte inferior).

Consecuentemente, se procedió al desarrollo de un molde para alojar a los imanes, el cual se fabricó mediante una impresora 3D (ver Figura 7, incisos a y b). Con ayuda del sensor Hall se detectó el norte de grupos de 4 imanes y se apreció que el campo magnético ejercido en su superficie aumentaba hasta 223 mT (ver Figura 7, inciso c).

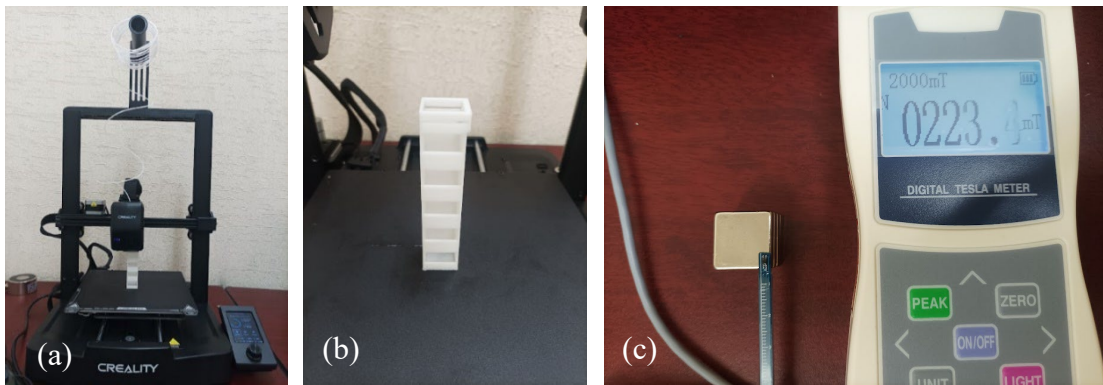


Figura 7. (a) Impresora 3D fabricando un molde para alojar a los imanes permanentes en el arreglo de Halbach. (b) Molde obtenido. (c) Los grupos de cuatro imanes poseen un campo magnético mayor (223 mT).

En la Figura 8, inciso a, se muestran los imanes arreglados según la matriz de Halbach. Si bien, en la Figura 9 se puede apreciar que la magnitud del campo magnético no aumentó mucho (233 mT), ésta se presenta en la parte exterior del molde, por lo cual si se pudiera medir en la superficie del imán ésta sería mucho mayor. Independientemente de lo anterior, lo más importante se aprecia en la Figura 8, inciso b: la distancia en la cual es efectivo el campo magnético ha crecido importantemente, permitiendo ejercer influencia en regiones más lejanas y así alinear fibras.

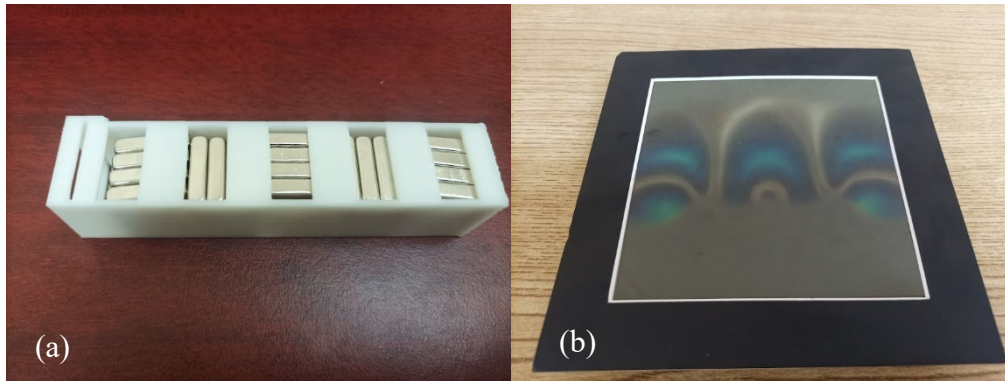


Figura 8. (a) Molde con imanes dispuestos en el arreglo Halbach (los grupos de 4 imanes van variando la dirección de su norte en incrementos de 90°). (b) Visualización del campo magnético.



Figura 9. Campo magnético obtenido en el arreglo de Halbach (233 mT), a pesar de que no hay contacto directo con los imanes permanentes.

Actualmente se están conduciendo pruebas de la interacción del campo magnético del dispositivo desarrollado en conjunto de imanes que se activan/desactivan según sea necesario, con la finalidad de inclinar las fibras en las regiones requeridas obtenidas de un análisis estructural. Esto permitirá hacer un uso eficiente de las fibras y reforzar elementos de cualquier dimensión.

4. CONCLUSIONES

1. El arreglo de Halbach permite maximizar el área de influencia del campo magnético ejercido por los imanes permanentes.
2. Debido al decaimiento del campo magnético con la distancia, es preponderante orientar a los imanes de manera que influyan a la mayor distancia posible.
3. La incorporación de electroimanes permite inclinar fibras en las regiones que así lo necesiten, según el análisis estructural y la determinación de las zonas que se encuentren a tensión en un espécimen de concreto reforzado.
4. Se necesitan hacer pruebas adicionales para evaluar la efectividad del alineador en especímenes de concreto reforzado, tales como losas o firmes.
5. Es preferible utilizar imanes permanentes a solenoides ya que no se ven afectados por el

tamaño de la bobina.

6. Se puede ejercer una influencia mayor en un elemento estructural si se ve sometido a vibrado o si emplea aditivos súper-fluidificantes como el caso del concreto auto-consolidable.

5. AGRADECIMIENTOS

Se extiende el más grato agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León y su Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación PROACTI 2023, por su contribución de recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Igualmente se extiende un agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT por la contribución de la beca de doctorado de un autor de este trabajo. Finalmente, se agradece a la Facultad de Ingeniería Civil y al Instituto de Ingeniería Civil de la UANL por el uso de sus instalaciones y equipos de medición.

6. REFERENCIAS

- Abrishambaf, A., Pimentel, M., & Nunes, S. (2017), *Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites*. Cement and Concrete Research, 28-40.
- Carrera, K., Künzel, K., Konrád, P., Mára, M., Kheml, P., Papez, V., & Sovják, R. (2023), *The effect of magnetic field parameters on fibre orientation in high-performance fibre-reinforced concrete*. Mechanics of Materials, 1-9.
- Ghailan, D. B., & Al-Ghalib, A. A. (2019), *Magnetic alignment of steel fibers in self-compacting concrete*. Australian Journal of Structural Engineering, 1-9.
- Hajforoush, M., Kheyroddin, A., & Rezaifar, O. (2020), *Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field*. Construction and Building Materials.
- Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J. K., & Kim, Y. Y. (2011), *The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete*. Construction and Building Materials, 2450-2457.
- Kheml, P., Carrera, K., Künzel, K., Václav, P., & Sovják, R. (2022), *Summary of findings on magnetic orientation of fibers in cement composites*. Materials Today: Proceedings, 1104-1107.
- Künzel, K., Papez, V., Carrera, K., Konrád, P., Mára, M., Kheml, P., & Sovják, R. (2021), *Electromagnetic Properties of Steel Fibres for Use in Cementitious Composites, Fibre Detection and Non-Destructive Testing*. Materials, 1-19.
- Li, X., Xu, J., & Liu, H. (2008), *Three-dimensional magnetic field distribution around a rectangular permanent magnet*. Journal of BJUT-Beijing University of Technology, 1-6.
- Lovichova, R., Takacova, K., Fornusek, J., & Mara, M. (2019), *Steel fibre orientation by means of magnetic field*. Advances in Engineering Materials, Structures and Systems, 1497-1500.
- Michels, J., & Gams, M. (2016), *Preliminary study on the influence of fibre orientation in fibre reinforced mortars*. Građevinar, 1-11.
- Mu, R., Diao, C., Liu, H., Wu, H., Qing, L., Zhao, S., & Li, L. (2021), *Design, preparation and mechanical properties of full-field aligned steel fiber reinforced cementitious composite*. Construction and Building Materials, 1-8.
- Mu, R., Dong, R., Liu, H., Chen, H., Cheng, Q., & Fan, C. (2021), *Preparation of Aligned Steel-*



Fiber-Reinforced Concrete using a Magnetic Field Created by the Assembly of Magnetic Pieces. Crystals, 1-13.

Mu, R., Li, H., Qing, L., Lin, J., & Zhao, Q. (2017), *Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field.* Construction and Building Materials, 309-316.

Mu, R., Wei, L., Wang, X., Li, H., Qing, L., Zhou, J., & Zhao, Q. (2018), *Preparation of Aligned Steel Fiber Reinforced Cementitious Composite and its Flexural Behavior.* Journal of Visualized Experiments, 1-11.

Pérez Villar, V., & Flores Medina, N. (2017), *Alignment of hooked-end fibres in matrices with similar rheological behaviour to cementitious composites through homogeneous magnetic fields.* Construction and Building Materials, 256-266.

Wang, X., Xu, B., Mu, R., Qing, L., Liu, Y., Chen, X., . . . Lei, Z. (2023), *Flexural properties of a 2D-distributed steel fiber reinforced cement-based composite two-way slab.* Journal of Building Engineering, 1-12.

Wang, X., Zhan, Z., Mu, R., Longbang, Q., Xu, H., Cao, G., . . . Du, C. (2022), *Improving reinforcement of cement-based composite continuous beam using adaptively distributed steel fibers.* Construction and Building Materials, 1-9.

West, R. P., Zhang, S., & Mandl, J. (2005), *Aligning long steel fibres in fresh concrete.* Cement Combinations for Durable Concrete, 467-476.

Wijffels, M. J., Wolfs, R. J., Suiker, A. S., & Salet, T. A. (2017), *Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour.* Cement and Concrete Composites, 342–355.

Xiong, Y., Yang, M., Zhang, Y., Shi, H., Zhao, J., & Yuan, Y. (2023), *Study on the electromagnetic field aligning steel fibres in UHPC reinforced beams: Effect, mechanism and flexural behavior.* Cement and Concrete Composites.

Xu, M., Li, H., & Mu, R. (2024), *An investigation on magnetic field distribution for assembly of magnets and its effect on alignment of steel fiber in aligned steel fiber-reinforced concrete.* Frontiers in Materials, 1-17.

CEP-FIB. (2013), *“fib Model Code for Concrete Structures 2010”.* Fédération Internationale du Béton, Lausana, Suiza.

CEP-FIB. (2022), *“Bulletin 105 - Fibre Reinforced Concrete”.* Fédération Internationale du Béton (FIB), Lausana, Suiza.

Malaika, J. I. (1985), *“Principles of Fluid Mechanics. Part 2”.* Arabic House of Printing, Bagdad, Irak.

Singh, H. (2017), *“Steel Fiber Reinforced Concrete: Behavior, Modelling and Design”.* Springer Science+Business Media, Singapur.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2010), *“Física para la ciencia y tecnología”.* REVERTÉ, S. A., Barcelona, España.





Análisis de la respuesta elástica de capas granulares mediante el LWD para determinar posibles fallas en los pavimentos

M. A. Villanueva-Guzmán^{1,2*}, H. Delgado-Alamilla², E. M. Alonso-Guzmán¹,
W. Martínez-Molina¹, H. L. Chávez-García¹, M. G. Gómez-Valdovinos¹

*Autor de Contacto: ariel.villanueva@umich.mx

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

²Instituto Mexicano del Transporte, Pedro Escobedo, Querétaro, México.

RESUMEN

El control de calidad de las obras es importante, debido que a partir de estas actividades es posible detectar de manera oportuna deficiencias respecto a las características mecánicas de los elementos. Al realizar un aseguramiento de la calidad de los elementos, se corrobora que las condiciones de diseño se cumplan, y por lo tanto, la estructura tenga un buen desempeño. Existen 2 vertientes de métodos de diseño de pavimentos, empíricas y mecánico-empiristas, las cuales están asociadas a la predicción de la fatiga; los parámetros asociados a las capas granulares son módulos de respuesta, módulo de reacción o de elasticidad (empíricos) y modulo resiliente (mecánico-empiristas). Pero esto parece una utopía, ya que para el control de calidad de capas granulares se utiliza el grado de compactación. Es por esto que, se comienza a evaluar el módulo de Young con el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD). En esta investigación se realizó un análisis de las condiciones mecánicas de una capa granular respecto a la referencia del módulo de Young, lo cual brinda indicios del mejoramiento del aseguramiento de la calidad de los pavimentos y reducir las posibles fallas en los pavimentos (deformación o agrietamiento) asociadas con falencias en las capas estructurales granulares.

Palabras clave: No destructivo; Estadística; Desempeño; Construcción en pavimentos.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la evolución en el pensamiento y razonamiento humano, del cual incluye la manera de obtener el conocimiento, se ha visto reflejado en la metodología de investigación, basándose principalmente en el método científico y analítico. En las primeras etapas de la ciencia predominó el método empírico, el cual se basa en adquirir conocimiento a partir de la experimentación y observar los resultados, siempre y cuando estos fuesen reproducibles y consistentes. En la ingeniería, en la mayoría de las veces depende mucho la habilidad mental e ingenio de los investigadores para llegar a resultados adecuados, pero con el tiempo se ha cambiado el pensamiento empírico por un pensamiento teórico-analítico, el cual depende de una hipótesis.

Es de esta manera como surgieron los principios del diseño de pavimentos, los cuales se basaban en el conocimiento empírico para la obtención de factores y analizar principalmente las afectaciones causadas en la superficie (Pista de pruebas del Método AASHTO). Esta metodología de diseño es conocida como “Método Empírico”, en la cual se consideran capas homogéneas que brindan soporte a los esfuerzos provocados por los vehículos que se desplazan sobre este conjunto de capas, las cuales se dividen en: capas de terracerías o capas estructurales.

Para el diseño de pavimentos, las “capas estructurales” son las encargadas de distribuir los esfuerzos y disipar la transmisión de los mismos a ciertas profundidades (0.50 m, aproximadamente), por lo que en la configuración habitual de México sólo se consideran como capas estructurales a: capas de alto modulo (losas de concreto hidráulico o mezclas asfálticas densas), base y subrasante. Aunque la capa subrasante no es considerada de manera unánime como una capa estructural, debido a que la principal función de esta es brindar una superficie firme, uniforme y de transición de la rigidez entre las capas, sin que los cambios sean de manera drástica, lo que provocaría fenómenos como el punzonamiento de materiales en las capas blandas (Yao et al., 2023). Por lo que la compactación de la capa de base es fundamental, esto debido a que está asociada con la estabilidad y durabilidad en la construcción de pavimentos (Alshibli et al., 2005; Choi et al., 2012; Sulewska et al., 2020).

Aunado a esto, surgió una premisa fundamental, el control de calidad de estas capas estructurales de acuerdo a valores de referencia de los materiales utilizados dentro de los métodos empíricos desarrollados en las décadas de 1960 a 1990, principalmente tomando como referencia el método AASHTO, hasta la creación posterior del método de Ingeniería de la UNAM, siendo estos los más utilizados en el diseño de pavimentos en México.

Así que una de las actividades urgentes que debían de ejecutarse en México era la creación de un organismo que pudiera brindar un apoyo tecnológico para el desarrollo de la infraestructura, es por ello que hasta abril de 1987 se creó el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). El IMT se fundó con objetivos específicos, dentro de los cuales se encontraba el establecimiento de un marco reglamentario que brindara eficiencia, confiabilidad, competitividad sana y equilibrada de todos los modos de transporte nacional. Es así que, ya al contar con un organismo tecnológico que es el principal propulsor de desarrollo, generación y adaptación de tecnología del transporte, fue posible enfocar esfuerzos en la creación de normas y manuales para la infraestructura del transporte carretero, principalmente pavimentos (Instituto Mexicano del Transporte, 2024).

Una vez constituido el Instituto Mexicano del Transporte, se toman como referencia algunas normativas internacionales para el control de calidad de los pavimentos.

Aunado a esto, de acuerdo al marco teórico presentado por la AASHTO en su método empírico de diseño de pavimentos, para la capa de base, se establecieron algunos factores a controlar que

cuentan con gran relevancia, los cuales son parámetros físicos: la granulometría, índice de plasticidad, reactividad de los finos, densidad seca máxima, grado de compactación; y parámetros de exposición a sollicitaciones mecánicas como: el California Bearing Ratio (CBR), desgaste de los ángeles, módulo de reacción. Todos estos valores fueron correlacionados con los materiales utilizados y de acuerdo a su relevancia con la capacidad estructural de la misma.

Es de esta manera que, en México se da origen a la creación de una norma que establezcan las características de los materiales para pavimentos y los parámetros de control de calidad de las capas, como lo fue la N-CMT-4-02-002, la cual estipula las características adecuadas para los materiales para bases hidráulicas (capa estructural de los pavimentos). Estos factores se encuentran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico (SCT, 2004).

Característica	Valor (%)
Límite líquido, máximo	25
Índice plástico, máximo	6
Equivalente de arena, mínimo	40
California Bearing Ratio, mínimo	80
Desgaste de Los Ángeles, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación, mínimo	100

Tabla 2. Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfáltico (SCT, 2004).

Característica	Valor (%)	
	ESALs $\leq 10^6$	ESALs $> 10^6$
Límite líquido, máximo	25	25
Índice plástico, máximo	6	6
Equivalente de arena, mínimo	40	50
California Bearing Ratio, mínimo	80	100
Desgaste de Los Ángeles, máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40	35
Grado de compactación, mínimo	100	100

En la actualidad, los métodos de diseño de pavimentos empírico-mecanicistas por capas, tratan de predecir las deformaciones de una carga dada basados con los parámetros de módulo de Young, relación de Poisson y el espesor de cada capa (Ryden, N., & Mooney, M. A., 2009).

De acuerdo a lo estipulado de parte de los entes reguladores de nuestro país, sólo se buscan cumplir con parámetros físicos de las características de los materiales, siendo el CBR el único parámetro mecánico de los materiales a emplear en las capas granulares, por lo que esto representa un escenario de incertidumbre del comportamiento de un pavimento. Por lo que en tiempo reciente se ha realizado la investigación y propuesta (en boletines) del uso de los Deflectómetros de Impacto Ligero (LWD, por sus siglas en inglés).

El LWD es un dispositivo portable desarrollado en Alemania para poder realizar mediciones del modulo dinámico del suelo in-situ, ya que, normalmente este modulo es utilizado para evaluar el grado de compactación del suelo. Este dispositivo es muy útil en el proceso de control de calidad

de las superficies granulares en los pavimentos (Elhakim et al., 2014; Jitarekul et al., 2017). Es esta practicidad que ha convertido al LWD como un equipo de control de calidad en la construcción de pavimentos e investigaciones que se encuentra en tendencia a nivel mundial (Fleming et al., 2019; Marecos et al., 2017; Mooney et al., 2009; Tamrakar, P., & Nazarian, S., 2018).

Cabe mencionar que el LWD presenta ventajas ante los métodos destructivos tradicionales, las cuales son: los materiales de los pavimentos no se alteran respecto a su terminado realizado durante el proceso constructivo; y los métodos no destructivos son más rápidos y tienen una relación costo-beneficio mejor, lo que usualmente se traduce en menos interrupción al tráfico y un menor tiempo durante su evaluación (Kavussi et al., 2019).

2. METODOLOGÍA

Es necesario contar con la construcción de un pavimento para poder realizar la revisión de las calidades de los materiales reales, ya que usualmente existen diferencias con los resultados de diseño de laboratorio, por lo que para esta investigación se eligió un tramo de prueba ubicado en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Este tramo dentro del IMT es considerado como un laboratorio en el cual es posible llevar a cabo ensayos que permitan conocer el comportamiento de los vehículos mediante conceptos de “Mecánica Vehicular”, así como de ser una superficie de referencia con pocas alteraciones durante diversas épocas del año para certificar equipos de medición de estándares de desempeño para la auscultación de pavimentos; es por esto que cualquier construcción, mantenimiento o modernización en esta zona es de mucha relevancia.

Los trabajos reconstrucción ejecutados fueron:

- Construcción de capa de Base
- Construcción de capa de mezcla asfáltica densa

Los autores de este documento se encargaron de realizar ensayos no destructivos, o poco invasivos como un servicio de investigación para alternativas del control interno, esto se llevó a cabo durante las actividades de construcción llevadas a cabo por la empresa constructora y el control de calidad externo.

3.1 Control de calidad de la capa de base

Para la capa de base se realizó el ensayo de Módulo de rigidez por el LWD, e indirectamente este puede realizar en condiciones de laboratorio el cálculo del Grado de Compactación de la capa de base, el cual, para fines de esta investigación, no se llevó a cabo. Se realizaron mediciones con el LWD a cada 50 metros y en los 3 puntos (derecha, centro e izquierda) conforme a lo establecido en el M-MMP-1-16/20 (Figuras 1 y 2).

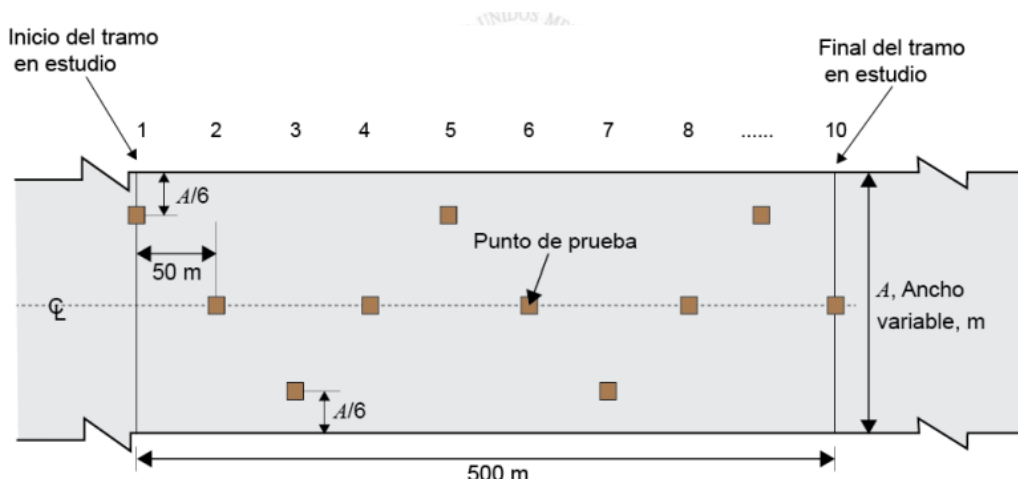


Figura 1. Distribución y frecuencia de los puntos de sondeo de prueba para capas de base y subbase (M-MMP-1-16/20).



Figura 2a-b. Ejemplo de ejecución de ensayos de módulo de rigidez con el LWD.

De acuerdo con las referencias, se tiene que el módulo de rigidez superficial de los materiales granulares utilizados para la construcción de capas de base debe ser de 100 – 500 MPa (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de referencia del módulo de rigidez de superficie en campo para diferentes materiales (SCT, 2021).

Material	Módulo de rigidez de superficie en campo, E_{LWD} (MPa)
Base granular o subbase	100 – 500
Subrasante	30 – 275
Terracerías estabilizadas mecánicamente	140 – 690
Suelos estabilizados con cal	50 – 350
Terracerías tratadas con cemento	690 – 1700
Base tratada con cemento	1050 – 2750

3. RESULTADOS

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de módulo de rigidez de la capa de base mediante las lecturas tomadas con el LWD. Se toma como referencia el M-MMP-1-16/20, en el cual se determina el procedimiento para realizar el “Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)”, en el cual se muestran unos valores de referencia de módulo de rigidez de cada tipo de material, para el caso de la capa de base el módulo de rigidez es de 100 a 500 MPa, por lo que esa referencia aparece en la Tabla 3.

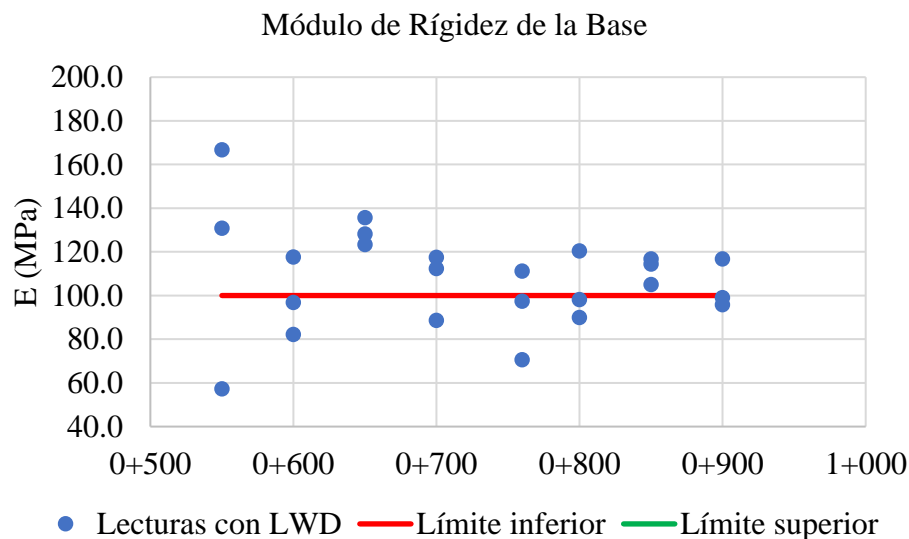


Figura 3. Módulos de rigidez de la superficie de la base con LWD.

De acuerdo a los resultados observados en la Figura 3, es posible determinar de manera rápida en campo que, 14 de 24 puntos muestreados (58.3%) cumplen con los requisitos de calidad del módulo de rigidez de la capa de base, pero si se considera una confiabilidad del 80%, como usualmente se realiza en el diseño de pavimentos, entonces 22 de 24 lecturas (91.7%) están dentro del margen de aceptación. Por otra parte, cabe mencionar que durante el trabajo de control de calidad externo se hicieron 5 calas para calcular el PCA, y de acuerdo al reporte entregado por la empresa constructora, el grado de compactación siempre estuvo por encima del 100%.

4. CONCLUSIONES

La finalidad de la investigación era poder utilizar el LWD como un criterio de aceptación que permita tomar decisiones en obra con celeridad, por lo que si se cuenta con la referencia de la respuesta que debe de brindar el ensaye en los materiales de base (100 – 500 MPa), por lo que se puede apreciar que la mayoría de los datos se encuentran dentro del parámetro de aceptación y el factor de confiabilidad usual de 80% (es decir, con 80 MPa como mínimo).

El uso del LWD es adecuado ya que, brinda un parámetro más allegado al comportamiento de los pavimentos, los cuales tienden a la evolución de métodos empírico-mecanicistas, dejando de lado

la ambigüedad de los parámetros físicos. Aunque una conclusión puede resumir los aspectos fundamentales del artículo, es recomendable redactar unas conclusiones en el artículo.

Aunque esto aún debe de mejorarse, debido a la ambigüedad de los resultados propuestos en el boletín técnico de la SCT del 2021, ya que refiere a la realización de los ensayos durante el periodo de diseño y contando con los resultados de densidad seca máxima y humedad óptima, en donde estos parámetros funcionen como datos de entrada y se ejecute el análisis en laboratorio bajo esas condiciones de diseño (densidad seca máxima y humedad óptima), esto mediante el uso del molde AASHTO que brinde un confinamiento al agregado pétreo, y así poder obtener el módulo de rigidez de superficie de diseño.

Desde el criterio del autor principal de este artículo, el brindar un confinamiento para la comparación de los datos de diseño, influye de manera sustancial en los ensayos en campo, ya que en campo no se tiene la misma estructura que brinde el confinamiento de las partículas de manera rígida, al ser un modelo semi-infinito del soporte entre las partículas laterales en la capa de base en el pavimento en campo.

Es posible que esto brinde un nuevo panorama y áreas de oportunidades para la mejora continua de los pavimentos ya que, uno de los principales motivos de las fallas en los pavimentos se debe a las condiciones mecánicas de las capas granulares, principalmente asociadas con escalonamientos y asentamientos.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera muy especial al Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para poder desarrollar esta investigación que sirve como preámbulo de la innovación en métodos no destructivos de control de calidad en campo.

6. REFERENCIAS

- Alshibli, K.A.; Abu-Farsakh, M.; Seyman, E. Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools. *J. Mater. Civ. Eng.* 2005, 17, 560–569.
- Choi, Y., Ahn, D., Lee, Y., & Ahn, J. (2020). Compaction Quality Monitoring of Open-Graded Aggregates by Light Weight Deflectometer and Soil Stiffness Gauge. *Sustainability*, 12(6), 2521. <https://doi.org/10.3390/su12062521>
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., & Amer, M. I. (2014). The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction. *HBRC Journal*, 10(3), 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.12.003>
- Fleming, P. R., Frost, M. W., & Lambert, J. P. (2007). Review of Lightweight Deflectometer for Routine in Situ Assessment of Pavement Material Stiffness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2004(1), 80–87. <https://doi.org/10.3141/2004-09>
- Jitarekul, P., Sawangsuriya, A., & Singhatiraj, P. (2017). Integration of Pavement Layer Evaluation Using LWD for Road Safety Control. *Procedia Engineering*, 189, 111–117. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.05.019>
- Kavussi, A., Qorbaninik, M., & Hassani, A. (2019a). The influence of moisture content and compaction level on LWD modulus of unbound granular base layers. *Transportation Geotechnics*, 20, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100252>



- Marecos, V., Solla, M., Fontul, S., & Antunes, V. (2017). Assessing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods. *Construction and Building Materials*, 135, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.003>
- Mooney, M. A., & Miller, P. K. (2009). Analysis of Lightweight Deflectometer Test Based on In Situ Stress and Strain Response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 199–208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:2\(199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(199))
- Park, S. S., Bobet, A., & Nantung, T. E. (2018). Correlation between Resilient Modulus (MR) of Soil, Light Weight Deflectometer (LWD), and Falling Weight Deflectometer (FWD). <https://doi.org/10.5703/1288284316651>
- Ryden, N., & Mooney, M. A. (2009). Analysis of surface waves from the light weight deflectometer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1134–1142. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.002>
- Sulewska, M.J. The control of soil compaction degree by means of LFWD. *Balt. J. Road Bridge E* 2012, 7, 36–41
- Tamrakar, P., & Nazarian, S. (2018). Evaluation of plate load based testing approaches in measuring stiffness parameters of pavement bases. *Transportation Geotechnics*, 16, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.06.005>
- Yao, Y., Li, S., Zhao, G., & Jiang, Y. (2023). Experimental-mechanistic analysis of pavement base deflections measured with light weight deflectometer. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.006>
- SCT. (2004). *Materiales para Bases Hidráulicas*. En N-CMT-4-02-002. SCT.
- Instituto Mexicano del Transporte. (19 de Enero de 2024). Obtenido de <https://www.gob.mx/imt/prensa/acerca-del-imt>
- SCT. (2021). “*Uso del Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) en el control de compactación en campo*”. *Boletín Técnico DGST No. 2/2021*. Obtenido de https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Boletines/DGST._Boletin_Tecnico_2.2021._LWD.pdf





Morteros con carbón vegetal activado: una evaluación de sus propiedades mecánicas y de durabilidad

O. E. Luna-Martínez^{1*}, P. F. de J. Cano-Barrita, F. M. León-Martínez

*Autor de Contacto: olunam2300@alumno.ipn.mx

¹ CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México

RESUMEN

Este estudio explora el uso del carbón activado comercial y su efecto en las propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland. Estos morteros tuvieron una relación $a/c = 0.50$ y una relación arena/cemento de 2.75, en los cuales el carbón activado vegetal comercial reemplazó el 1, 2 y 3% de cemento en peso. El carbón activado fue caracterizado mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y por microscopía electrónica de barrido. Los morteros fueron evaluados a 3, 7 y 28 días de edad, determinando la resistencia a la compresión en cubos de 5 cm por lado, así como la velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica en cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud. Los resultados en general indican que el carbón activado mejora la resistencia a la compresión a edades tempranas con respecto al control, así como también la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso ultrasónico incrementa con el incremento en el porcentaje de carbón.

Palabras clave: Pirólisis; Carbón activado; Mortero; Resistencia mecánica.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico es el material de construcción más utilizado en todo el mundo (Kummar Mehta & M. Monteiro, 2006). La cantidad poros y su distribución de tamaños en la pasta de cemento hidratada del concreto es uno de los factores más importantes que afectan su durabilidad (Kumar & Bhattacharjee, 2003). Los poros en las pastas de cemento se clasifican en su forma más básica como poros gel y capilares (Neville, 2011) o de acuerdo con propuestas relativamente recientes como nano, micro y miliporos (Mays, 2007). El tamaño de los poros y su distribución en el mortero o el concreto son función del tipo de cemento, adiciones minerales, relación agua/cemento, diseño de la mezcla, temperatura, el tiempo y tipo de curado, etc. (Du & Folliard, 2005).

El carbón activado (CA) cuenta con una superficie específica y una microporosidad extremadamente alta, en cuya producción se utilizan materiales renovables ricos en carbono para formarse térmicamente mediante una serie de procesos como el tratamiento con ácidos y álcalis (Bhatnagar et al., 2013). El CA es un material con una excelente estabilidad química, que también resiste ácidos y álcalis y no se disuelve en agua. Debido a la gran capacidad de adsorción del CA, este es utilizado generalmente en la purificación del agua y recientemente para utilizar la absorción funcional en materiales base cemento (Frías et al., 2018; Liu et al., 2013).

Algunos autores como Horgnies et al. (2012) han estudiado la influencia de la adición de CA en concretos endurecidos para absorber un mayor porcentaje de NO_2 , ya que se piensa que este óxido se adsorbe de forma irreversible mediante una reacción de neutralización con la solución acuosa alcalina que llega a cubrir las superficies de los hidratos y el CA. De igual forma, Horgnies et al. (2015) indican que el uso de CA en pastas de cemento endurecido permite mejorar y prolongar significativamente el efecto descontaminante en presencia de CO_2 e incluso después de la carbonatación completa de la superficie de la pasta de cemento. Por otra parte, Frías et al. (2018) concluyeron que, al incrementar el contenido de CA residual, reduce la resistencia mecánica debido al aumento del volumen del macroporos.

De acuerdo con lo anterior, se genera el interés de estudiar y evaluar los efectos del CA en las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales base cemento, comparando morteros control con morteros conteniendo distintos porcentajes de sustitución de cemento por CA. En este estudio se obtuvieron imágenes mediante microscopía electrónica de barrido para observar la morfología del CA y se obtuvieron espectros de FTIR para determinar sus grupos funcionales. Posteriormente se investigaron las propiedades de los morteros que contienen CA vegetal, incluyendo la resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales

Se utilizó CA vegetal de la marca Meyer® con una gravedad específica de 0.39 g/cm^3 . Este carbón se pasó a través de un tamiz de malla No. 200 ($75 \mu\text{m}$). La arena de río utilizada tuvo una densidad de 2.61, un módulo de finura de 3.2 y una absorción de 1.97%. El cemento utilizado fue un cemento CPC-30R de la marca Holcim Apasco, el cual cumple con lo requerido en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 (2017).



2.2 Proporciones de las mezclas de mortero y elaboración de especímenes

Las proporciones de las mezclas de mortero se muestran en la Tabla 1. Para todas las mezclas, la relación de cemento/arena fue 1:2.75 en masa, y la relación de agua/cemento fue 0.50. El CA se utilizó en porcentajes de 0, 1, 2 y 3 % en masa como reemplazo de cemento. Todas las mezclas se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C305-20 (2020b). Se colaron 27 cubos de 50 mm x 50 mm y 3 cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud por cada porcentaje de sustitución para cada prueba realizada, totalizando 108 cubos y 12 cilindros. Todas las muestras se curaron a una temperatura de 23 ± 2 °C y sumergidos en un recipiente con agua saturada con hidróxido de calcio.

Tabla 1. Proporciones de las mezclas de mortero para 1 m³

Material	Cemento (kg)	Carbón (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)
Control	533	0	266	562
1% CA	528	5	266	562
2% CA	522	11	266	562
3% CA	517	16	266	562

2.3 Método

2.3.1 Caracterización del carbón vegetal activado

Se observó la morfología del carbón vegetal activado utilizando un microscopio electrónico de barrido modelo JSM-IT300LV (Jeol Ltd., Akishima, Japón) con un voltaje de 5 kV. De igual forma, se determinaron los grupos funcionales del carbón vegetal activado mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) utilizando un equipo Nicolet 6700 (Thermo Scientific, USA), ocupando un portamuestra con cristal de Germanio.

2.3.2 Propiedades mecánicas

Se determinó la resistencia a la compresión de los cubos de mortero a los 3, 7 y 28 días de edad (en triplicado para cada edad), de acuerdo con la norma ASTM C109/C109M-20 (2020a). También se evaluó la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros de mortero de 100 x 200 mm, a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días de edad, utilizando un equipo de velocidad de pulso ultrasónico Controls (Controls, Milán, Italia) operando a una frecuencia de 53 kHz. Antes de realizar las mediciones se pulieron los cilindros en ambos extremos para tener una superficie plana que permitiera el correcto acoplamiento de los transductores con la superficie, utilizando además un acoplante para evitar que existiera alguna capa de aire que afectara transmisión del pulso ultrasónico. La velocidad se calculó dividiendo la longitud de los cilindros entre el tiempo de tránsito.

La resistividad eléctrica se evaluó en los cilindros de mortero en condición saturados y superficialmente secos a las edades de 3, 7 y 28 días de edad, a una temperatura de 23 ± 2 °C. Se utilizó un resistivímetro Recipod (Proceq, Zurich, Suiza) con 38 mm de separación de electrodos. Se realizaron 4 lecturas a cada 90° para determinar la resistividad del espécimen evaluado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Morfología del CA mediante SEM

En la Figura 1 se muestra la morfología del CA, siendo partículas amorfas y angulosas, con algunas partículas de forma alargada, y cuentan con microporosidad tal y como lo menciona Bhatnagar et al. (2013). Esta microporosidad puede encontrarse de manera interna, generando así un área superficial mayor.

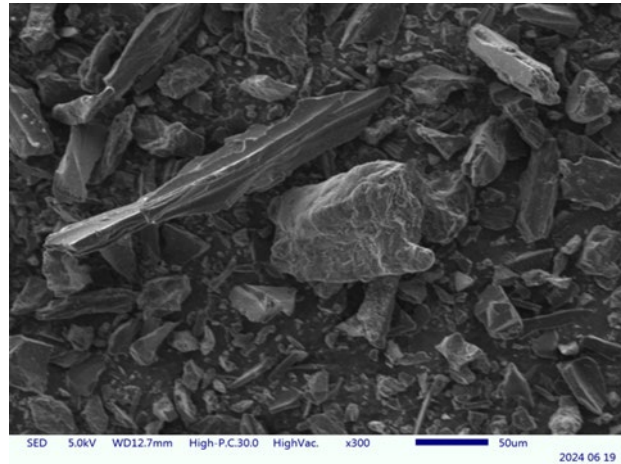


Figura 1. Imagen SEM de partículas de carbón vegetal activado.

3.2 Grupos funcionales del CA

El espectro FTIR del CA se presenta en la Figura 2, en la cual se observa la banda de absorción atribuida al grupo carboxilo (C-O) a 1223 cm^{-1} . Este grupo dentro del carbón activado desempeña un papel importante en mejorar las propiedades adsorbentes del carbón.

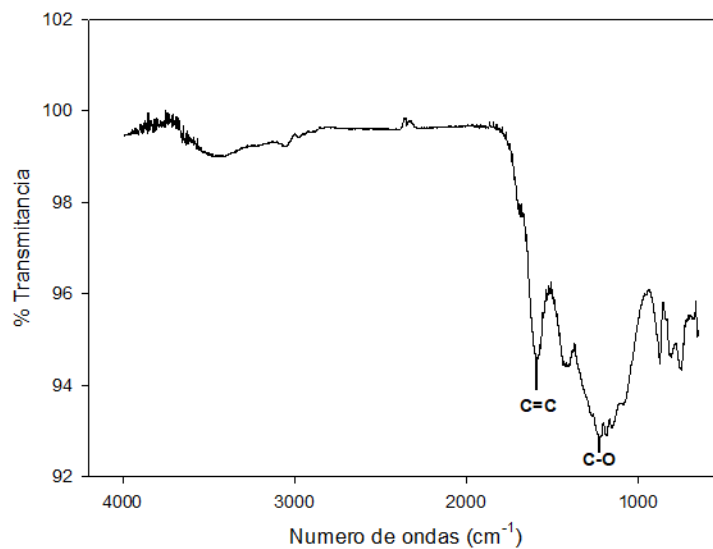


Figura 2. Espectro FTIR del CA comercial

3.3 Resistencia a la compresión

El efecto del CA sobre la resistencia a la compresión se observa en la Figura 3. A los 3 días, la resistencia a la compresión de las muestras con CA al 1% y 2% de sustitución aumentaron un 17 % y 11%, respectivamente. Sin embargo, las muestras con 3% de CA disminuyeron un 7% su resistencia en comparación con el control. Cuando se curaron durante 7 días, las resistencias a la compresión incrementaron un 29, 33 y 14% con relación al control. En esta edad se presentó un mayor incremento en la resistencia, ya que a los 28 días de edad se observa un comportamiento similar al de los 3 días, ya que solo el 1 y 2% de CA aumentaron un 13 y 12%, mientras que el 3% de CA redujo un 2% su resistencia, comparada con el control. El CA tiene la capacidad de generar cambios en la resistencia de los morteros a diferentes edades y con distintos porcentajes de sustitución, el cuál dependerá del material del cual se haya elaborado el carbón (Almeron et al., 2024; Habibur Rahman Sobuz et al., 2024; Haris Javed et al., 2022; Praneeth et al., 2021; Qu et al., 2024).

3.4 Velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se presentan en la Figura 4. En general, se observa incremento de VPU con la edad de los morteros, especialmente en tiempos menores a 14 días, como se esperaba. Comparando los morteros con distintos porcentajes de sustitución, entre los 3 y 14 días, la máxima velocidad corresponde a los morteros con menor porcentaje de CA y disminuye a medida que se incrementa el contenido de carbón. Con la información limitada con que se cuenta hasta el momento, no se observa un comportamiento definido del control. A los 28 días de edad, las VPU son similares e independientes del contenido de carbón. Se continúa evaluando las propiedades a los 56 y 180 días de edad. Podemos encontrar una similitud en el comportamiento del VPU comparada con la resistencia mecánica, al menos a los 3 y 7 días de edad, en los morteros con algún porcentaje de sustitución de CA, observando resistencias mayores en los morteros con CA.

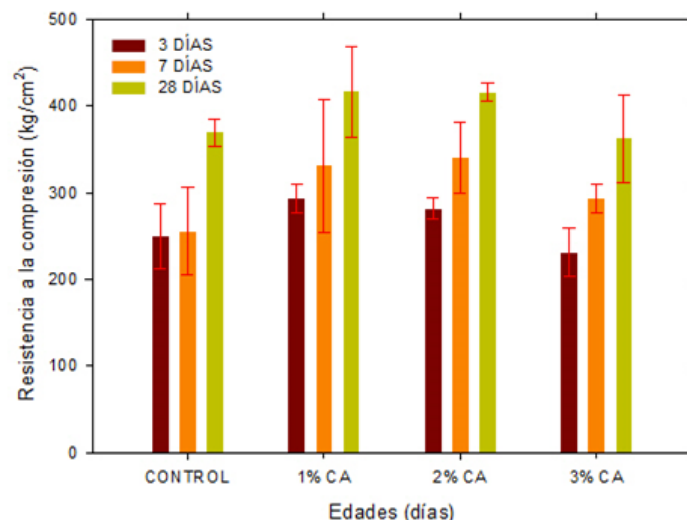


Figura 3. Resistencia a la compresión en función de la edad de morteros conteniendo distintos porcentajes de sustitución en peso de cemento por CA. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

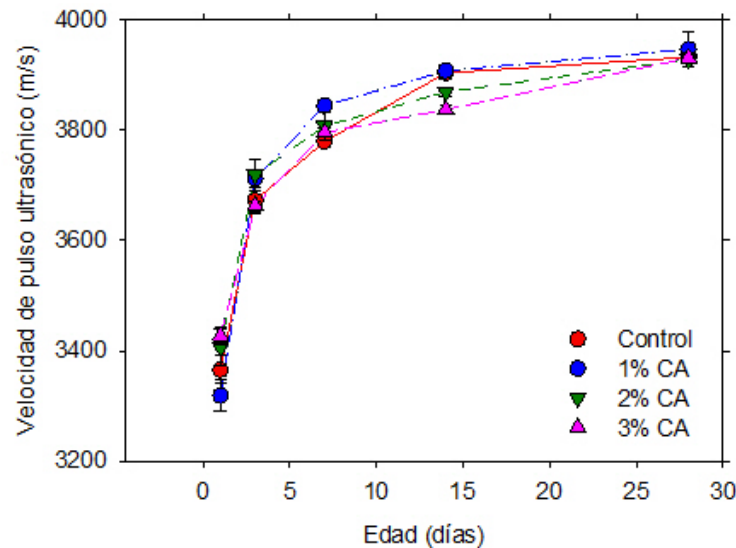


Figura 4. Velocidad de pulso ultrasónico de morteros con distinto porcentaje de sustitución de CA. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

De acuerdo con lo establecido en la norma mexicana NMX-C-275 (2004):

- Si la velocidad de pulso ultrasónico es inferior a 1,780 m/s, el elemento presenta muchos vacíos o agrietamiento alto.
- Si la velocidad se encuentra entre 1,780 m/s a 2,350 m/s, el elemento presenta algunos vacíos o agrietamiento medio.
- Y si la velocidad es superior a 2,350 m/s, el elemento presenta pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo.

De acuerdo con los resultados obtenidos a los 28 días se puede observar que todos los especímenes se encuentran en un rango mayor al requerido por la norma (2,350 m/s), dando a entender que estos presentan pocos vacíos en su estructura.

3.5 Resistividad eléctrica

De acuerdo con los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 5, se puede determinar que el incremento del porcentaje de sustitución de CA contribuye a que los morteros presenten una mayor resistividad eléctrica. Estos resultados se pueden comparar con los presentados por Mobili et al. (2021), quienes mencionan que al utilizar CA existe una disminución de resistividad cuando se reemplaza del 0.25% a 0.50% en peso de adición de CA y luego su resistividad aumenta con una adición de 1% en peso. Estos autores sugieren que el aumento de los valores de resistividad se debe a la aglomeración de partículas que han interrumpido las rutas de corriente disponibles.

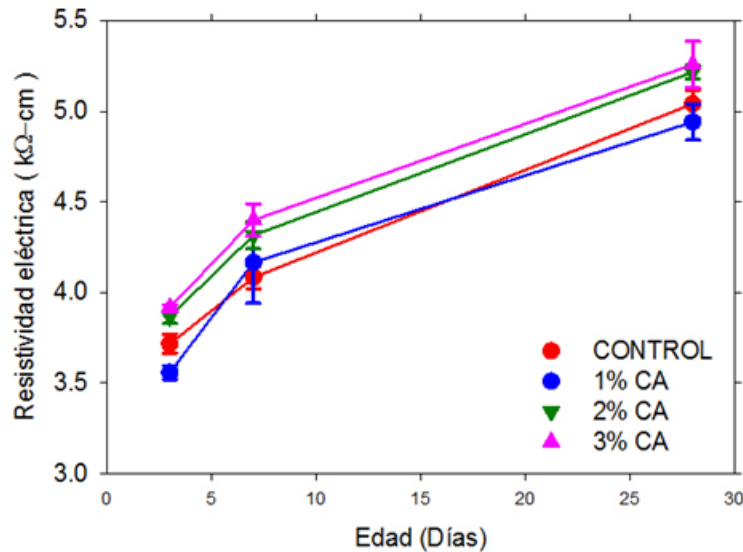


Figura 5. Resistividad eléctrica en cilindros de mortero con distintos porcentajes de CA.

De acuerdo con lo establecido en la norma AASHTO T358-19 (2019), se observa que los morteros utilizados en el presente estudio poseen una resistividad menor a 12 kOhm-cm, por lo tanto, corresponde a una penetración alta del ion cloruro.

Tabla 2. Valores de resistividad y su relación con la resistencia a la penetración de ion cloruro

Penetración de Ion Cloruro	Prueba de resistividad superficial	
	Cilindro de 100 x 200 mm (4 x 8 in) (kΩ-cm,) a= 1.5	Cilindro de 150 x 30000000 mm (6 x 12 in) (kΩ-cm,) a= 1.5
Alto	<12	<9.5
Moderado	12-21	9.5-16.5
Bajo	21-37	16.5-29
Muy bajo	37-254	29-199
Despreciable	>254	>199

a= espaciado de las puntas de la sonda Wenner

4. CONCLUSIONES

El estudio investigó los efectos del CA sobre la resistencia a compresión, velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica de morteros base cemento con reemplazos de cemento por 1, 2 y 3 % de carbón activado base masa. Las conclusiones de este estudio se resumen a continuación:

- Utilizando el 1% y 2% de sustitución de cemento por CA, la resistencia a la compresión incrementa a 3 y 7 días de edad y cuando se usa un 3%, la resistencia disminuye.
- Entre los 3 y 14 días de edad, la mayor velocidad de pulso ultrasónico se obtiene con el 1% de CA y disminuye con una mayor cantidad de sustitución de cemento por CA.

- La resistividad eléctrica de los morteros incrementa a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por CA, sin embargo, todos los valores de resistividad son inferiores a los requeridos por la normativa.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SIP del IPN por el apoyo económico otorgado al proyecto SIP clave 20240334. Oscar Luna agradece al Conahcyt por la beca de posgrado otorgada para estudios de maestría.

6. REFERENCIAS

- AASHTO. (2019). *AASHTO T 358-19 Surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*.
- Almeron, M. M., Ferreira, S. D., Mareze, P. H., & Godinho, M. (2024). Mechanical and acoustic performance of mortar with partial replacement by biochar from civil construction wood waste at advanced ages. *Construction and Building Materials*, 428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136281>
- ASTM International. (2020a). ASTM C109/C109M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International, West Conshohocken, PA*. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20
- ASTM International. (2020b). ASTM C305-20 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., & Sillanpää, M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 219, pp. 499–511). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038>
- Du, L., & Folliard, K. J. (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1463–1471. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>
- Frías, M., Vigil de la Villa, R., García, R., Martínez, S., Villar, E., & Vegas, I. (2018). Effect of a high content in activated carbon waste on low clinker cement microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 184, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.216>
- Habibur Rahman Sobuz, M., Khan, M. H., Kawsarul Islam Kabbo, M., Alhamami, A. H., Aditto, F. S., Saziduzzaman Sajib, M., Johnson Alengaram, U., Mansour, W., Hasan, N. M. S., Datta, S. D., & Alam, A. (2024). Assessment of mechanical properties with machine learning modeling and durability, and microstructural characteristics of a biochar-cement mortar composite. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134281>
- Haris Javed, M., Ali Sikandar, M., Ahmad, W., Tariq Bashir, M., Alrowais, R., & Bilal Wadud, M. (2022). Effect of various biochars on physical, mechanical, and microstructural characteristics of cement pastes and mortars. *Journal of Building Engineering*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104850>
- Horgnies, M., Dubois-Brugger, I., & Gartner, E. M. (2012). NOx de-pollution by hardened concrete and the influence of activated charcoal additions. *Cement and Concrete Research*, 42(10), 1348–1355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.007>



- Horgnies, M., Dubois-Brugger, I., Krou, N. J., Batonneau-Gener, I., Belin, T., & Mignard, S. (2015). Reactivity of NO₂ and CO₂ with hardened cement paste containing activated carbon. *European Physical Journal: Special Topics*, 224(9), 1985–1994. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02515-7>
- Kumar, R., & Bhattacharjee, B. (2003). Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 155–164. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00942-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0)
- Kummar Mehta, P., & M. Monteiro, P. J. (2006). *CONCRETE: Microstructure, Properties and Materials* (McGraw-Hill, Ed.; Third).
- Liu, J., Nie, X., Zeng, X., & Su, Z. (2013). Long-term leaching behavior of phenol in cement/activated-carbon solidified/stabilized hazardous waste. *Journal of Environmental Management*, 115, 265–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.026>
- Mays, T. J. (2007). A new classification of pore sizes. In P. L. Llewellyn, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, & N. Seaton (Eds.), *Characterization of Porous Solids VII* (Vol. 160, pp. 57–62). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80009-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80009-7)
- Mobili, A., Belli, A., Giosuè, C., Pierpaoli, M., Bastianelli, L., Mazzoli, A., Ruello, M. L., Bellezze, T., & Tittarelli, F. (2021). Mechanical, durability, depolluting and electrical properties of multifunctional mortars prepared with commercial or waste carbon-based fillers. *Construction and Building Materials*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122768>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete*. Pearson.
- ONCCE. (2017). Norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la construcción-Cementantes hidráulicos-Especificaciones y métodos de ensayo. *Diario Oficial de La Federación*. <http://www.onncce.org.mx>
- ONNCCE. (2004). *Norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2004 Industria de la construcción-Concreto Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto-Método de ultrasonido*. <http://www.onncce.org.mx>
- Praneeth, S., Saavedra, L., Zeng, M., Dubey, B. K., & Sarmah, A. K. (2021). Biochar admixed lightweight, porous and tougher cement mortars: Mechanical, durability and micro computed tomography analysis. *Science of the Total Environment*, 750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142327>
- Qu, F., Zhang, Y., Zhu, X., Xu, W., Poon, C. S., Li, W., & Tsang, D. C. W. (2024). Roles of wood waste biochar for chloride immobilization in GGBS-blended cement composites. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134389>





Evaluación de la reología del concreto autocompactante y ligero con poliestireno expandido

J. Gutierrez^{1, 2*}, J. Puerto², A. Duran¹

*Autor de Contacto: julian.gutierrezr@uanl.edu.mx

¹ Departamento de Tecnología del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.

² Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

RESUMEN

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción, y la reología desempeña un papel crucial en su comportamiento. El objetivo principal de esta investigación es caracterizar las propiedades reológicas del concreto autocompactante y ligero con poliestireno expandido. La metodología empleada incluye el uso del reómetro ICAR Plus para evaluar los parámetros de torque, esfuerzo de cedencia estático, esfuerzo de cedencia dinámico y viscosidad plástica. Además, se realizaron ensayos para evaluar el flujo libre y flujo restringido, así como la segregación según la norma ASTM C1611 y la Guía EFNARC para evaluar la habilidad de paso. Los resultados indican que el concreto evaluado cumple con los criterios para ser considerado autocompactable, no presenta segregación, tiene una densidad de 1905 kg/m³ y una resistencia de 22.8 MPa. Asimismo, muestra una habilidad de paso sin bloqueo visible, con esfuerzos de cedencia y viscosidad adecuados para ser considerado un concreto autocompactante y ligero con resistencia estructural. Las limitaciones del estudio se centran en la evaluación exclusiva de las propiedades reológicas del concreto y la correlación de estos parámetros con los resultados mecánicos. En conclusión, este concreto presenta propiedades que lo hacen apto para aplicaciones estructurales. **Palabras clave:** Reología; Concreto Autocompactable; Concreto ligero; Viscosidad; Esfuerzo de cedencia.

1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil y la construcción, las propiedades clave del concreto que se buscan optimizar son la trabajabilidad, la resistencia, la durabilidad y la sostenibilidad. La trabajabilidad está relacionada con el concreto fresco, mientras que la resistencia y la durabilidad se asocian típicamente con el concreto endurecido, así como la sostenibilidad busca que todos los procesos tengan un cambio medioambiental, social, político, económico y cultural. Sin embargo, el diseño de la mezcla y las propiedades del concreto fresco tienen una influencia directa y significativa en las características mecánicas del concreto endurecido. Por lo tanto, la evaluación temprana de las propiedades del concreto endurecido es fundamental, ya que la calidad y las propiedades mecánicas no mejoran después del proceso de endurecimiento(Kaffetzakis & Papanicolaou, 2016a).

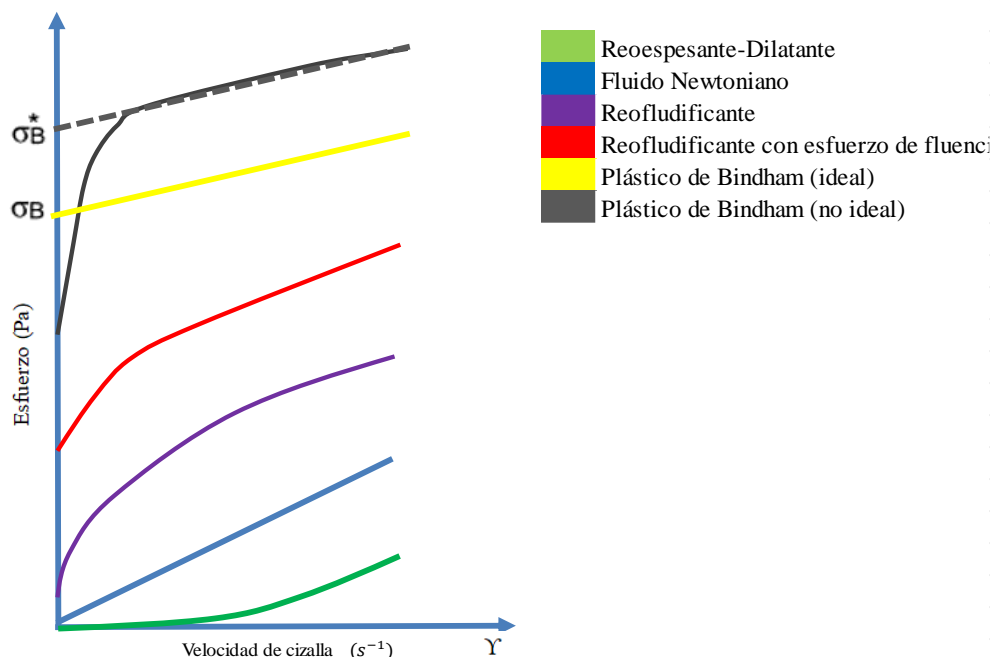
En las últimas décadas, los avances en la tecnología del concreto han dado lugar a la creación de concreto ligero (LWC) y concreto autocompactante (SCC). El concreto ligero se utiliza principalmente para reducir la carga muerta de las estructuras, mientras que el concreto autocompactante se emplea por su capacidad para fluir y consolidarse en encofrados sin necesidad de vibrado mecánico, mejorando así la eficiencia del proceso de construcción. Estos desarrollos han abierto nuevas posibilidades para la innovación en materiales de construcción(Gil et al., 2019). Uno de los enfoques más recientes es la combinación de las ventajas del concreto ligero y el concreto autocompactante en un material híbrido conocido como concreto autocompactante ligero (LWSCC). Este material promete no solo reducir la masa estructural y acelerar los tiempos de construcción, sino también mejorar la trabajabilidad y las propiedades mecánicas. Sin embargo, la investigación en esta área es todavía incipiente y se requiere un mayor entendimiento de los factores que afectan su rendimiento(Gesoglu et al., 2015).

En particular, la reología del concreto, que estudia el comportamiento de flujo y deformación del material fresco, es crucial para la implementación efectiva del LWSCC. La reología del concreto está influenciada por la tixotropía, un fenómeno que describe la disminución de la viscosidad bajo esfuerzo cortante y su recuperación cuando el esfuerzo se elimina. La tixotropía es especialmente relevante en materiales cementosos debido a los cambios microestructurales inducidos por el cizallamiento y la hidratación(Kaffetzakis & Papanicolaou, 2016b). En el caso del SCC, la comprensión de su comportamiento tixotrópico puede ayudar a predecir su flujo y la presión lateral que ejerce sobre el encofrado durante el vertido(Mashhadban et al., 2016).

Este artículo se enfoca en la evaluación de la reología del concreto autocompactante y ligero utilizando poliestireno expandido (EPS) y roca pómez como agregados para aligerar la mezcla. El EPS es conocido por su baja densidad y excelentes propiedades de aislamiento térmico, mientras que la roca pómez proporciona una estructura porosa que contribuye a la reducción del peso del concreto. La combinación de estos materiales en el LWSCC busca optimizar tanto las propiedades frescas como endurecidas del concreto.(Hassan et al., 2015)







El uso de EPS y roca pómez como agregados ligeros presenta desafíos y oportunidades únicas. Por un lado, estos materiales pueden mejorar significativamente la trabajabilidad y reducir la densidad del concreto, lo que es beneficioso para aplicaciones donde el peso es una consideración crítica. Por otro lado, la integración de estos agregados en la mezcla de SCC requiere un control preciso de las proporciones y las técnicas de mezcla para asegurar que las propiedades reológicas y mecánicas deseadas se mantengan.





Gráfica 1. Modelos Reológicos Adoptado de: (Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete, 2008)

Tabla 1 Definición de los Fluidos correspondientes a los Modelos Reológicos adoptada de: *ACI Committee 237 - ACI 237R-07 (2007)*

 Reo espesante- Dilatante	 Reofludificante con esfuerzo de fluencia
El coeficiente de viscosidad junto con la viscosidad diferencial incrementa de acuerdo con la velocidad de deformación del fluido, así como la carencia de límite elástico	El coeficiente de viscosidad junto la viscosidad diferencial se reduce al incremental la velocidad de deformación y no existe límite de fluencia.
 Fluido Newtoniano	 Plástico de Bingham (Ideal)
Es aquel cuya viscosidad Puede considerarse constante, es decir, que un fluido el cual es sometido a un esfuerzo ya sea cortante tiende a adquirir una deformación a una velocidad similar al esfuerzo que le fue aplicado.	Es un fluido que cuando se excede el límite elástico, la diferencia de viscosidad es constante, lo que se denomina viscosidad plástica, y cuando la velocidad de deformación tiende al infinito, el coeficiente de viscosidad continúa disminuyendo hasta alcanzar el Valor límite
 Reofludificante	 Plástico de Bingham (no Ideal)
El coeficiente de viscosidad y la viscosidad diferencial tienden a disminuir constantemente junto a la velocidad de cizallamiento.	Por encima del límite elástico, el coeficiente de viscosidad continúa disminuyendo y, a medida que aumenta la velocidad de deformación, la diferencia de viscosidad tiende a un valor constante, lo que se denomina viscosidad plástica. La interacción entre el reógrama y el eje de esfuerzo cortante extrapolado de la parte lineal se denomina límite elástico aparente.

En este estudio, se investigan las propiedades reológicas del LWSCC con EPS y roca pómez, así como su resistencia a la compresión y otras características mecánicas. Los resultados de esta investigación proporcionarán una base para el desarrollo de mezclas de concreto más eficientes y sostenibles, y contribuirán al avance del conocimiento en la tecnología del concreto autocompactante y ligero.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta investigación, se siguieron los procedimientos establecidos en (ACI 237R-07, 2007) y (ACI 211.2-98, 1998) "Práctica estándar para la Selección de Proporciones para Concreto Estructural Liviano" para diseñar y producir mezclas óptimas de concreto autocompactante (SCC) y liviano (LWC). Estos lineamientos proporcionan un marco teórico y práctico para evaluar las propiedades del concreto en estado fresco.

Los materiales utilizados para aligerar el concreto en este estudio fueron poliestireno expandido, perlita y roca pómez. A partir de un asentamiento de flujo previsto, según el método propuesto por la (ACI 237R-07, 2007), se determinaron y ajustaron los contenidos de agregados finos y gruesos, la relación agua-aglomerante, el volumen de pasta y mortero, así como la cantidad de aditivo, comparándolos con los límites sugeridos.

Las propiedades en estado fresco de las mezclas fueron evaluadas sistemáticamente, ajustando las proporciones de los materiales hasta alcanzar el comportamiento deseado. Para lograr las mezclas finales que permitieran estudiar los efectos del poliestireno expandido, perlita y roca pómez en el SCC, fue necesario realizar una calibración de las mezclas de referencia mediante un proceso iterativo de prueba y error, asegurando el cumplimiento de los requisitos del SCC según EFNARC. La estabilidad de las mezclas se clasificó utilizando el índice de estabilidad visual (VSI).

El diseño de la mezcla de control final, que refleja la dosificación óptima de los materiales empleados, se presenta en la **Tabla 2**. Las proporciones de los materiales fueron inicialmente determinadas siguiendo las recomendaciones de (ACI 237R-07, 2007) y (ACI 211.2-98, 1998), calibradas y evaluadas en estado fresco, y comparadas con los límites de aceptación definidos por (EFNARC, 2005). A través de un procedimiento repetitivo de prueba y calibración, se logró encontrar la dosificación óptima para las mezclas estudiadas.

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

El material cementante usado fue cemento Cemex Uso estructural (ART) Tipo HE según la norma (ASTM C1157, 2008), el cual a partir de evaluaciones realizadas ofrecía mejores resultados en resistencia y en los tiempos de fraguado adecuados para fundir las mezclas de concreto.

2.1.2 Agregados

Se utilizó arena de río con una granulometría controlada para garantizar que pasara por el tamiz No. 100 (150 μm) y no sobrepasara este límite, con el fin de no afectar la resistencia del concreto. Esta arena fue suministrada por Agregados Nacionales S.A.S., ubicada en el KM 4 de la vía Guamo-Saldaña, Colombia. La selección cuidadosa de la arena tuvo como objetivo asegurar una distribución de partículas que maximice la compacidad y la adherencia dentro de la matriz de cemento.



Asimismo, se utilizó grava triturada con un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19.05 mm), caracterizada por su forma angular y no redondeada, lo cual mejora la adherencia con la pasta de cemento y elimina las impurezas potenciales de la extracción del agregado grueso. Esta grava también fue suministrada por Agregados Nacionales S.A.S. La naturaleza angular de la grava triturada facilita una mejor interconexión mecánica entre las partículas de agregado y la pasta de cemento, lo que contribuye a la mejora de la resistencia y durabilidad del concreto.

2.1.3 Agregados ligeros

Se seleccionó la roca pómez como agregado liviano adicional debido a su capacidad para mejorar la resistencia del concreto y, al mismo tiempo, reducir su peso. La roca pómez, proporcionada por Bioespacio S.A.S., tiene una alta porosidad y una densidad baja, lo que contribuye significativamente a la reducción del peso del concreto. Las propiedades específicas de la roca pómez incluyen:

Porosidad: La roca pómez es altamente porosa, con una porosidad que puede alcanzar hasta el 85%. Esta característica le permite contribuir a una mejor aislación térmica y acústica del concreto.

Tamaño de Partícula: La roca pómez utilizada tenía un tamaño de partícula que varía entre 4.75 mm (tamiz No. 4) y 19 mm ($\frac{3}{4}$ de pulgada), lo que la hace adecuada para su uso como agregado grueso en la mezcla de concreto.

Densidad Aparente: La densidad aparente de la roca pómez oscila entre 0.6 g/cm^3 y 0.9 g/cm^3 , lo que ayuda a reducir la densidad total del concreto.

El poliestireno expandido fue escogido como agregado liviano en la investigación debido a sus propiedades de deformación y capacidades térmicas. Este material ligero, proporcionado por Districopor S.A.S., aporta las características necesarias para producir un concreto ligero. Las propiedades específicas del poliestireno expandido incluyen:

Tamaño de Partícula: Las partículas de poliestireno expandido tienen un tamaño que varía entre 2 mm y 3 mm.

Densidad Aparente: La densidad aparente del poliestireno expandido está entre 0.015 g/cm^3 y 0.035 g/cm^3 , lo que contribuye significativamente a la reducción del peso del concreto.

2.1.4 Aditivos

El aditivo reductor de agua de alto rango, Plastol HR-DF, se utilizó para la fabricación de concretos autocompactantes. Este aditivo, proporcionado por Toxement, mejoró la manejabilidad de las mezclas diseñadas, reduciendo su permeabilidad, aumentando la fluidez y las resistencias mecánicas del concreto.

2.2 Caracterización de los materiales

Los agregados fueron caracterizados siguiendo varios métodos estándar. Se realizó un análisis granulométrico conforme a la norma (ASTM C136, 2009) y se determinó la presencia de impurezas orgánicas en el agregado fino según (ASTM C40, 2011). Además, se evaluaron la densidad y la absorción del agregado fino y grueso utilizando los métodos (ASTM C128, 2015) y (ASTM C127, 2015). El contenido de humedad se midió siguiendo la norma (ASTM C566, 2013), mientras que la densidad volumétrica y el contenido de vacíos en los agregados se determinaron según (ASTM C29/29M, 2016). Finalmente, se llevó a cabo la determinación de partículas ligeras en los agregados de acuerdo con la norma (ASTM C123, 2004).

En cuanto al cemento, se realizaron varias pruebas para determinar sus propiedades. La finura se evaluó mediante el método de Blaine según (ASTM C204, 2007), y la densidad se determinó de



acuerdo con la norma (ASTM C1157, 2008). Los tiempos de fraguado se midieron según (ASTM C191, 2013) y la resistencia de los morteros de cemento se evaluó utilizando el método (ASTM C109, 2016). Estas caracterizaciones aseguran la calidad y adecuación de los materiales utilizados en el estudio.

2.3 Diseño de mezcla

A partir de la caracterización de los materiales se presentan en la **Tabla 2**, los diseños de mezcla óptimos para la muestra testigo y para los diferentes porcentajes de poliestireno expandidos de la investigación:

Tabla 2 Diseños de Mezcla

DISEÑO DE MEZCLA (Testigo)		DISEÑO DE MEZCLA Poliestireno (1%)	
MATERIAL	PESO (kg/m ³)	MATERIAL	PESO (kg/m ³)
Cemento (Cemex ART)	420	Cemento (Cemex ART)	430
Agua	157.95	Agua	157.95
Arena Rio	750	Arena Rio	660
Grava (3/4")	620	Grava (3/4")	520
Grava Pumita	0	Grava Pumita	35,1
Poliestireno	0	Poliestireno (1%)	1.5
Plastol Hr/Df (Toxement)	1.95	Plastol Hr/Df (Toxement)	1.95
Aire	4%	Aire	4%
TOTAL	1949.90	TOTAL	1806.50
DISEÑO DE MEZCLA Poliestireno (1,5%)		DISEÑO DE MEZCLA Poliestireno (2%)	
MATERIAL	PESO (kg/m ³)	MATERIAL	PESO (kg/m ³)
Cemento (Cemex ART)	430	Cemento (Cemex ART)	430
Agua	157.95	Agua	157.95
Arena Rio	660	Arena Rio	660
Grava (3/4")	510	Grava (3/4")	505
Grava Pumita	35.1	Grava Pumita	35.1
Poliestireno (1%)	2.25	Poliestireno (1%)	3
Plastol Hr/Df (Toxement)	1.95	Plastol Hr/Df (Toxement)	1.95
Aire	4%	Aire	4%
TOTAL	1797.25	TOTAL	1793.00

2.4 Pruebas al concreto Autocompactante y Ligero en estado Fresco (LWSCC)

Se realizaron pruebas reológicas indirectas para las mezclas de SCC en estado fresco, siguiendo la normativa (EFNARC, 2005). Estas pruebas incluyeron: prueba de flujo de asentamiento - (ASTM C1611/1611M, 2014), prueba del anillo J - (ASTM C1621, 2014), prueba de la caja en L (EFNARC, 2005), y prueba de segregación estática mediante la técnica de columna (ASTM C1610/1610M, 2014). Además, se efectuaron mediciones reológicas directas de las propiedades estáticas y dinámicas utilizando un reómetro ICAR 5000, conforme a la norma (German

Instruments, 2004).

Mediante el reómetro ICAR 5000, se realizaron dos experimentos principales: la prueba de crecimiento del esfuerzo y la prueba de la curva de flujo. La prueba de crecimiento del esfuerzo determina el esfuerzo de cedencia estático mediante el torque máximo necesario para que la mezcla comience a fluir bajo una velocidad de cizallamiento constante (German Instruments, 2004). El fabricante del reómetro recomienda usar 0.025 rev/s (rps) para concreto. El esfuerzo de cedencia se calculó utilizando la Ecuación (1),

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_i^2 h} \quad (1)$$

Donde, R_i es el radio del cilindro interno (m), R_o es el radio del cilindro externo o contenedor (m), h es la altura del cilindro interno (m), τ es el esfuerzo de cizallamiento teórico (Pa), T es el torque (N m) y N es la frecuencia de rotación (rps).

Por otro lado, las curvas de flujo se utilizan para establecer el esfuerzo de cedencia dinámico y la viscosidad plástica a través de datos de torque y velocidad de rotación de la paleta, aplicando un número específico de pasos de frecuencia de rotación decreciente.

El reómetro utilizado para las pruebas reológicas proporciona tres tipos de datos:

Tipo de datos 1: El esfuerzo de cedencia τ_0 (Pa) y la viscosidad plástica μ (Pa s) basados en el modelo de Bingham, obtenidos directamente mediante análisis interno del software del equipo.

Tipo de datos 2: Un punto promedio (N, T) para cada paso de frecuencia de rotación.

Tipo de datos 3: Varios valores de "velocidad actual" (o frecuencia de rotación N) y torque T para cada paso. A diferencia del tipo de datos 2, este tipo de datos proporciona varios puntos (N, T) para cada paso.

El tipo de datos 1 puede considerarse como parámetros reológicos dinámicos generales del material; sin embargo, un análisis más preciso y detallado puede realizarse utilizando el tipo de datos 3, aprovechando un conjunto amplio de puntos (N, T) y considerando los principios de operación del reómetro utilizado por (Gálvez, 2015) sugiere filtrar para descartar valores atípicos o puntos (N, T) fuera del rango de ± 1.5 veces la desviación estándar.

En esta investigación, los parámetros reológicos dinámicos se obtuvieron aplicando cada tipo de datos, basándose en los modelos de Bingham y Bingham modificado, considerando tanto el efecto del flujo de tapón (CPF) como sin considerarlo (NCPF). Además, se incluyó un caso simplificado para los tipos de datos 2 y 3 utilizando las ecuaciones de (Nehdi, 2004) (Ecuaciones (2) y (3)), que se aplicaron para convertir N a tasa de cizallamiento (γ) y T a esfuerzo de cizallamiento (τ)

$$\tau = \frac{(R_i^2 + R_o^2)}{4\pi h R_i^2 R_o^2} * T \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{(R_i^2 + R_o^2)(2\pi N)}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3)$$

Para considerar el efecto del flujo de llenado en el modelo de Bingham modificado, el método



propuesto en esta investigación se muestra en la Figura 3. Esto se basó principalmente en las ecuaciones de Reiner-Riwlin. La Tabla 3 muestra los casos analizados para la determinación de los parámetros reológicos dinámicos, considerando los efectos del tipo de datos, el modelo reológico, el flujo de tapón y las ecuaciones de Nehdi y Rahman.

Las ecuaciones y correlaciones utilizados para evaluar los parámetros reológicos se presentan a continuación, adoptadas de (Gómez Nemocón et al., 2022):

$$T = G + HN + CN^2 \quad (4)$$

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{4\pi h \ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)} * G \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{8\pi^3 h} * H \quad (6)$$

$$c = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}{8\pi^3 h} * \left(\frac{R_0 - R_i}{R_0 + R_i}\right) * C \quad (7)$$

Donde τ_0 es el esfuerzo de cedencia dinámico (Pa), μ es la viscosidad plástica (Pa s), c es el término de segundo orden en el modelo de Bingham modificado (Pa s²), y G, H y C son los términos constantes de la Ecuación (4).

$$R_s = \sqrt{\frac{T}{2\pi h \tau_0}} \quad (8)$$

$$T' = 4\pi h \ln\left(\frac{R_s}{R_i}\right) \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2}\right) \tau_0 + \frac{8\pi^2 h}{R_i^2 - R_s^2} \mu N + \frac{8\pi^3 h (R_s + R_i)}{R_i^2 - R_s^2 (R_s - R_i)} * CN^2 \quad (9)$$

$$\tau' = \frac{T'}{2\pi R_i^2 h} \quad (10)$$

$$\gamma_{corr} = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 - 4c(\tau_0 - \tau')}}{2c} \quad (11)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma_{corr} + c\gamma_{corr}^2 \quad (12)$$

Donde R_s es el radio del "flujo de llenado" (m) y γ_{corr} es la tasa de cizallamiento corregida (S⁻¹). Para materiales ajustados al modelo de Bingham modificado que no consideran el efecto del flujo de tapón, se usa el método mostrado en la Figura 3 hasta la aplicación de la Ecuación (7). Las



Ecuaciones (5), (6) y (7) son válidas bajo la suposición de que todo el fluido dentro del cilindro está fluyendo, es decir, $R_s = R_0$ para todos los pasos. De manera similar, para materiales ajustados al modelo reológico de Bingham que no consideran el efecto del flujo taponado, se usa el algoritmo mostrado en la Figura 4 hasta la aplicación de la Ecuación (15).

Para considerar el efecto del flujo de llenado en fluidos ajustados al modelo de Bingham, se deben considerar los datos mostrados en la Figura 4. Este método se basa en los modelos de (Feys & Asghari, 2019). Los parámetros correlacionados se presentan a continuación:

$$T = G + HN \quad (13)$$

$$\tau_0 = \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \frac{G}{4\pi h \ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)} \quad (14)$$

$$\mu = \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \frac{H}{8\pi^3 h} \quad (15)$$

Donde G y H son los términos constantes de la Ecuación (13).

$$\gamma_{corr} = \left(\frac{2}{R_i^2} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right)^{-1} \right) \left(2\pi N + \frac{\tau_0}{\mu_p} \ln\left(\frac{R_s}{R_i}\right) \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \quad (16)$$

2.5 Pruebas al concreto Autocompactante y Ligero en estado endurecido (LWSCC)

Los ensayos realizados al concreto ligero y autocompactante en estado endurecido se llevaron a cabo de acuerdo con las siguientes metodologías ASTM: ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M, 2016), resistencia a la flexión (ASTM C78/C78M, 2015), masa unitaria, rendimiento y contenido de aire por gravimetría (ASTM C138/C138M, 2016), módulo de elasticidad estático y relación de Poisson a compresión (ASTM C469, 2014), capacidad para resistir la penetración de iones cloruro (ASTM C1202, 2012) y ensayo de carbonatación (RILEM CPC-18, 1998)

3. RESULTADOS

3.1 Métodos indirectos

A partir de las metodologías adoptadas se obtienen los siguientes resultados en los métodos indirectos para el concreto autocompactable y ligero.





Fotografía 1 Ensayo de Caja L en LWSCC

Tabla 3. Resultados Muestras de concreto autocompactable y ligero en Flujo libre

Muestra No 1 testigo		Muestra (1% de poliestireno)		Muestra (1.5% de poliestireno)		Muestra (2% de poliestireno)	
Tiempo para alcanzar 50 cm		Tiempo para alcanzar 50 cm		Tiempo para alcanzar 50 cm		Tiempo para alcanzar 50 cm	
Tiempo (s)	3	Tiempo (s)	2	Tiempo (s)	2	Tiempo (s)	4
Tiempo para estabilizar el flujo		Tiempo para estabilizar el flujo		Tiempo para estabilizar el flujo		Tiempo para estabilizar el flujo	
Tiempo (s)	58	Tiempo (s)	55	Tiempo (s)	58	Tiempo (s)	69
Diámetros finales		Diámetros finales		Diámetros finales		Diámetros finales	
Diámetro 1 (cm)	72	Diámetro 1 (cm)	65	Diámetro 1 (cm)	63	Diámetro 1 (cm)	58
Diámetro 2 (cm)	68	Diámetro 2 (cm)	64	Diámetro 2 (cm)	61	Diámetro 2 (cm)	55
Diámetro promedio (cm)	70	Diámetro promedio (cm)	64.5	Diámetro promedio (cm)	62	Diámetro promedio (cm)	56.5

Tabla 4. Resultados Muestras de concreto autocompactable y ligero - Caja L

Muestra No 1 testigo		Muestra (1% de poliestireno)		Muestra (1.5% de poliestireno)		Muestra (2% de poliestireno)	
Alturas resultantes		Alturas resultantes		Alturas resultantes		Alturas resultantes	
Ho (mm)	161	Ho (mm)	162	Ho (mm)	155	Ho (mm)	141
Hx (mm)	143	Hx (mm)	140	Hx (mm)	149	Hx (mm)	138
Relación (Hx/Ho)	0,89	Relación (Hx/Ho)	0,86	Relación (Hx/Ho)	0,96	Relación (Hx/Ho)	0,98

Tabla 5. Resultados Muestras de concreto autocompactable y ligero – Anillo J

Resultados Flujo restringido Anillo J							
Muestra No 1 testigo		Muestra (1% de poliestireno)		Muestra (1.5% de poliestireno)		Muestra (2% de poliestireno)	
J1 (mm)	690	J1 (mm)	650	J1 (mm)	610	J1 (mm)	525
J2 (mm)	695	J2 (mm)	618	J2 (mm)	570	J2 (mm)	510
Promedio (mm)	692.5	Promedio (mm)	634	Promedio (mm)	590	Promedio (mm)	517.5
Resultados obtenidos en flujo libre							
D1 (mm)	720	D1 (mm)	650	D1 (mm)	630	D1 (mm)	580
D2 (mm)	680	D2 (mm)	640	D2 (mm)	610	D2 (mm)	550
Diámetro promedio (cm)	700	Diámetro promedio (cm)	645	Diámetro promedio (cm)	620	Diámetro promedio (cm)	565

Diferencia [Ext. - Ext. A.J.] (mm)	Muestra No 1 testigo	Muestra (1% de poliestireno)	Muestra (1.5% de poliestireno)	Muestra (2% de poliestireno)
Tipo de bloqueo	7.5	11	30	47.5
Tipo de bloqueo	Sin bloqueo visible	Sin bloqueo visible	Bloqueo mínimo a notable	Bloqueo mínimo a notable

Tabla 6. Resultados Muestras de concreto autocompactable y ligero – Escurrimiento y Embudo V

Mezcla de concreto	Escurrimiento		Embudo V
	Df (mm)	T500 (s)	Tv (s)
Muestra testigo	674	1,5	4,6
1% de poliestireno	669	1,2	3,7
1.5% de poliestireno	673	1,8	7,6
2% de poliestireno	681	2,1	10,5

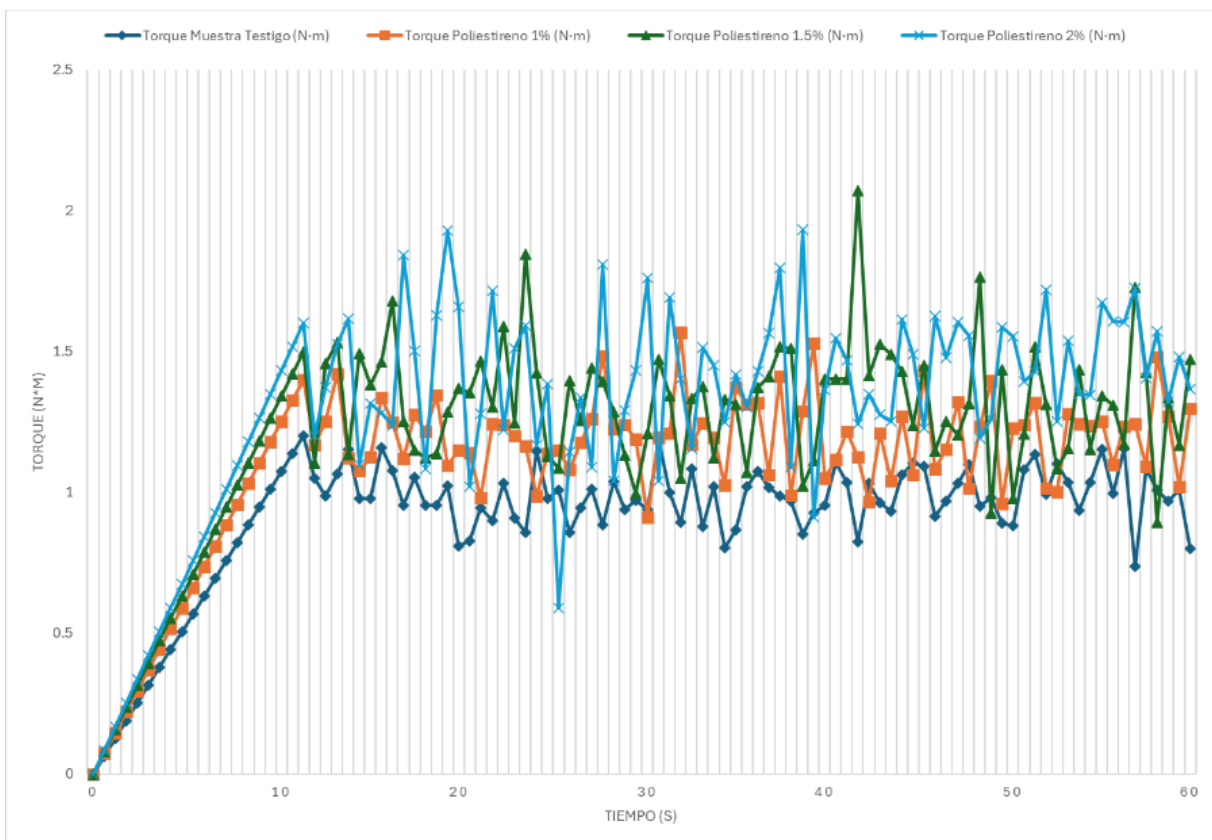


3.2 Métodos Directos

A partir de los Modelos reológicos evaluados y los parámetros hallados a partir del reómetro ICAR 5000 Plus se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7 Parámetros reológicos dinámicos finales de las mezclas Testigo y Mezclas con poliestireno expandido

Mixture	τ_0 (Pa)	μ (Pa·s)	c (Pa·s ²)	R ²	Case
Testigo	48.92	48.03	1.549	0.9961	Tipo de datos "2" CPF según el modelo de Bingham modificado
Poliestireno 1%	60.23	40.02	1.2	0.9972	Tipo de datos "3" NCPF según el modelo de Bingham modificado
Poliestireno 1.5%	85.45	35	0.95	0.9985	Tipo de datos "3" NCPF según el modelo de Bingham modificado
Poliestireno 2%	110.67	30.2	0.8	0.999	Tipo de datos "3" NCPF según el modelo de Bingham modificado



Gráfica 2 Curva de ajuste del límite elástico estático en las mezclas Control y Muestras con diferentes porcentajes de poliestireno expandido

3.3 Resultados en Estado Endurecido (LWSCC)

A partir de los ensayos realizados en estado endurecido se obtuvieron los siguientes resultados:



Fotografía 2 Evaluación de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión en LWSCC.

Tabla 8 Resultados Obtenidos en estado endurecido (LWSCC)

Edad	Propiedad	Mezcla Control	Mezcla Poliestireno 1%	Mezcla Poliestireno 1.5%	Mezcla Poliestireno 2%
7 días	Resistencia a compresión (MPa)	7.79	7.06	5.65	4.66
28 días	Resistencia a compresión (MPa)	24.39	22.95	18.28	8.91
	Masa Unitaria (Kg/m ³)	2364	1851	1832	1796
28 días	Módulo de Young (MPa)	16,578	15,897	14,322	13,958
28 días	Relación de Poisson	0.21	0.15	0.16	0.17
28 días	Resistencia a tracción (MPa)	2.72	2.68	2.51	2.33
28 días	Resistencia a flexión (MPa)	3.6	3.2	2.8	2.1
28 días	Coefficiente de migración de iones de cloruro (x10 ⁻¹² m ² /s)	11.8	12.2	12.8	13.3

4. CONCLUSIONES

- Las mezclas con 1% de poliestireno expandido cumplen con los criterios de trabajabilidad y flujo para ser consideradas como concretos autocompactables (según EFNARC, 2005).
- Un mayor contenido de poliestireno incrementa la viscosidad y el tiempo de escurrimiento, afectando negativamente la trabajabilidad. Las mezclas con 2% de poliestireno presentaron el mayor esfuerzo de cedencia dinámico (110.67 Pa) y la menor viscosidad plástica (30.2 Pa·s), sugiriendo mayor resistencia al flujo inicial pero menor estabilidad una vez iniciado.
- La resistencia a compresión disminuye significativamente con el aumento del contenido de poliestireno. La mezcla de control alcanzó 24.39 MPa, mientras que la mezcla con 2% de poliestireno solo alcanzó 8.91 MPa.

- El módulo de Young y la relación de Poisson se reducen con mayor contenido de poliestireno, indicando menor rigidez y mayor deformabilidad. La mezcla de control mostró un módulo de Young de 16,578 MPa y una relación de Poisson de 0.21, mientras que la mezcla con 2% de poliestireno tuvo 13,958 MPa y 0.17, respectivamente.
- Tanto la resistencia a tracción (2.72 MPa) como a flexión (3.6 MPa) en la mezcla de control disminuyen a 2.33 MPa y 2.1 MPa, respectivamente, en la mezcla con 2% de poliestireno.
- El coeficiente de migración de iones de cloruro aumenta con el contenido de poliestireno, lo que sugiere una menor durabilidad en ambientes agresivos. La mezcla de control presentó un coeficiente de $11.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que la mezcla con 2% de poliestireno alcanzó $13.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

5. AGRADECIMIENTOS

Julian David Puerto Suarez: Metodología, Conceptualización, Validación, Edición del proyecto.
Alejandro Duran Herrera: Edición del proyecto, Redacción, revisión y edición, Supervisión.
Universidad Nacional de Colombia: Equipos y laboratorios.
Universidad Autónoma de Nuevo León: Recursos Bibliográficos y análisis de Datos.

6. REFERENCIAS

- ACI 211.2-98, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete 1 (1998).
- ACI 237R-07, Self-Consolidating Concrete-American Concrete Institute (2007).
- ASTM C29/29M, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate (2016). https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-16
- ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2016). https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-16
- ASTM C40, Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete (2011). https://doi.org/10.1520/C0040_C0040M-11
- ASTM C78/C78M, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (2015). https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-15B
- ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) (2016). https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-16
- ASTM C123, Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate (2004). www.astm.org
- ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (2015). <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (2015). <https://doi.org/10.1520/C0128-15>
- ASTM C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2009). https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle (2013).
- ASTM C204, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus (2007). www.astm.org,



- ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (2014). https://doi.org/10.1520/C0469_C0469M-14
- ASTM C566, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying (2013). <https://doi.org/10.1520/C0566-13>
- ASTM C1157, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement (2008).
- ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (2012). <https://doi.org/10.1520/C1202-12>
- ASTM C1610/1610M, Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique (2014). https://doi.org/10.1520/C1610_C1610M-14
- ASTM C1611/1611M (2014). https://doi.org/10.1520/C1611_C1611M-14
- ASTM C1621, Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring (2014). https://doi.org/10.1520/C1621_C1621M-14
- C138/C138M, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete (2016). https://doi.org/10.1520/C0138_C0138M-16
- EFNARC, Specification, Production and Use (2005). www.efnarc.org
- Feys, D., & Asghari, A. (2019). Influence of maximum applied shear rate on the measured rheological properties of flowable cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 117, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.003>
- Gálvez, D. (2015). *Robustez de un concreto autocompactable producido con materiales disponibles en la región de Monterrey, Nuevo León*. UANL.
- German Instruments. (2004). *ICAR Plus*.
- Gesoglu, M., Güneysi, E., Ozturan, T., Oz, H. O., & Asaad, D. S. (2015). Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 79, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.012>
- Gil, A. M., Khayat, K. H., & Tutikian, B. F. (2019). An experimental approach to design self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116939>
- Gómez Nemocón, S. A., Lizarazo Marriaga, J. M., & Puerto Suárez, J. D. (2022). Rheological and hardened properties of self-compacting concrete using hollow glass microspheres as a partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128012>
- Hassan, A. A. A., Ismail, M. K., & Mayo, J. (2015). Mechanical properties of self-consolidating concrete containing lightweight recycled aggregate in different mixture compositions. *Journal of Building Engineering*, 4, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.09.005>
- Kaffetzakis, M., & Papanicolaou, C. C. (2016a). Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology. *Construction and Building Materials*, 123, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.012>
- Kaffetzakis, M., & Papanicolaou, C. C. (2016b). Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology. *Construction and Building Materials*, 123, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.012>
- Mashhadban, H., Kutanaei, S. S., & Sayarinejad, M. A. (2016). Prediction and modeling of mechanical properties in fiber reinforced self-compacting concrete using particle swarm optimization algorithm and artificial neural network. *Construction and Building Materials*, 119, 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.034>
- Nehdi, M. L. (2004). Effect of geometry and surface friction of test accessory on oscillatory rheological properties of cement pastes. *Article in ACI Materials Journal*, 101(5), 3–4.



<https://www.researchgate.net/publication/285726793>

Report on measurements of workability and rheology of fresh concrete. (2008). American Concrete Institute.

RILEM CPC-18, Measurement of hardened concrete carbonation depth (1998).

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use “The European Guidelines for Self Compacting Concrete.” (2005). www.efnarc.org





Explorando la aplicación de alginato de sodio como aditivo de modificación y control reológico de pastas de cal

F. M. León-Martínez^{1*}, P. F. de J. Cano-Barrita¹, L. Medina-Torres²,
F. Castellanos¹, D. Soto-Castro¹

*Autor de Contacto: fmleonm@ipn.mx

¹ CIIDIR Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

² Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

RESUMEN

El uso de aditivos en la industria de los materiales de construcción, específicamente en materiales vernáculos como la cal aérea, son de interés especial debido a características de adhesividad y desarrollo de resistencia mecánica. Trabajos de restauración con este tipo de materiales incluyen el uso de bioaditivos como el mucílago de cactus. En este trabajo se exploró el uso de alginato de sodio obtenido del sargazo pelágico como potencial modificador reológico de pastas de cal. Se determinó el esfuerzo de fluencia en flujo mediante pruebas de recuperación del esfuerzo cortante. Por otro lado, se realizaron pruebas de trabajabilidad por flujo de asentamiento utilizando réplicas a escala del cono de Abrams. Los resultados mostraron que las pastas exhiben un comportamiento típico de un fluido plástico, siendo el esfuerzo de fluencia proporcional a la concentración de alginato usado en la mezcla. Así mismo, las muestras presentaron un comportamiento de geles rígidos ($G' > G''$). El flujo de asentamiento fue inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia. De esta manera, se observó que el alginato fue capaz de interactuar y formar redes tridimensionales estables con las cales, vislumbrando su potencial aplicación como bioaditivo reológico.

Palabras clave: Sargazo; Reología; Gel; Restauración.

1. INTRODUCCIÓN

Determinar y considerar las propiedades reológicas de materiales de construcción es crucial, debido a que de ellas depende su estabilidad, capacidad de bombeo, vaciado y propiedades en estado endurecido. Ejemplo de ello, son los morteros de cal, ya que su uso para la restauración de monumentos históricos requiere de garantizar su efectividad. Durante el proceso de carbonatación, la cal hidratada reacciona con el CO_2 disuelto en el agua para formar cristales de CaCO_3 , produciendo de esta manera su resistencia. Históricamente, la cal ha sido uno de los adhesivos más importantes, como, por ejemplo, su uso en Palestina y Turkia hace 12000 años A.C. (Elert et al., 2000). Aditivos que por su función mejoran la fluidez del material, incrementan la cohesión y viscosidad de la mezcla, son denominados “aditivos modificadores de comportamiento reológico”. Una de las propiedades reológicas que afectan la trabajabilidad del material es el esfuerzo de fluencia. El uso de mucílago de nopal es ampliamente usado para mejorar la viscosidad de mezclas, además permite mejorar la resistencia y durabilidad del material una vez endurecido (León-Martínez et al., 2014; Hernández et al., 2017).

Los biopolímeros son macromoléculas obtenidas a partir de organismos vivos que incluyen proteínas, polisacáridos y ácidos nucleicos. Dentro de esta diversidad de componentes de la biomasa existen algunos polisacáridos que han sido objeto creciente de estudio en diferentes áreas debido a las características fisicoquímicas y propiedades funcionales que presentan. Uno de estos es el alginato, el cual es un polisacárido obtenido a partir de algas pardas formado químicamente por unidades de ácido β -D-manurónico y α -L-gulurónico ligados mediante enlaces (1 \rightarrow 4) en diferentes secuencias de residuos, lo que lo hace una molécula polidispersa y de carácter poli-aniónico al ser disuelto en agua (Ore B. et al., 2020; Valentin et al., 2006). Su entrecruzamiento se puede producir por interacción catiónica entre sus bloques de composición química. La longitud y proporción del bloque GG (residuos gulurónicos) determina sus propiedades del gel iónico. También puede entrecruzarse por precipitación ácida, donde se estabiliza por puentes de hidrógeno y los geles producidos son más homogéneos.

Con base en los estudios realizados por Afzal et al., (2018), las propiedades reológicas y de encapsulación de hidrogeles compuestos de quitosano y alginato de sodio pueden ser controlados mediante variaciones en la proporción de ambos polímeros. El alginato ha sido utilizado en diferentes áreas, como la industria alimenticia, farmacéutica, agricultura, tratamiento de aguas residuales, etc. Esta versatilidad de aplicaciones proviene de las propiedades funcionales que lo hacen atractivo, tales como su capacidad espesante, estabilizante, gelificante, también como componente para matrices de encapsulación y de absorción de componentes, así como material para impartir textura a diversos alimentos, entre muchas otras propiedades (Gheorghita et al., 2020).

El alginato comercial se obtiene de algas pardas marinas tales como la *Laminaria Hyperborea*, *Laminaria digitata*, *Macrocystis pyrifera*, y bacteritas como *Azotobacter vinelandii*, *Pseudomonas aeruginosa*, entre otras (Murugappan et al., 2022). Una fuente potencial de estos polisacáridos es el sargazo pelágico de macroalgas flotantes, que actualmente se ha convertido en un problema ecológico debido a las oleadas naturales de alta producción en las costas del Caribe Mexicano, donde tan solo en el año 2015 se invirtieron \$ 3.3 millones de dólares para la limpieza y extracción del sargazo (Leal-Bautista, et al., 2020).

Sin embargo, aunque su utilidad y explotación comercial se observa con potencial debido al contenido de alginatos, fucoidan y agar, su utilidad se ve comprometida debido a la bioadsorción



de metales pesados por estos compuestos que son tóxicos en una baja concentración para el ser humano y fauna (ejemplo: As, Pb y Cd), además que su producción natural conlleva flujos irregulares anuales, por lo que su disponibilidad no puede ser garantizada para la industria (López Miranda et al., 2021). Estos elementos tóxicos pueden ser atrapados en la red de hidrato de silicato de calcio del cemento Portland al reaccionar con el agua, y de esta manera retenerse, eliminando el problema de su disponibilidad en el ambiente.

Por lo anteriormente mencionado, en este proyecto se extrajo alginato de sodio de muestras de sargazo colectado en Playa del Carmen, Quintana Roo, México en mayo de 2022. Este alginato se utilizó a distintos niveles de concentración en porcentaje masa de alginato seco por masa de cal hidráulica, a distintos niveles de relación agua/cementante.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1. Material

Se utilizó agua destilada y cal hidratada de la marca CALHIDRA con pureza de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del 75-85 %. Se realizó la prueba de densidad de acuerdo con la norma ASTM C 188-09 utilizando 50 g de muestra de cal hidráulica con alcohol isopropílico a una temperatura de 25 °C, resultando una densidad de 2.31 g/mL.

2.2. Preparación de la biomasa para la obtención de alginato

El alga parda fue facilitada por el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán. Se recibieron especies de *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* recolectadas en la playa, la biomasa fue lavada con agua purificada y se deshidrató a 60 °C durante 30 h, posteriormente se pulverizó en un molino mezclador eléctrico. El producto final quedó con un contenido de humedad 14.7 %bs.

2.3. Extracción ácida/alcalina de alginato de sodio

La extracción de alginato se realizó con base en la metodología de Fenoradosa et al., (2009). A 25 g de sargazo seco y molido se le añadieron 800 mL de solución de formaldehído al 2 % (V/V) por 24 h. Posteriormente, el sargazo fue lavado con agua purificada y se dejó en agitación con una solución de H_2SO_4 al 0.2 M por 24 h. Al finalizar este tiempo, la muestra se lavó nuevamente con agua purificada y finalmente el alginato de sodio fue extraído agregándole solución de Na_2CO_3 al 2% calentado a 90 °C durante 3 h.

Finalmente, el alginato fue obtenido por precipitación con solvente, utilizando 3 volúmenes de etanol al 95 %, las fibrillas de alginato de sodio así obtenidas fueron retiradas del solvente por filtración al vacío con papel de filtración de poro mediano (4 μm) y secadas a 60 °C durante 24 h, para finalmente molerse en un mortero de ágata y obtener un polvo fino.

2.4. Caracterización del alginato por espectroscopía de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR)

El espectro de infrarrojo fue colectado en un espectrómetro de FTIR Nicolet 6700 (Thermo Scientific, EUA) equipado con un cristal de diamante y ZnSe. Se colocaron aproximadamente 200 mg de alginato de sodio previamente blanqueado con una solución de hipoclorito de sodio al 10 % y secado a 60 °C. El espectro fue adquirido en el rango de número de onda de 4000 a 650 cm^{-1} a temperatura ambiente y con 64 escaneos.



2.5. Elaboración de los especímenes de pasta de cal

Las pastas de cal se elaboraron con una relación agua/cal hidráulica en peso=1. Se prepararon pastas control que no contenían aditivo para cada relación a/c y para el caso de las pastas conteniendo alginato de sodio obtenido de sargazo, primero se disolvió y preparó una solución madre concentrada (en p/v) mediante un agitador mecánico RW20 (IKA) y una propela de 3 hélices a 600 rpm durante 1.5 h antes de su uso. Posteriormente, se tomaron alícuotas de esta solución madre y se obtuvieron 4 concentraciones diluidas para obtener 4 niveles distintos de concentración respecto a la masa del cementante: 0.05, 0.136, 0.369, 1.004 g de alginato por cada 100 g de cementante. El mezclado de la pasta se realizó con el mismo agitador mecánico durante 5 minutos, iniciando con el pesaje de la solución y la cal, posteriormente se agregó la cal al agua lentamente durante el primer minuto a una velocidad de 260 rpm, culminado ese tiempo, se incrementó la velocidad a 1000 rpm.

2.6. Nivel de sangrado estático y flujo de asentamiento

El nivel de sangrado estático fue determinado por volumetría, empleando 3 probetas de vidrio graduadas de 10 mL, a una temperatura ambiente de ~ 25 °C. Para ello, inmediatamente después de haber concluido con el mezclado de la pasta, se vació cuidadosamente con la ayuda de un cono y una espátula de acero inoxidable la cantidad de 10 mL de pasta en cada una de las probetas. Una vez aforado el volumen de pasta, se colocó una cubierta de Parafilm y se comenzó a contabilizar el tiempo de la prueba. El nivel de sangrado estático fue registrado como la cantidad de agua separada en la parte superior de la probeta a dos tiempos de medición, correspondientes a 60 y 120 min. Posteriormente se calculó el porcentaje de sangrado con base en el volumen inicial de pasta.

La prueba de asentamiento se realizó colocando un mini-cono impreso en 3D con filamento de ácido poliláctico, el cual tiene las siguientes dimensiones internas: diámetro mayor de 37.5 mm, diámetro menor de 19.1 mm, y altura 56.9 mm. El mini-cono se colocó sobre la superficie plana y nivelada de una placa de acrílico. Se llenó el cono en dos capas, se apisonó la pasta usando una espátula de acero inoxidable, mediante 25 varilladas por sección espacialmente distribuidas, esto con el fin de retirar la mayor parte de aire atrapado. Al finalizar el llenado, se enrasó la parte superior y se retiró el excedente de la pasta en la superficie del molde. El molde se levantó lentamente de forma perpendicular a la superficie de la placa, para permitir el flujo del gel sobre la superficie. Al finalizar el flujo, con un vernier digital Mitutoyo 500-754-10 (Mitutoyo, Kanagawa, Japón) con un rango de 0-300 mm y una resolución de 0.01 mm se midió el diámetro de extensión de flujo D en 2 direcciones perpendiculares una de la otra, así como la altura final h después del flujo al centro del cono. La altura de asentamiento se obtuvo restando la altura inicial de la muestra H menos la altura final h. Estas pruebas se realizaron por triplicado.

2.7. Mediciones reológicas

Las pruebas se realizaron por triplicado por cada muestra en un reómetro de esfuerzos controlados Physica MCR301 (Anton Paar, Austria), usando una geometría de platos paralelos de 25 mm de diámetro. A las superficies de medición de ambos platos se les adhirió, mediante una cinta de doble cara, papel lija de 80 μm de rugosidad nominal (Grupo Fandeli, S.A. de C.V., México) para evitar el efecto de deslizamiento en pared. La separación entre platos durante las mediciones fue de 1 mm y la temperatura fue mantenida constante a 25 °C mediante un sistema Peltier (Anton Paar GmbH, Austria) con un baño de recirculación con agua (Julabo GmbH, Alemania). La exactitud y precisión de las mediciones con la geometría modificada fue evaluada mediante aceites



viscosimétricos de silicona con viscosidad conocida de 970 cP y 105760 cP (Brookfield Ametek) y mediante una muestra viscoelástica estándar (Anton Paar GmbH, Austria) con un valor de viscosidad compleja (η) de 1017 Pa·s y punto de cruce (módulo elástico G' = módulo viscoso G'') de 126 Pa.

Para poder mantener la muestra sin cambios durante el tiempo de medición debido al secado de la superficie expuesta al ambiente, se construyó una trampa de humedad con aire húmedo, empleando un humidificador de aire ambiental por burbujeo y un armazón de plástico fabricado por impresión 3D.

El esfuerzo de fluencia se midió aplicando una prueba de recuperación del esfuerzo cortante (Stress-Growth), la cual consistió en aplicar a la muestra un precorte con una velocidad de 30 s^{-1} durante un período de 200 s, enseguida se dejó en reposo por 60 s, después se aplicó una velocidad de corte a un valor de 0.01 s^{-1} y se mantuvo esta velocidad de corte durante un periodo de 250 s, durante el cual se monitoreó la evolución del esfuerzo cortante. Mediante esta curva se calculó el valor de esfuerzo de fluencia estático, considerando un punto de inflexión en la curva del 10 %.

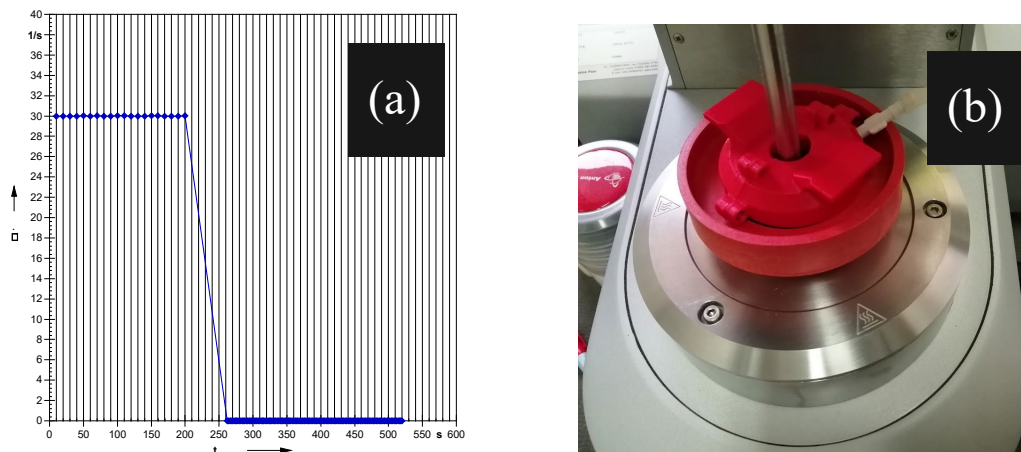


Figura 1. Protocolo de la aplicación de velocidad de corte (a) y trampa de vapor para mantener el ambiente húmedo durante la medición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se extrajo y caracterizó alginato de sodio de muestras de sargazo colectado en la playa. El rendimiento de alginato de sodio obtenido fue 11.6 %, con un contenido de humedad del 14.7 %bs.

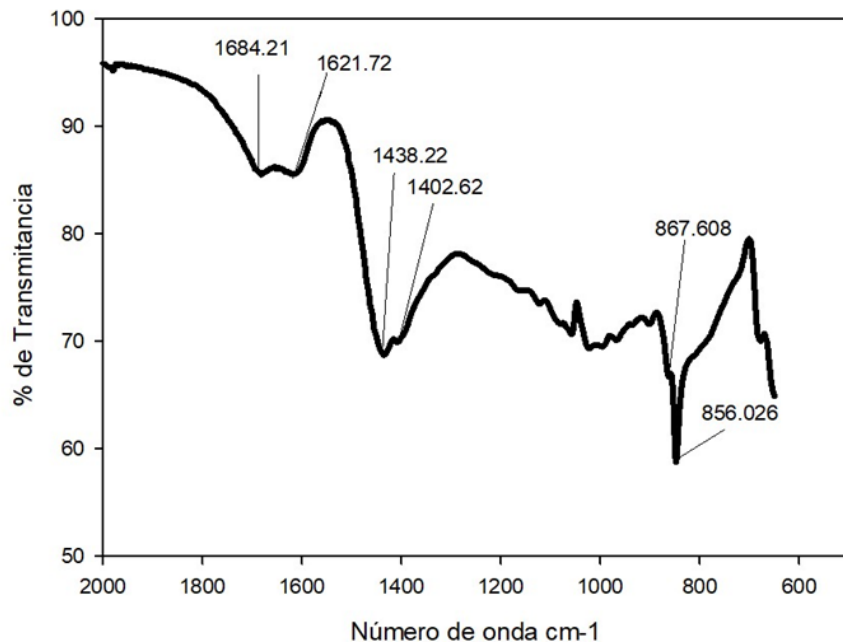


Figura 2. Espectro de FTIR de la muestra de alginato SP posterior al proceso de blanqueado.

El espectro de infrarrojo obtenido se muestra en la Figura 2. En este se indican las bandas de absorción características obtenidas para el alginato las cuales son a 1684.2 cm^{-1} y 1621.7 cm^{-1} correspondientes a la vibración de estiramiento simétrico del grupo carboxilato (COO^-) presentes en los ácidos urónicos, que son parte estructural de las cadenas poliméricas de los alginatos. Las bandas intensas indicadas en 1438.2 cm^{-1} y 1402.6 cm^{-1} se asocian a señales características de vibraciones antisimétricas del mismo grupo (COO^-). Principalmente, se resalta la presencia de las señales de las bandas en 867.6 y 856.0 cm^{-1} características en el rango de la huella dactilar reportada en el alginato obtenido a partir del alga *Macrocystis pirifera* relacionadas a las deformaciones del anillo de piranosa de ácido manurónico y ácido gulurónico. Estudios experimentales y teóricos concluyen que los bloques gulurónicos (GG) son más rígidos que los bloques manurónicos (MM), mientras los bloques heteropoliméricos son más flexibles (Mohammed et al. 2020).

El esfuerzo de fluencia fue dependiente de la concentración de alginato de sodio, observándose que el esfuerzo cortante máximo tiende a aumentar conforme se incrementa la concentración (Figura 3), indicando un efecto rigidizante, haciendo la mezcla menos trabajable. Esto se podría explicar debido a que las cadenas poliméricas permiten formar redes tridimensionales entre las cadenas poliméricas y los iones de calcio en solución, permitiendo formar partículas de hidrogel que retienen el agua, reduciendo la lubricación entre partículas de CaOH_2 y generando una pasta más rígida.

Por otro lado, el asentamiento y el diámetro de fluidez disminuyen conforme se incrementó la concentración, siendo mínimo cuando se utilizó la máxima concentración probada de alginato de sodio en la pasta con cal hidráulica. Este efecto puede verse claramente en la imagen correspondiente al diámetro de flujo de asentamiento de las mezclas con cal presentados en la Figura 4. Algo que fue notorio en este tipo de pastas, es que el nivel de sangrado es menor al 2%. Los resultados indican que el alginato es capaz de interactuar con los iones divalentes de carga

positiva en la pasta de cal, formando interacciones fuertes y generando entrecruzamientos iónicos entre las cadenas poliméricas, generando así una estructuración de sólido débil “gel”, que permitió al material disminuir su trabajabilidad e incrementar la cohesión y estabilidad de la mezcla (Pamies et al. 2010). Este tipo de efecto es útil en ciertas circunstancias de uso de los materiales, tales como el colado bajo agua, lanzamiento y aplanado de mortero e impresión 3D de concreto por extrusión fría.

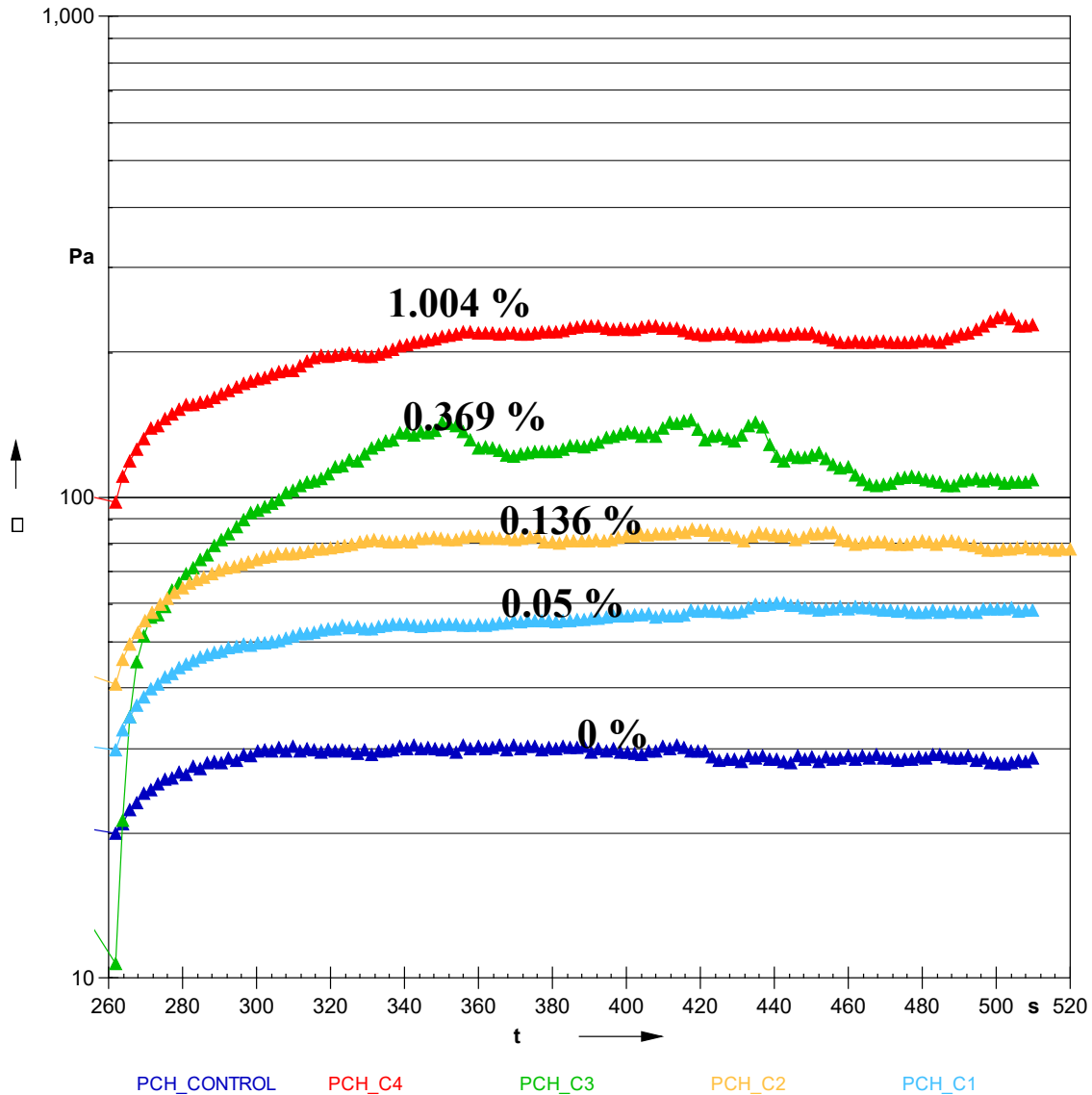


Figura 3. Evolución del esfuerzo cortante para las pastas de cal hidráulica con relación a/c=1. La concentración del alginato se expresa en g de aditivo seco por cada 100 g de cal (% m/m).



Figura 4. Diámetro de extensibilidad (fluidez) de las pastas de cal hidráulica después de ejecutar la prueba de flujo de asentamiento para las pastas de cemento con relación a/c=1. La concentración del aditivo se expresa en gramos de aditivo seco por cada 100 g de cal (% m/m).

Los resultados permiten visualizar al alginato de sodio obtenido de una fuente renovable y que actualmente es un desecho peligroso como un candidato a ser un bioaditivo de materiales cementantes. La Figura 5 presenta el comportamiento del diámetro de extensibilidad (fluidez) y el nivel asentamiento respecto a la concentración de alginato de sodio para las pastas de cal. Se observó una dependencia lineal del nivel de asentamiento respecto a la concentración y una dependencia no lineal del tipo exponencial para el diámetro de fluidez. Este tipo de relación ha sido observada por Roussel et al. (2005 a y b).

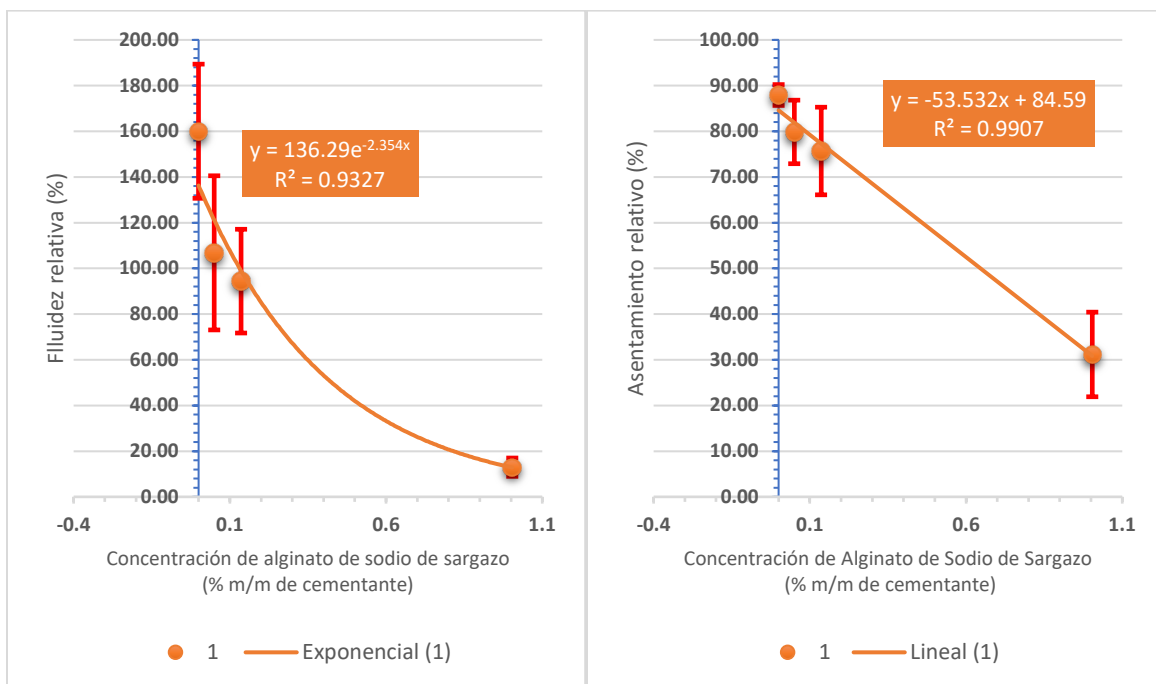


Figura 5. Efecto de la concentración de alginato de sodio de sargazo sobre la fluidez y asentamiento relativos de las pastas de cal hidráulica. La concentración del aditivo se expresa en g de aditivo seco por cada 100 g de cal (% m/m).

4. CONCLUSIONES

Se probó la extracción de alginato de sodio de muestras de sargazo colectado en Playa del Carmen, Quintana Roo. El rendimiento del alginato fue de 11.6 % y se generó un polvo con un contenido de humedad de 14.7 %bs, presentando un espectro de FTIR con vibraciones características del biopolímero ya antes descrito para otras especies de algas pardas. El alginato previamente disuelto en el agua de mezclado se usó para formar pastas con cal hidratada. Se observó un efecto rigidizante del alginato de sodio en la pasta, incrementando el esfuerzo de fluencia, y disminuyendo los parámetros de flujo semi-empíricos de la prueba de asentamiento en cono truncado por su propio peso, siendo mayor el efecto al incrementar la concentración de alginato.

5. REFERENCIAS

- Afzal S., Maswal M., Dar A. A. (2018). Rheological behavior of pH responsive composite hydrogels of chitosan and alginate: Characterization and its use in encapsulation of citral. *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, 169: 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.05.002>
- Elert K., Rodriguez-Navarro C., Sebastian-Pardo E., Hansen E., Cazalla O. (2000). Lime mortars for the conservation of historic building. *Studies in construction* 47:62-75. <https://doi.org/10.2307/1506835>
- Fenoradosoa T. A., Ali G., Delattre C., Laroche C., Petit E., Wadouachi A., Michaud P. (2009). Extraction and characterization of an alginate from the brown seaweed *Sargassum turbinarioides* Grunow. *Journal of Applied Phycology*, 22(2):31-137. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9432-y>
- Gheorghita P. R., Lobiuc A., Dimian M., Covasa M. (2020). Alginate: From food industry to biomedical applications and management of metabolic disorders. *Polymers* 12:2417. <https://doi.org/10.3390/polym12102417>
- Hernández E. F., Cano-Barrita P. F. de J., León-Martínez F. M., Torres-Acosta A. A. (2017). Performance of cactus mucilage and brown seaweed extract as a steel corrosion inhibitor in chloride contaminated alkaline media. *Anti-Corrosion Methods Mater*, 64. doi:10.1108/ACMM-02-2016-1646.
- Leal-Bautista R. M., Tapia-Tussel R., Alzate-Gaviria L. (2020). Usos potenciales del sargazo. *Rev. La Acad. Mexicana Ciencias* 71:52-7.
- León-Martínez F. M., Cano-Barrita P. F. de J., Lagunez-Rivera L., Medina-Torres L. (2014). Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. *Constr. Build. Mater.* 53:109-202. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068.
- López Miranda J. L., Celis L. B., Estévez M., Chávez V., van Tussenbroek B. I., Uribe-Martínez A. (2021). Commercial potential of pelagic *Sargassum* spp. in Mexico. *Front. Mar. Sci.* 8:1-16. doi:10.3389/fmars.2021.768470.
- Mohammed A., Rivers A., Stuckey D. C., Ward K. (2020). Alginate extraction from *Sargassum* seaweed in the Caribbean region: Optimization using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 245:116419.
- Murugappan V., Muthadni A. (2022). Studies on the influence of alginate as a natural polymer in mechanical and long-lasting properties of concrete - A review. *Materials Today: Proceedings* 65:839-845. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.424>
- Ore B. Y., Pichilingue L. E. R., Valderrama Negrón A. C. (2020). Extracción y caracterización del



- alginato de sodio de la macroalga *Macrocystis pyrifera*. Rev. Soc. Quím. Perú, 86:276–287. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v86i3.300>
- Pamies R., Schmidt R. R., López Martínez M. del C., García de la Torre J. (2010). The influence of mono and divalent cations on dilute and non-dilute aqueous solutions of sodium alginates, Carbohydrate Polymers, 80:248-253.
- Roussel N., Coussot P. (2005a). “Fifty-cent rheometer » for yield stress measurements: From slump to spreading flow. J. Rheology, 49(3):705-718.
- Roussel N., Stefani C., Leroy R. (2005b). From mini-cone test to Abrams cone test: measurements of cement-based materials yield stress using slump tests. Cement and Concrete Research, 35:817-822.
- Valentin R, Horga R, Bonelli B, Garrone E, Di Renzo F, Quignard F. (2006). FTIR spectroscopy of NH₃ on acidic and ionotropic alginate aerogels. Biomacromolecules, 7:877–82. <https://doi.org/10.1021/bm050559x>





Reutilización de residuos industriales como agregado fino para morteros ecológicos

R. U. Morales-Rojas¹, A. A. Olivera*², V. G. Jiménez-Quero³,
P. M. Gallegos-Acevedo⁴, J. M. Espinoza-Cuadra⁴, P. Montes-García³

*Autor de Contacto: aolivera1500@alumno.ipn.mx

¹ Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Oaxaca, México.

² Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, CIIDIR Oaxaca, Oaxaca, México.

³ Grupo de Materiales y Construcción, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Oaxaca, México.

⁴ Instituto de Minería, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México.

RESUMEN

La extracción intensiva de arena para la elaboración de concreto hidráulico genera problemas ambientales significativos, como la erosión y pérdida de hábitats. Otro problema ambiental actual es la acumulación de residuos industriales, particularmente residuos plásticos de aparatos eléctricos y electrónicos (RPAEE) y residuos sólidos de vidrio (RSV). En este contexto, la presente investigación abordó la viabilidad de utilizar dichos residuos como reemplazos parciales del agregado fino, con el objeto de conservar los agregados naturales. Se evaluó la trabajabilidad y resistencia de morteros donde 10 y 20% de arena fue parcialmente reemplazada por RPAEE, RSV y la combinación de RPAEE+RSV. Los resultados mostraron que mezclas de morteros con reemplazos del 10% de RPAEE, 10% y 20% de RSV, y 10% de RPAEE+RSV cumplen el requerimiento de fluidez; no obstante, los reemplazos de 20% de RPAEE y 20% de RPAEE+RSV la afectaron negativamente. Además, se encontró que las resistencias a la compresión de la mayoría de los reemplazos con RPAEE y RSV fueron similares al control, excepto la del mortero con 20% de RPAEE, la cual fue menor. En conclusión, este estudio demostró que los RPAEE y RSV pueden ser utilizados eficazmente en la industria de la construcción, contribuyendo a la reducción en la explotación de recursos naturales, la disposición de residuos no degradables, y a la manufactura de morteros ecológicos.

Palabras clave: Mortero ecológico; Residuos de plástico de aparatos eléctricos y electrónicos; Residuos sólidos de vidrio; Fluidez; Resistencia a la compresión.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, los materiales basados en cemento Portland, como el concreto y el mortero, son los más utilizados y continuarán siendo altamente demandados en el futuro (Orozco et al., 2024). Además, esta industria es uno de los mayores consumidores de recursos naturales, particularmente de agregados como la grava y la arena, que son fundamentales en la matriz cementante. El concreto está compuesto aproximadamente de 65 a 80% de agregados (K. Ali et al., 2021). Es por ello que cada año se extraen aproximadamente 50 mil millones de toneladas de agregados a nivel mundial (UNEP, 2022), y la extracción intensiva causa efectos negativos al medio ambiente, principalmente la erosión del suelo, la pérdida de biodiversidad y la degradación de ecosistemas (Malik, 2013; UNEP, 2022). Por lo tanto, la preocupación por el impacto ambiental negativo de la extracción intensiva de agregados naturales ha estimulado la búsqueda de alternativas que sean sostenibles sin comprometer las propiedades del producto final.

Además, la gestión de residuos es otro problema ambiental actual en todo el mundo. Por una parte, la adquisición y descarte de nuevos dispositivos eléctricos y electrónicos incrementa diariamente, abarcando una amplia gama de productos tales como celulares, electrodomésticos, bicicletas eléctricas, monitores de salud, sensores ambientales, dispositivos electrónicos integrados en muebles, juguetes, herramientas, entre otros (Baldé et al., 2024). Por esta razón, en el 2022 se generaron aproximadamente 6.2 millones de toneladas de residuos plásticos de aparatos eléctricos y electrónicos (RPAEE) a nivel mundial (Baldé et al., 2024). Estos residuos causan impactos negativos en el medio ambiente debido a que deterioran la fertilidad del suelo, reducen la capacidad de recarga de los niveles freáticos, aumentan la acumulación en vertederos y en entornos naturales, como océanos y ríos, donde contaminan gravemente los ecosistemas (K. Ali et al., 2021).

Por otra parte, se producen aproximadamente 130 millones de toneladas de vidrio a nivel mundial de productos manufacturados como jarras, ventanas, parabrisas y botellas (Ferdous et al., 2021). De esta producción, solo el 25 % se recicla y el resto se vierte a campo abierto debido a las complicaciones de reciclaje como el tipo de vidrio y color (Dong et al., 2021). Estos residuos sólidos de vidrio (RSV) representan un serio problema ambiental debido a su baja biodegradabilidad, contribuyendo a la contaminación del suelo, el agua y el aire (Ferdous et al., 2021; Malik, 2013).

Ante este panorama, la reutilización de residuos industriales como sustituto de agregados naturales emerge como una opción viable para mitigar estos problemas. Existen diversos estudios en los cuales se reemplaza parcialmente la arena por RPAEE o por RSV individualmente en morteros (E. E. Ali & Al-Tersawy, 2012; Ismail & AL-Hashmi, 2008; Nwaubani & Parsons, 2021; Topçu & Canbaz, 2004); no obstante, no se encontraron investigaciones sobre el uso de la combinación de estos dos residuos como reemplazo del agregado fino. En este contexto, esta investigación se centró en evaluar el impacto del reemplazo parcial del agregado fino por RPAEE, RSV y su combinación en las propiedades de morteros, mediante pruebas estado fresco y endurecido. Esta investigación no solo promete disminuir el uso de los agregados naturales, sino también gestionar de manera eficiente dos residuos industriales, proporcionando una alternativa ecológica que contribuya a la conservación de recursos naturales y a la reducción de la huella de carbono en la industria de la construcción.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción de materiales

Los morteros se elaboraron con cemento Portland compuesto (CPC) 30R marca Holcim Apasco, el cual, cumple con las especificaciones de la norma NMX-C-414-ONNCCE; para el mezclado se utilizó agua potable; y para el agregado fino se utilizaron arena de río, RPAEE y RSV, seleccionando solamente las partículas retenidas en los tamices No. 8 y 16 para la preparación de las mezclas de morteros de acuerdo con la norma ASTM C-33. Esta selección se realizó porque en la molienda del RPAEE la mayor parte del material quedó retenido en estas mallas, y para mantener una comparación coherente, tanto el RSV como la arena de río también fueron cribados en estos tamaños. Los RPAEE fueron manufacturados y proporcionados por el Instituto de Minería de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca. Los RPAEE fueron posteriormente cribados en el Grupo de Materiales y Construcción del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR Oaxaca) del Instituto Politécnico Nacional, y solo se utilizaron las partículas retenidas en las mallas No. 8 y 16. Los RSV también fueron manufacturados por el Instituto de Minería, y se obtuvieron de botellas transparentes de un vertedero. Los RSV se cribaron nuevamente en el CIIDIR Oaxaca y de manera similar que los RPAEE se utilizaron solamente las partículas retenidas en los tamices No. 8 y 16. Con el objeto de mejorar la fluidez de unas mezclas, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango o superplastificante (SP) marca FLOWCON-P01®, la cual, cumple con las especificaciones de la norma ASTM C 409.

2.2 Diseño y elaboración de mezclas

Se prepararon 7 mezclas de mortero con diferentes porcentajes de reemplazo en peso de agregado fino por RPAEE y RSV. Las 7 mezclas de mortero consistieron en 100% arena (mezcla C), 90% arena + 10% RPAEE (mezcla RPAEE10), 80% arena + 20% RPAEE (mezcla RPAEE20), 90% arena + 10% RSV (mezcla RSV10), 80% arena + 20% RSV (mezcla RSV20), 90% arena + 5% RPAEE + 5% RSV (mezcla RPAEE5+RSV5), y 80% arena + 10% RPAEE + 10% RSV (mezcla RPAEE10+RSV10).

Cabe recordar que en todas las mezclas de morteros solo se utilizaron las partículas retenidas en las mallas No. 8 y No. 16. Es decir, para la mezcla RPAEE10, donde se reemplazó 10% de arena de río por 10% de RPAEE, se reemplazaron 5% de partículas de la fracción No. 8 de arena de río por 5% de partículas de la fracción No. 8 de RPAEE, y 5% de partículas de la fracción No.16 de arena de río por 5% de partículas de la fracción No. 16 de RPAEE. De manera similar se prepararon las demás mezclas. Además, se consideró una parte de CP por 2.75 de agregado fino y una relación a/c de 0.57 para todas las mezclas de mortero. En la Tabla 1 se muestra las proporciones de las mezclas de mortero y, para mayor claridad, en la Figura 1 se muestra una representación esquemática.



Tabla 1. Proporciones de las mezclas de mortero en peso.

Tipo de mezcla (TM)	CPC (g)	Arena (g)	RPAEE (g)	RSV (g)	Agua (ml)	SP (ml)
C	650	1,787.5	-	-	370.5	-
RPAEE10	650	1,699.9	89.4	-	370.5	-
RPAEE20	650	1,608.7	178.7	-	370.5	1
RSV10	650	1,699.9	-	89.4	370.5	-
RSV20	650	1,608.7	-	178.7	370.5	-
RPAEE5+RSV5	650	1,699.9	44.7	44.7	370.5	-
RPAEE10+RSV10	650	1,608.7	89.4	89.4	370.5	1

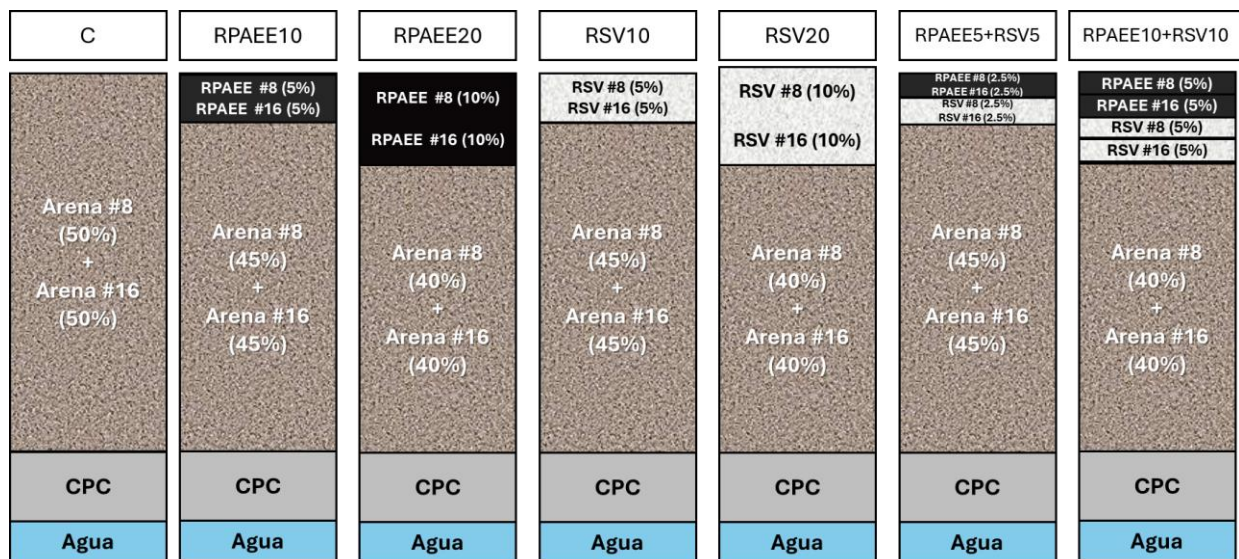


Figura 1.- Representación esquemática de los proporcionamientos para las diferentes mezclas en peso.

2.3 Parámetros experimentales

El programa experimental de la presente investigación se dividió en dos fases, en la primera fase se evaluó la fluidez de los morteros para conocer los efectos de los residuos en su trabajabilidad, mientras que en la segunda fase se evaluó la resistencia a la compresión de cubos de mortero para conocer los efectos de los residuos en esta importante propiedad mecánica.

2.4 Prueba de fluidez

En la fase 1 se prepararon 7 tipos de mezclas de mortero en una batidora mecánica que cumple con las especificaciones de la norma ASTM C 305-99. El proceso para el mezclado de morteros fue de acuerdo con la norma ASTM C 305-99 y la fluidez en una mesa de fluidez manual de acuerdo con la norma ASTM C 1437-01 (Figura 2).



Figura 2.- Detalle de la prueba de fluidez de los morteros.

2.5 Resistencia a la compresión

En la fase 2 se elaboraron 126 especímenes cúbicos de mortero de 5 x 5 x 5 cm de acuerdo con la norma ASTM C109/C109M-05. Por cada tipo de mezcla se elaboraron 18 cubos de mortero en moldes metálicos, y se cubrieron por 24 horas con una membrana plástica para evitar la evaporación del agua. Después de 24 horas, los cubos se desmoldaron y se curaron mediante inmersión en una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasta la fecha del ensayo (Figura 3). Se ensayaron en compresión 6 cubos de mortero de cada mezcla a 7, 14 y 28 días utilizando una prensa eléctrica digital ELVEC® modelo E 659-5, con una capacidad de carga de 120 ton.

Los resultados de resistencia a la compresión fueron estadísticamente analizados mediante análisis de varianza de dos vías utilizando el software IBM SPSS Statistics 25® para conocer la significancia de los efectos principales e interacciones entre variables. Posteriormente, se realizaron comparaciones múltiples utilizando la prueba de Tukey.

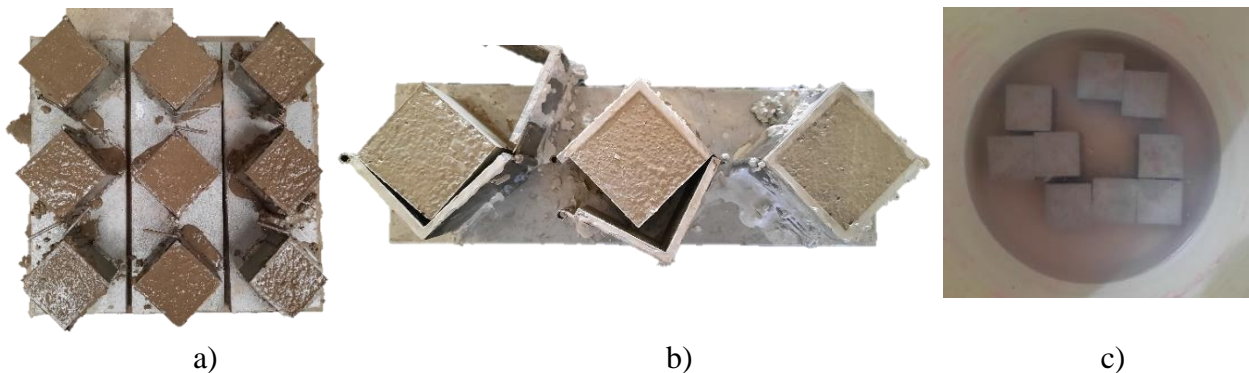


Figura 3.- Detalles sobre la a) elaboración, b) desmoldado y c) curado de los especímenes cúbicos.

3. RESULTADOS

3.1 Fluidez

Los resultados de la prueba de fluidez en los diferentes tipos de mezclas de mortero (TM) se presentan en la Tabla 2. Se observó que la mayoría de las mezclas cumplieron con el requisito de fluidez de $110 \pm 5\%$. Los resultados muestran que los morteros RSV10, RSV20, RPAEE10 y RPAEE5+RSV5 mejoran la fluidez de la mezcla en 5%, 3%, 3% y 3% comparados con el control, respectivamente; no obstante, los morteros RPAEE20 y RPAEE10+RSV10 no cumplieron con el requisito de fluidez, por lo cual se les agregó 1 ml de aditivo superplastificante, y con ello cumplieron con la fluidez requerida por la norma.

Tabla 2. Proporciones de las mezclas de mortero.

Tipo de mezcla (TM)	Fluidez inicial (%)	Fluidez final (%)
C	107	107
RPAEE10	110	110
RPAEE20	100	105
RSV10	112	112
RSV20	110	110
RPAEE5+RSV5	110	110
RPAEE10+RSV10	104	110

3.2 Resistencia a la compresión

Los resultados de la resistencia a la compresión de los diferentes tipos de mezcla a los 7, 14 y 28 días se presentan en la Figura 4. Se observa que la resistencia de todas las mezclas incrementa con la edad. También se observa que a 7 días las resistencias de todos los morteros son similares a la del control, puesto que la mayoría de sus desviaciones estándar se traslapan entre ellas. No obstante, a 14 y 28 días se observa que el reemplazo parcial de arena de río por RPAEE disminuye la resistencia del mortero, siendo la resistencia del mortero con reemplazo de 20% (RPAEE20) la menor de todas. En lo referente a las resistencias de las demás mezclas, los resultados muestran que a éstas sones aparentemente similares al control.

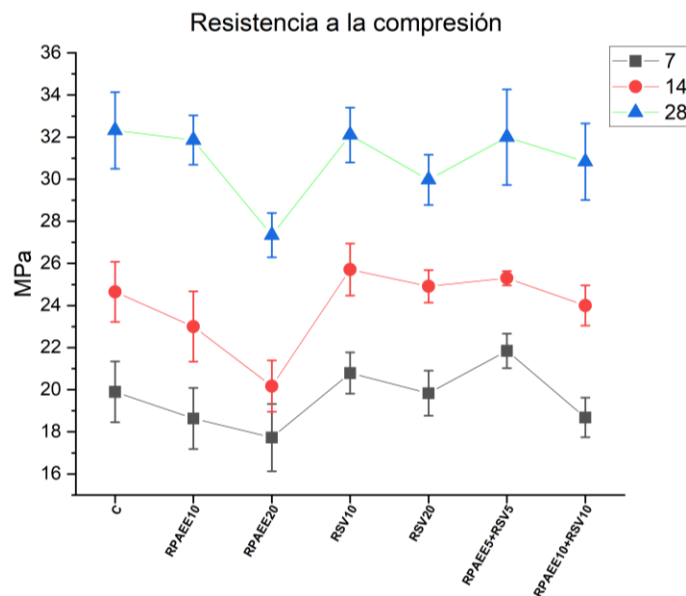


Figura 4.- Resumen de la resistencia a la compresión de los diferentes tipos de mezclas de mortero.

Los resultados del análisis estadístico de los resultados de la prueba de resistencia a la compresión se presentan en la Tabla 3. Es pertinente mencionar que los datos cumplen con el requisito de independencia y mayoritariamente con los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianza, es por ello que se pudo realizar el ANOVA. Los resultados del ANOVA indican diferencias significativas en la variable edad y la variable tipo de mezcla, así como en su interacción; no obstante, no indica si estas diferencias ocurren entre todos los niveles de cada variable o solamente entre ciertos niveles. Con base en lo anterior, se requiere el análisis de comparaciones múltiples mediante el método de Tukey, el cual se presenta a continuación.

Tabla 3. Resumen de los resultados del ANOVA de los datos de resistencias a la compresión.

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Resistencia a la compresión

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	3038.348 ^a	20	151.917	85.589	.000
Intersección	77735.787	1	77735.787	43795.832	.000
Edad	2722.086	2	1361.043	766.803	.000
TM	263.709	6	43.952	24.762	.000
Edad * TM	52.552	12	4.379	2.467	.007
Error	186.371	105	1.775		
Total	80960.506	126			
Total corregido	3224.719	125			

Los resultados de la prueba Tukey para las variables Edad y Tipo de mezclas (TM) se muestran en las Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente. En la Tabla 4 se corrobora que la resistencia a la compresión a 7 días para todos los morteros es significativamente menor que la resistencia a 14 días, y que la resistencia a los 14 días es también menor que la resistencia a 28 días debido a que las medias de las resistencias de todas las mezclas para cada edad se encuentran en subconjuntos diferentes.

Tabla 4. Subconjunto de resultados de resistencia a la compresión en función de la edad.

Resistencia a la compresión

HSD Tukey^{a,b}

Edad	N	Subconjunto		
		1	2	3
7	42	19.6286		
14	42		23.9724	
28	42			30.9145
Sig.		1.000	1.000	1.000

En la Tabla 5 se corrobora lo mencionado en el análisis descriptivo sobre la mezcla RPAEE, donde se menciona que esta mezcla es la de menor resistencia comparada con las otras mezclas. La Tabla 5 también indica que no hay diferencias significativas entre las mezclas RPAEE10, RSV10, RSV20 y RPAEE10+RSV10 cuando se comparan con el control. Además, que la mezcla RPAEE5+RSV5 es la mezcla con mayor resistencia a la compresión.

Tabla 5. Subconjunto de resultados de resistencia a la compresión en función de tipo de mezcla.

Resistencia a la compresión

HSD Tukey^{a,b}

TM	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
RPAEE20	18	21.7456			
RPAEE10	18		24.4994		
RPAEE10+RSV10	18		24.5061		
RSV20	18		24.9139	24.9139	
C	18		25.6211	25.6211	25.6211
RSV10	18			26.1989	26.1989
RPAEE5+RSV5	18				26.3844
Sig.		1.000	.161	.067	.605

4. DISCUSIÓN

En esta investigación, se evaluó el efecto del reemplazo parcial de arena de río por RPAEE, RSV y la combinación de los RPAEE+RSV en la trabajabilidad y resistencia a la compresión de morteros. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la viabilidad y el desempeño de estos materiales alternativos en mezclas de mortero ecológicos.

Los resultados del reemplazo parcial de 10% de arena por RPAEE no afecta negativamente la trabajabilidad; no obstante, el reemplazo de 20% sí la afecta negativamente la trabajabilidad, lo cual requiere la adición de un aditivo superplastificante. Esto puede atribuirse a las propiedades del RPAEE, que es menos denso que el agregado natural, tiene una superficie más irregular que el cemento lo cual puede aumentar la fricción interna en la mezcla y reducir la fluidez (Saikia and De Brito, 2012; Silva et al., 2014).

En contraste, los resultados de los reemplazos parciales de 10 y 20% de arena de río por RSV no afecta significativamente la trabajabilidad de las mezclas de mortero. Estos resultados obtenidos coinciden con estudios previos que han demostrado que el RSV puede ser utilizado como agregado sin comprometer la trabajabilidad del mortero (Shi and Zheng, 2007; Topçu and Canbaz, 2004). Los resultados del RSV puede atribuirse a sus propiedades, que tiene partículas angulares y lisas, lo que permite una buena dispersión dentro de la mezcla sin aumentar significativamente la fricción interna (E. E. Ali and Al-Tersawy, 2012; Shi and Zheng, 2007), y baja porosidad y absorción de agua, lo cual ayuda a mantener la fluidez de la mezcla (Malik, 2013).

La combinación de 10% de RPAEE y RSV no afecta negativamente la trabajabilidad del mortero; no obstante, el 20% de reemplazo requiere un aditivo superplastificante. Esto sugiere que, aunque el RSV ayuda a mantener cierta trabajabilidad, la presencia de RPAEE en altos porcentajes sigue afectando la mezcla, requiriendo aditivos para compensar esta pérdida de trabajabilidad.

En términos de resistencia a la compresión, se encontró que el reemplazo parcial de 10% de arena de río por RPAEE no afecta significativamente la resistencia del mortero en comparación con la mezcla control. No obstante, el reemplazo de 20% disminuye significativamente la resistencia debido a la menor densidad de la mezcla, a la unión débil entre pasta y agregado, y a la poca contribución a la resistencia del RPAEE comparado con los agregados naturales (Albano et al., 2009; K. Ali et al., 2021; Saxena et al., 2018).

Por otro lado, el reemplazo parcial del 10% y 20% de arena de río por RSV no afecta significativamente la resistencia a la compresión de los morteros; por lo contrario, el reemplazo del 20% la incrementa. Esto podría explicarse por el efecto de endurecimiento adicional proporcionado por las partículas de los RSV, que distribuyen uniformemente el estrés y limitan la propagación de microfisuras dentro de la matriz del mortero (Ismail and AL-Hashmi, 2009).

La combinación de 10% de RPAEE y RSV mejora significativamente la resistencia del mortero en comparación con la mezcla control, y el reemplazo de 20% produce un mortero con resistencia similar a la del control. Los resultados obtenidos muestran un efecto sinérgico entre los RPAEE y RSV, donde el RSV puede compensar algunas de las debilidades del RPAEE, mejorando la resistencia del mortero.

5. CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- 1.- El reemplazo parcial de 10 y 20% de arena por RSV no afecta significativamente la trabajabilidad de las mezclas de mortero.
- 2.- El reemplazo parcial de 10% de arena por RPAEE en no afecta negativamente la trabajabilidad de la mezcla; no obstante, el reemplazo de 20% afecta negativamente la trabajabilidad. Para contrarrestar esa pérdida de trabajabilidad de la mezcla es necesario adicionar un aditivo superplastificante.



3.-El reemplazo parcial de 10% de arena por la combinación de RPAEE y RSV no afecta negativamente la trabajabilidad de la mezcla de mortero; no obstante, el 20% de reemplazo afecta negativamente la trabajabilidad. De manera similar que con la mezcla RPAEE20, es necesario adicionar un aditivo superplastificante.

4.- El reemplazo parcial de 10% de arena por RPAEE no afecta significativamente la resistencia del mortero en comparación con la mezcla control; no obstante, el reemplazo con 20% de RPAEE disminuye significativamente la resistencia debido a que la mezcla es menos densa.

5.-. El reemplazo parcial de 10 y 20% de arena por RSV no afecta significativamente la resistencia a la compresión de morteros.

6.- El reemplazo parcial de 10% de arena por la combinación de RPAEE+RSV mejora significativamente la resistencia del mortero en comparación con la mezcla control; además, el reemplazo de 20% produce un mortero con resistencia similar a la del control.

El reemplazo parcial de arena por estos residuos es viable debido al bajo impacto negativo en la calidad de los morteros producidos. Los hallazgos de esta investigación son de gran importancia para la industria y pueden contribuir a la creación de nuevos materiales y productos sostenibles y eficientes.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos de los proyectos SIP-20230346, SIP20242799 y SIP20240133. De igual forma, los autores agradecen al Instituto de Minería del Instituto Tecnológico de la Mixteca y al Grupo de Materiales y Construcción del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR Oaxaca) del Instituto Politécnico Nacional por las facilidades otorgadas para la obtención de los materiales. También Andy Alfonso Olivera agradece al CONAHCYT por la beca de doctorado recibida.

7. REFERENCIAS

Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., and Gutiérrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>

Ali, E. E., and Al-Tersawy, S. H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>

Ali, K., Qureshi, M. I., Saleem, S., and Khan, S. U. (2021). Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122952>

Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khetriwal, D. S., and Luda di Cortemiglia, V. (2024). *Global E-waste Monitor 2024*. <https://www.itu.int/itu-d/sites/environment>.

Dong, W., Li, W., and Tao, Z. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 172). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664>



- Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Lokuge, W., Aravinthan, T., and Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 173). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>
- Ismail, Z. Z., & AL-Hashmi, E. A. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29(2). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>
- Malik, M. I. (2013). Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates. *IOSR Journal of Engineering*, 3(7). <https://doi.org/10.9790/3021-03760813>
- Orozco, C., Babel, S., Tangtermsirikul, S., and Sugiyama, T. (2024). Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation. *Sustainable Materials and Technologies*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00796>
- Penacho, P., De Brito, J., and Rosário Veiga, M. (2014). Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.007>
- Saikia, N., and De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 34). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Saxena, R., Siddique, S., Gupta, T., Sharma, R. K., and Chaudhary, S. (2018). Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.019>
- Shi, C., and Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
- Silva, R. V., De Brito, J., and Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Topçu, I. B., and Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>
- UNEP. (2022). *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis 2022*. www.un.org/Depts/Cartographic/



Caracterización de cementos activados alcalinamente elaborados con ceniza volante y ceniza de bagazo de caña sin tratar mediante pulsos ultrasónicos

P. Pérez-Cortés^{1,2}, J. I. Escalante-García³, P. Montes-García¹

*Autor de Contacto: pmontes@ipn.mx

¹ Grupo de Materiales y Construcción, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Oaxaca, México.

² Cementos Molins, Paseo de la Castellana, 21, 28046 Madrid, España.

³ Cinvestav Unidad Saltillo, Zona Industrial, 25900 Ramos Arizpe, Coahuila, México.

RESUMEN

En la presente investigación se utilizaron la velocidad del pulso ultrasónico, y los parámetros ultrasónicos denominados atenuación espacial, atenuación temporal y contenido energético de la señal para caracterizar cementos activados con álcalis a base de ceniza volante y ceniza bagazo de caña de azúcar. Se prepararon probetas cúbicas de mortero con relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.23$, precursor:agregado fino de 1:2.75, tres porcentajes diferentes de ceniza de bagazo de caña (0, 10 y 20%), tres porcentajes de Na_2O . (10, 12 y 14%) y curado térmico a 80°C por 24 horas. Se investigaron los efectos de las variables sobre los parámetros ultrasónicos, densidades, porosidades y resistencias a la compresión de los morteros a 14, 28 y 90 días. Los resultados muestran que la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar disminuye la resistencia a la, pero no parece afectar los valores de los parámetros ultrasónicos de velocidad y energía. Lo que permite concluir que la disminución de la resistencia a la compresión no es causada por discontinuidades o poros grandes, sino por las propiedades de los productos de reacción obtenidos, las impurezas o el tamaño y forma de las partículas de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Palabras clave: Atenuación, Resistencia a la compresión; Fluidez; Velocidad de pulso ultrasónico.

1. INTRODUCCIÓN

La velocidad de propagación de una onda ultrasónica (VPU), es un parámetro muy utilizado para evaluar la calidad de productos cementantes ya que está asociado fundamentalmente a las propiedades elásticas y la densidad del materia (Bitá, et al., 2017). Entre las propiedades que se han caracterizado mediante VPU se encuentran la porosidad (Punurai, et al., 2007), el desarrollo de la microestructura (Ye, et al., 2004), el fraguado y endurecimiento del material (Carette & Staquet, 2015), la evaluación del daño, ocasionado por esfuerzos (Popovics & Popovics, 1991), y principalmente, la resistencia a la compresión (RC). Incluso, algunos autores han propuesto valores límite de VPU para establecer la calidad en concretos y mortero (Red Durar, 1997).

La correlación entre VPU y la RC es ampliamente utilizada, dado que ambas propiedades se encuentran ligadas a propiedades elásticas del medio, permitiendo el uso de la VPU como base para elaborar modelos predictivos de la RC. Además, la VPU presenta una tendencia similar a la RC en su desarrollo (Tharmaratnam & Tan, 1990), con un incremento en el tiempo hasta un punto en el que los valores permanecen constantes, o el incremento posterior se vuelve poco significativo, pudiendo aproximarse a una función hiperbólica (ACI commite 209, 1997) o exponencial (Wang, et al., 2017). La correlación entre RC y VPU en materiales base cemento Portland (CP) es modificada por la incorporación de adiciones minerales, aunque las tendencias permanecen similares a los encontrados en CP sin adiciones, y las diferencias en las tendencias pueden abordarse mediante la división en familias de curvas que describan la relación entre RC y VPU para cada mezcla en particular (Arenas-Piedrahita, et al., 2016). Además, se ha demostrado que es posible utilizar las mediciones de velocidad para ondas longitudinales (V_p) para calcular propiedades elásticas dinámicas del medio, como el módulo de elasticidad (E_{din}) y el módulo de cortante (G_{din}) en concretos y morteros base CP (Carette & Staquet, 2015). Los valores dinámicos han mostrado menor variabilidad que los determinados con pruebas estáticas (Panzerá, et al., 2001). Además de la velocidad, otro parámetro ultrasónico asociado a la propagación de un pulso ultrasónico es la atenuación (APU), relacionada a la microestructura del material. La APU ha sido utilizada para evaluar las propiedades mecánicas y estructurales de concretos y morteros base CP, siendo más sensible que la VPU para evaluar la porosidad del medio y detectar el crecimiento de fisuras (Lafhaj, et al., 2006). También se ha utilizado el coeficiente de atenuación lineal como parámetro para evaluar la porosidad, y se ha estudiado su aplicación para la determinación de diferentes relaciones agua/cemento (w/c) y contenido de agregado fino (Punurai, et al., 2007). Algunos investigadores reportan que ambos VPU y APU se relacionan a la RC de morteros de manera exponencial, y que su uso combinado en modelos predictivos conduce a un mejor coeficiente de determinación (Tharmaratnam & Tan, 1990). Liang y Wu (2002), estudiaron la elucidación teórica de las fórmulas empíricas obtenidas por Tharmaratnam para las relaciones de la RC con la VPU y APU. El desarrollo teórico de estas relaciones provee una referencia con la cual se puede demostrar que ambos parámetros están relacionados y pueden ser utilizados en modelos predictivos de la RC no solamente para materiales base CP, sino también para otros materiales cementantes.

Recientemente, se ha hecho énfasis en las preocupaciones sobre la aplicación de la técnica de VPU debido a dos motivos principales (Bitá, et al., 2017). El primero, la excesiva simplificación de los modelos de propagación, que tienden a ignorar la naturaleza real de los materiales cementantes como medios porosos, insaturados, heterogéneos, atenuantes y dispersivos (Popovics, et al., 1990). Y el segundo, la naturaleza del tiempo finito de aplicación del pulso, que emite en realidad un



espectro completo de frecuencias centradas alrededor de una frecuencia nominal, estas frecuencias viajan a través del material como un grupo y son distorsionadas durante la propagación, situación que no se aprecia cuando se toma en consideración un solo parámetro de propagación (Sipusic, et al., 2013). En un estudio en rocas, Martínez et al. demostraron que es posible obtener de manera relativamente sencilla hasta un total de cuatro diferentes parámetros ultrasónicos a partir de señales ultrasónicas digitalizadas que pueden ser útiles para caracterizar propiedades físicas y mecánicas de un material sólido. Los parámetros considerados fueron velocidad de onda P (V_p), atenuación temporal (α_t), atenuación espacial (α_e) y energía de la señal (ϵ) (Martínez-Martínez, 2008).

Por otra parte, los estudios de pulso ultrasónico en el campo de los cementos activados alcalinamente (CAA) son escasos en comparación con materiales base CP. La mayoría de las mediciones realizadas con esta técnica reportan el valor de VPU como una prueba complementaria y sus resultados se limitan a la descripción de la tendencia encontrada. Investigaciones sobre el uso de VPU en CAA consideran principalmente escoria granulada de altos hornos, ceniza volante, metakaolin, o la combinación de ellos como precursores para la elaboración de morteros y concretos. Reportan diferentes niveles de reemplazo de escoria granulada de altos hornos (EGAH), diferentes relaciones activador/precursor, diferentes relaciones $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ y diferentes edades. Se ha evaluado la VPU la RC y parámetros tales como el módulo de elasticidad dinámico (E_d). En general, han reportado el incremento de VPU con el aumento del porcentaje de NaOH, que la relación entre VPU y RC se ajusta a una función exponencial decreciente con el tiempo, que los morteros con ceniza volante (CV) son menos porosos que los de CP, y los E_d son menores que el control. Otras investigaciones han reportado que la VPU y el módulo elástico estático de los CAA a base de CV tienden a disminuir con el tiempo, mientras que aquellos en donde EGAH se utilizó como precursor muestran una tendencia a incrementarse (Wardhono et al. 2017).

Investigaciones recientes sugieren que la obtención de un mayor número de parámetros puede representar de mejor manera la información de las señales propagadas a través del material, proporcionando una mayor cantidad de información o mostrar información “oculta” o pasada por alto (Sipusic, et al., 2013). Es por ello que el objetivo del presente estudio fue investigar el uso de diferentes parámetros obtenidos a partir de una señal de pulso ultrasónico como estimadores para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de morteros compósitos de ceniza volante y ceniza de bagazo de caña.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño del experimento

Se diseñaron y elaboraron mezclas de morteros de CAA considerando tres porcentajes de sustitución de ceniza volante por ceniza de bagazo de caña (0, 10 y 20%), tres porcentajes de Na_2O (10, 12 y 14%) y cuatro edades de prueba (14, 28 y 90 días). Se colaron tres especímenes cúbicos para cada mezcla. Se realizaron pruebas de pulsos ultrasónicos a los morteros. Se obtuvieron la velocidad de ondas longitudinales (V_p), atenuación espacial (α_e), atenuación temporal (α_t) y energía de la señal (ϵ). Se estudió la correlación entre los parámetros ultrasónicos, las características físicas de los morteros y su resistencia a compresión.



2.2 Materiales

Los precursores utilizados fueron una ceniza volante (CV) marca ADMIX TECH® clasificada como Clase F (ASTM C 618-05), y ceniza de bagazo de caña (CBC) obtenida del vertedero a cielo abierto del ingenio azucarero “Constancia”, localizado en Tezonapa, Veracruz, México, la cual fue solamente cribada por la malla 75 microns (ASTM) durante cuatro minutos (Jiménez-Quero et al., 2013). El activador alcalino utilizado fue una solución combinada de Na_2SiO_3 y NaOH con una relación $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ de 1:2.23. La solución de Na_2SiO_3 fue de grado comercial con las siguientes características: $\rho=1.41$ g/ml y composición porcentual de 9.16% de Na_2O , 29.92% de SiO_2 y 60.92% de H_2O . La solución de hidróxido de sodio (NaOH) se preparó a partir de hojuelas de NaOH de grado comercial disueltas en agua destilada a una concentración 14 M. Para la preparación de los morteros se utilizó arena de sílice (ASTM C778).

2.3 Diseño, elaboración de mezclas y preparación de especímenes

Se diseñaron nueve diferentes mezclas de morteros base CV con 0, 10 y 20% de reemplazo de CV por CBC y 10, 12 y 14% de óxido de sodio (Na_2O) (Tabla 1). El porcentaje de Na_2O fue calculado como el porcentaje adicionado por la solución activante en relación al peso de precursor. En las mezclas se mantuvo constante la relación agua/sólidos (a/s) de 0.42 y el módulo de silicato ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) en 1.25. Se consideró una proporción precursor: arena de 1:2.75.

El procedimiento se llevó a cabo como se describe a continuación. Se pesó la cantidad necesaria de CV, CBC, agregado fino y de las soluciones activadoras según el proporcionamiento propuesto. Posteriormente se realizó un mezclado en seco de ambas cenizas por dos minutos en un mezclador Hamilton Beach modelo 63221®. Enseguida, se adicionó en un tiempo de 30 segundos la solución de NaOH . Una vez realizado el mezclado de los precursores con la solución de NaOH , se adicionó la solución de Na_2SiO_3 , y se mezcló por dos minutos. Por último, se adicionó la cantidad pesada de agregado fino y se mezcló por otros dos minutos más.

La fluidez de los morteros de CAA (ASTM 1437-01), las mezclas para sistemas 100% de CV alcanzaron el flujo requerido por la norma ASTM C109; sin embargo, en los sistemas con sustituciones de CBC fue necesario incorporar agua adicional a la mezcla para alcanzar el flujo requerido, lo que incrementó la a/s en 0.01.

Las mezclas de morteros se vertieron en moldes cúbicos de 50 mm por lado como lo establece la norma ASTM C109/C109M – 12, con el fin de ser utilizados en la prueba de resistencia a la compresión. Las mezclas se vertieron en dos capas en los moldes cúbicos y se compactaron utilizando una mesa vibratoria, finalizando con el enrase de los moldes en la cara superior. Los moldes llenos con la mezcla de mortero se colocaron dentro de una bolsa de plástico resistente a altas temperaturas y se llevaron a un horno para someterlos a un curado térmico a 80 °C durante 24 horas en un horno de secado marca Humboldt MFG. CO®.

Concluido el tiempo de curado los especímenes se sacaron del horno y se dejaron enfriar. Enseguida se desmoldaron y se dejaron en el laboratorio a temperatura ambiente ($25\pm 5^\circ\text{C}$) hasta las edades de prueba indicadas.

Tabla 1. Proporcionamiento de los morteros utilizados.

Nomenclatura	% CBC	% Na ₂ O	LA/p	Materia base (g)		Activador (g) Na ₂ SiO ₃ / NaOH= 2.23	Agua (g)	Agua adicionada (g)	Flujo promedio (%)
				CV	CBC				
100CV-10	0	10	0.625	800	0	500	100	0	109±1.24
100CV-12		12	0.750	800	0	600	50	0	111±0.71
100CV-14		14	0.875	800	0	700	1	0	110±2.65
90CV10CBC-10	10	10	0.625	720	80	500	100	4	99±3.18
90CV10CBC-12		12	0.750	720	80	600	50	4	106±0.18
90CV10CBC-14		14	0.875	720	80	700	1	4	105±0.35
80CV20CBC-10	20	10	0.625	640	160	500	100	8	96±0.03
80CV20CBC-12		12	0.750	640	160	600	50	8	103±0.88
80CV20CBC-14		14	0.875	640	160	700	1	8	101±4.24

2.4 Propiedades físicas de los morteros

El día de la prueba se midieron y pesaron para utilizar estos valores en la determinación de la densidad volumétrica. El volumen total de los especímenes se determinó asumiendo una forma regular cúbica, y obteniendo de esta forma el volumen total de los especímenes. La masa fue obtenida con una balanza analítica. La densidad real del material se llevó a cabo a la edad de 28 días mediante la molienda de fragmentos representativos de las diferentes mezclas de morteros, de lo cual se obtuvo su masa con una balanza analítica y fueron llevadas a un estereo picnómetro de helio, donde se determinó el volumen último del material.

En la Tabla se muestran los valores de densidad volumétrica de los morteros de CAA elaborados. Los valores encontrados son parecidos a los reportados por estudios previos en CAA de base CV (Temuujin, et al., 2010) (ul Haq, et al., 2014). En la Tabla 2 también se muestran las densidades reales a 28 días.

Tabla 2. Resultados de densidad volumétrica y densidad real de los morteros de CAA (Kg/m³).

Nomenclatura	pa a 7 días	pa a 14 días	pa a 28 días	paa 90 días	pr a 28 días
100CV-10	2039 ± 10	2017 ± 10	1988 ± 20	2015 ± 20	2640
100CV-12	1985 ± 30	2034 ± 50	2018 ± 20	1962 ± 40	2700
100CV-14	2016 ± 20	2024 ± 20	1997 ± 30	1991 ± 30	2690
90CV10CBC-10	2010 ± 20	1960 ± 30	1955 ± 60	1968 ± 10	2490
90CV10CBC-12	2014 ± 10	1993 ± 60	2009 ± 10	2001 ± 10	2520
90CV10CBC-14	2031 ± 20	2039 ± 30	2007 ± 30	2002 ± 10	2620
80CV20CBC-10	1972 ± 20	1942 ± 30	1940 ± 10	1943 ± 10	2520
80CV20CBC-12	1985 ± 20	1974 ± 10	1976 ± 10	1977 ± 20	2450
80CV20CBC-14	1983 ± 20	2004 ± 10	2000 ± 30	1981 ± 10	2490

La porosidad relativa de las diferentes mezclas de morteros de CAA fue estimada a partir de las mediciones de la densidad real a 28 días y su diferencia con las densidades volumétricas diferentes edades, por lo tanto, los valores de porosidades en la Tabla 3 deben ser considerados como relativos.

Tabla 3. Valores de porosidad relativa con respecto a densidad real a 28 días (%).

Nomenclatura	7 días	14 días	28 días	90 días
100CV-10	22.76±0.55	23.50±0.42	24.70±0.85	23.69±0.64
100CV-12	26.47±1.08	24.62±1.88	25.25±0.70	27.30±1.58
100CV-14	25.13±0.92	24.79±0.56	25.83±1.15	26.05±0.97
90CV10CBC-10	19.40±0.61	21.36±1.24	21.63±2.53	21.09±0.48
90CV10CBC-12	19.96±0.45	20.73±2.31	20.15±0.18	20.47±0.33
90CV10CBC-14	22.35±0.89	22.04±1.21	23.27±1.21	23.47±0.55
80CV20CBC-10	21.68±0.67	22.87±1.09	22.97±0.57	22.85±0.41
80CV20CBC-12	19.19±0.62	19.51±0.47	19.45±0.55	19.43±0.92
80CV20CBC-14	20.23±0.89	19.32±0.75	19.52±1.15	20.14±0.52

2.5 Pruebas de pulsos ultrasónicos

La aplicación de la prueba de pulso ultrasónico se llevó a cabo sobre los especímenes cúbicos preparados. Al ser una prueba unidimensional, la dirección de aplicación del pulso elegida fue en dirección hacia la superficie expuesta en el molde durante el curado. Las pruebas de pulso ultrasónico se realizaron a 14, 28 y 90 días. El equipo utilizado para la generación del pulso y la obtención de las señales fue un Pulser Olympus® Panametrics 5058PR acoplado a un osciloscopio digital Marca Tetronix® TDS 3014C. La prueba de pulso se realizó por contacto directo en el modo transmisión- recepción. Antes de cada medición, se aplicó una capa de gelatina de parafina como agente acoplante, para asegurar un adecuado contacto entre las caras de los especímenes y los transductores. Para la transmisión-recepción de los pulsos ultrasónicos se utilizaron pares de transductores Olympus NDT X1021® de frecuencia central 50 kHz para ondas longitudinales (tipo P). Los parámetros utilizados para la generación de las señales se muestran en la Tabla 4. Las mediciones fueron realizadas colocando los transductores en el punto medio de los especímenes cúbicos (

b)

Figura 11a y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.1b**); obteniendo las lecturas de amplitudes del pulso y el tiempo de vuelo (tv) de cada espécimen para su posterior procesamiento digital.

Tabla 4. Parámetros utilizados para la generación de las señales ultrasónicas.

Parámetro	Transductor de Onda P
Potencia:	50 kHz
Frecuencia:	50 kHz
Amortiguamiento:	200 Ω
Pulso:	200
Ganancia:	40



Filtro: 0
Atenuación: 19 dB

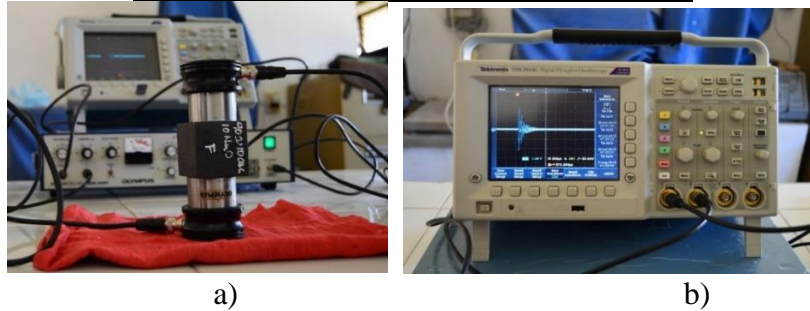
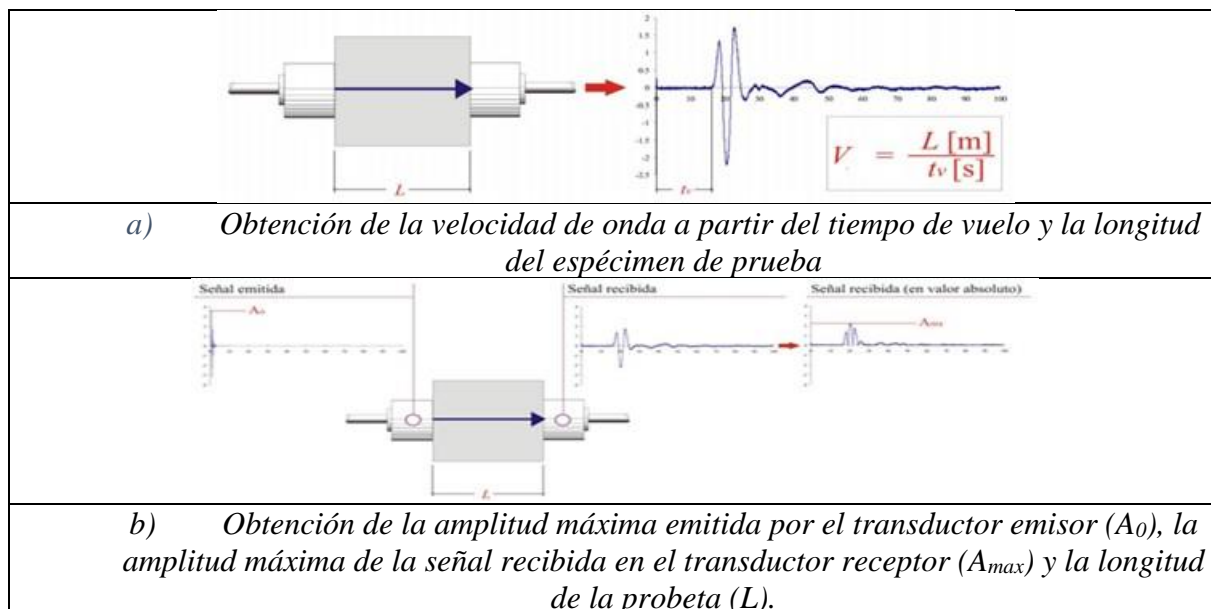


Figura 1. Toma de señales ultrasónicas con los transductores de onda tipo P.

2.6 Obtención de parámetros ultrasónicos

La velocidad de pulso ultrasónico (V_p) se obtuvo mediante los cocientes entre las longitudes de los especímenes, y los t_v de las señales (Ecuación 1 en Figura 2a). El t_v se obtuvo como el primer cambio de pendiente importante en la señal ultrasónica, conocido también como tiempo de primer arribo. Las atenuaciones espaciales (α_e) se obtuvieron como en la Figura 2b. La amplitud pico a pico del pulso utilizado tenía el valor unitario de 1 V, por lo que la amplitud máxima emitida (A_0) fue de 0.5 V. La obtención de la amplitud máxima en el material (A_{mx}) fue obtenida del valor absoluto de amplitudes registradas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**2b). Las atenuaciones temporales (α_t) fueron obtenidas también como en la Figura 2b. T_{amax} es el tiempo en que se presenta la amplitud máxima en la señal, mientras que $T_{a10\%}$ es el último tiempo en el que se presentó por una última vez una amplitud igual al 10% de la amplitud máxima (c)). La energía de la señal (ϵ) se obtuvo como el cuadrado del área contenida entre los máximos y mínimos relativos de la señal, en términos de velocidad. Los parámetros ultrasónicos se obtuvieron de las señales digitalizadas utilizando el software Matlab® 2016b.



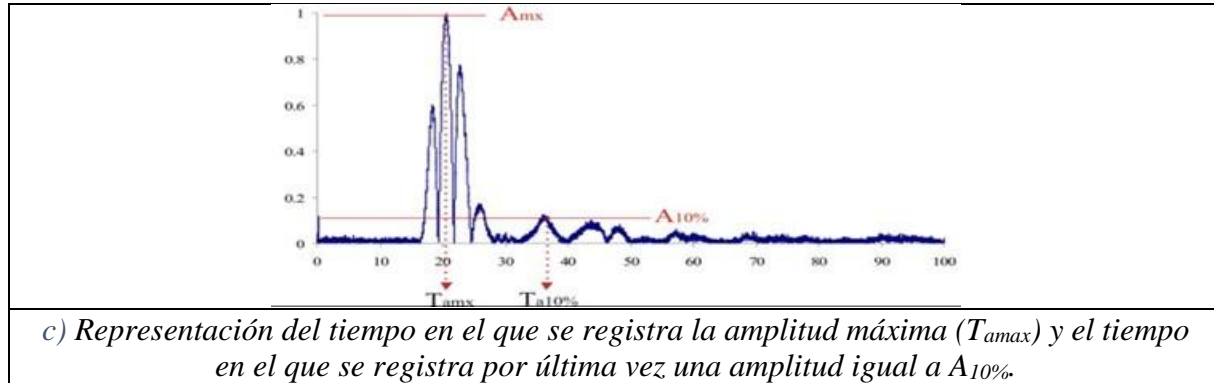


Figura 2. Consideraciones para la estimación de los parámetros ultrasónicos (tomado de Martínez-Martínez, 2008)

2.7 Resistencia a la compresión de morteros

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron con base en la norma ASTM C109/ C109M – 13 a 7, 14, 28 y 90 días, ensayando en cada ocasión 3 especímenes cúbicos para cada tipo de mezcla. Las edades de prueba se consideraron como el tiempo transcurrido después del curado térmico de los especímenes. El equipo utilizado fue una prensa de compresión automatizada ELVEC E659-5®, con capacidad de carga total de 120 toneladas, equipada con una válvula de presión regulable (Figura 3a). Antes del ensayo, se desbastaron las caras de los especímenes en la dirección de la prueba, utilizando una lija, con la finalidad de asegurar un contacto uniforme sobre la superficie. Cada espécimen cúbico se colocó de manera centrada entre las dos platinas de la prensa mecánica y se sometió a un incremento gradual de carga hasta la fractura. Se registró el valor reportado por la prensa como la carga última soportada. El cálculo de la resistencia a la compresión se realizó dividiendo la carga última soportada entre la superficie del espécimen sobre la que se aplicó. Las fallas presentadas por los especímenes fueron las denominadas fracturas en forma de reloj de arena (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.3b**), característica de los materiales frágiles debido a la distribución de esfuerzos antes de la fractura.



Figura 3. Prensa hidráulica ELVEC E659-5, utilizada para la prueba de resistencia a la compresión.

3. RESULTADOS

3.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los resultados obtenidos para la V_p en morteros de CAA se muestran en la Figura 4. Los valores de V_p son el promedio de los resultados obtenidos para los especímenes elaborados por cada tipo de mezcla, y son reportados en m/s. Los valores oscilan entre un rango de 2100 y 3010 m/s. Se muestran los resultados para 14, 28 y 90 días.

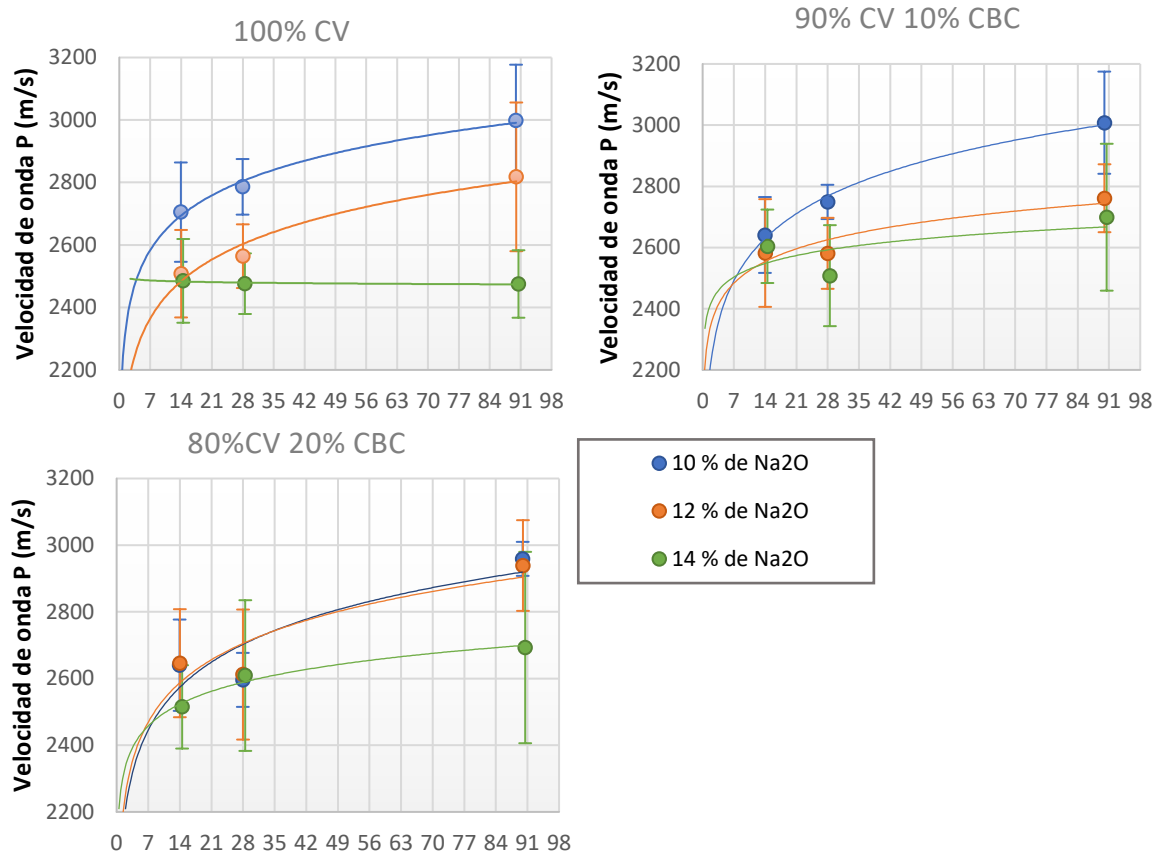


Figura 4. Velocidad de onda P (m/s) de los morteros agrupados por porcentaje de CV y CBC.

Los resultados muestran que la V_p se incrementa con la edad del espécimen, ya que los valores más altos se obtuvieron en todas las mezclas a los 90 días. Las barras de error se traslapan en la mayoría de los casos, pero esto es atribuible a que las diferencias entre los valores de V_p son divididos entre un número muy grande debido a la magnitud de los valores de velocidad. Los valores de V_p muestran una tendencia a disminuir con el incremento del porcentaje de Na_2O . El efecto del aumento de reemplazo de CV por CBC no parece provocar una disminución en los valores de V_p encontrados, ya que los valores obtenidos para los diferentes niveles de sustitución son similares.

Los resultados indican que el incremento de % de Na_2O contribuye a la disminución de los valores de V_p , mientras el incremento de la edad muestra un aumento en la V_p . Los resultados de las interacciones ente el porcentaje de activador con los otros dos factores (% Na_2O x %CBC y % Na_2O

x Edad), indican que son importantes para los valores de V_p . El porcentaje de reemplazo de CV por CBC, no tiene un efecto en la VP (P -valor >0.05) de los morteros de CAA, de manera general tampoco se ven diferencias al comparar por edades el nivel con 20% lo que indica que un porcentaje de sustitución mayor al 20% si podría provocar cambios significativos en la V_p .

Estos resultados son significativos, ya que la literatura reporta una disminución en la velocidad de onda cuando el material base en un cementante se sustituye por otro tipo de adiciones minerales. En el caso de los morteros de CAA estudiados, podría indicar que la matriz de los CAA no se ve afectada de manera significativa por la adición de CBC, al menos en cuanto la formación de discontinuidades importantes dentro de ella. Puede sugerir también que los productos formados por la activación alcalina de la CBC son similares a los formados por la activación alcalina de la CV, formando una matriz densa y estable a pesar de proveer de dos fuentes de aluminosilicatos diferentes. Estos resultados se complementan con los obtenidos en porosidad, donde se reportaron menores porcentajes de porosidad para sistemas combinados.

Para el porcentaje de Na_2O si hay diferencias entre los niveles, se muestra que para 14 y 28 días, es el nivel de 14% presenta diferencias significativas con los otros dos niveles, pero a 90 días esta diferencia se vuelve poco significativa. Para el nivel de 12%, al no verse diferencia con respecto al nivel de 10% con las edades, esta diferencia debe relacionarse a las interacciones con el contenido de CBC. De manera general el incremento en el % de Na_2O , disminuye los valores de V_p , esto puede ser debido a que, al utilizar un mayor porcentaje de activador, la reacción inicial ocurre rápidamente, y a edades mayores ocurren pocas reacciones o con menor velocidad, ya que serían regidas por otros procesos, como disolución o liberación de monómeros de interior al exterior de los núcleos de reacción. En el caso de formarse películas o capas por reacciones rápidas iniciales, como en el caso de la RC, esto afectaría el desarrollo posterior.

Para la variable edad, las diferencias significativas se encuentran al comparar los resultados a 90 días con los obtenidos a las otras edades, mientras que si se comparan entre 14 y 28 días estos no tienen diferencias significativas. Esto indica que es entre 28 y 90 días que ocurren cambios en la estructura interna del material, que afectan la propagación de la onda, y, ya que los resultados de densidad y porosidad no muestran cambios significativos con la edad, estos cambios deben estar ligados a las propiedades elástico-dinámicas del material.

Para morteros, existen criterios de evaluación de su calidad con base en valores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), los cuales están descritos en el manual de la Red DURAR (Red Durar, 1997). Este criterio es utilizable debido a que la medición de VPU corresponde a la de V_p , ya que se utilizan transductores de onda tipo P. Si se emplea este criterio, se pueden clasificar los morteros de CAA obtenidos dentro de la categoría de “calidad normal”, con uno, el que contiene 10% CBC y 10% Na_2O , ubicado en la clasificación de “alta calidad”.

3.2 Atenuación

En mezclas de morteros se ha observado experimentalmente que la atenuación a altas frecuencias (>300 kHz) se debe principalmente al agregado fino y al tamaño de granos presentes en éste, mientras que a bajas frecuencias (<300 kHz) se debe principalmente a la pasta del material cementante (Aggelis, et al., 2005). Por la frecuencia del transductor empleado, de 50 kHz, y el hecho de haber utilizado arena de sílice con una graduación específica para todos los morteros, los resultados de atenuación pueden atribuirse a las características del material en estudio, es decir, la atenuación es el resultado de cambios en las matrices cementantes de los CAA preparados con CV y CBC.



3.3 Atenuación espacial (α_e)

En la Figura 5 se presentan los resultados de α_e en forma de diagramas de cajas y bigotes, para las diferentes mezclas de morteros a 14, 28 y 90 días. Se observa que el rango de valores obtenidos para α_e se encuentran acotados entre 5.5 y 8 dB, lo que representa una atenuación de la señal original entre 40 y 50%. Las mezclas con adiciones de CBC no presentan valores mucho menores que aquellas conteniendo 100%CV, lo que permite suponer que la sustitución de CV por CBC no provoca disminuciones en la densidad del medio de manera importante, lo cual corresponde a lo encontrado en el análisis de la densidad volumétrica.

Los resultados muestran incrementos de la atenuación espacial con un rango de 1-1.5 dB (6-7% en amplitud) entre las edades de 14 a 28 días, para todas las mezclas. Si se comparan los resultados entre 28 y 90 días, presentan menores diferencias, la mayoría de tendencias son a incrementarse, a excepción de dos mezclas, la que contiene 10% CBC y 10% Na_2O , y la mezcla con 20% CBC y 14% Na_2O , las cuales presentan disminuciones de la α_e a 90 días.

El incremento en el porcentaje de Na_2O parece tener una influencia incrementando los valores de atenuación para las mezclas 100% CV y las mezclas con sustituciones de 10% de CV por CBC; para la mezcla con 20% de CBC, la α_e se incrementa al pasar de 10 a 12%, mientras que para el nivel de 14 % de Na_2O se observa una disminución del valor de α_e .

La atenuación espacial está ligada a la densidad del medio, así como a su homogeneidad, esperando menores valores de atenuación en materiales más densos y homogéneos, y con menores discontinuidades en su interior.

Los resultados a 14 días muestran correspondencia entre los valores más altos de α_e obtenidos con las mezclas donde se presenta una combinación de mayor porosidad y disminuciones en la densidad volumétrica. A 28 y 90 días los valores de densidad para las distintas mezclas no presentan grandes diferencias o cambios relevantes, y siguen conservando su relación a incrementar en valor con los valores mayores de porosidad.

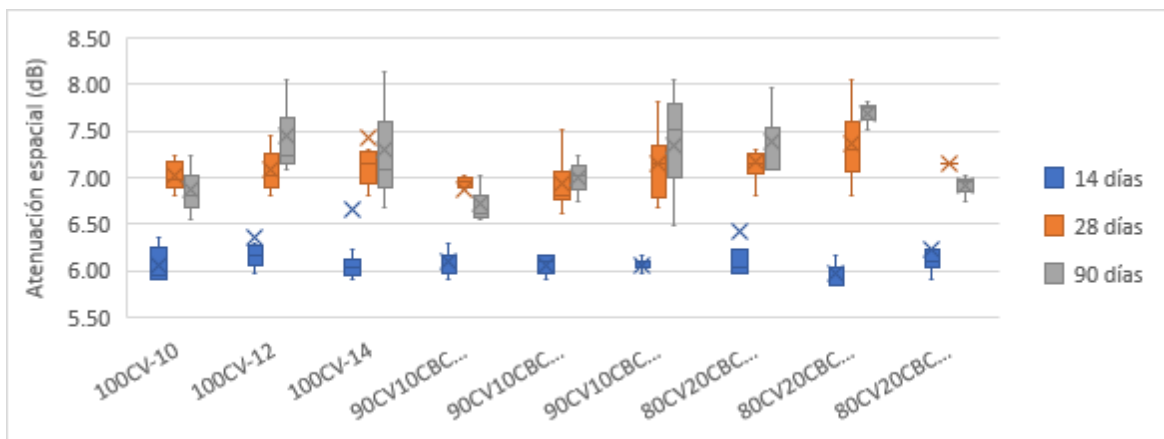


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes para la atenuación espacial de las mezclas de morteros a 14, 28 y 90 días.

En la mayoría de las mezclas se observan mayores valores de α_e en las mezclas con mayor porosidad, a excepción de tres mezclas: la que contiene 10% de CBC con 12% de Na_2O , y dos mezclas con 20% CBC y 12 y 14% de Na_2O . En estas mezclas se observan valores mayores de atenuación a los esperados dada su densidad y porosidad, estos resultados pueden deberse a la presencia de poros o discontinuidades puntuales muy grandes en los especímenes elaborados con

estas mezclas, o a pérdidas por dispersión o absorción mayores en estas mezclas de morteros.

3.4 Atenuación temporal (α_t)

En la Figura 6 se presentan los diagramas de cajas y bigotes de los resultados de α_t para las diferentes mezclas de morteros de CAA a 14, 28 y 90 días. La atenuación temporal indica como la señal se atenúa en función del tiempo a través del material. Los valores de α_t para los morteros de CAA elaborados se encuentran en el rango de 22636-35536 dB/s. Se puede observar que la atenuación temporal muestra un desarrollo paralelo a la atenuación espacial.

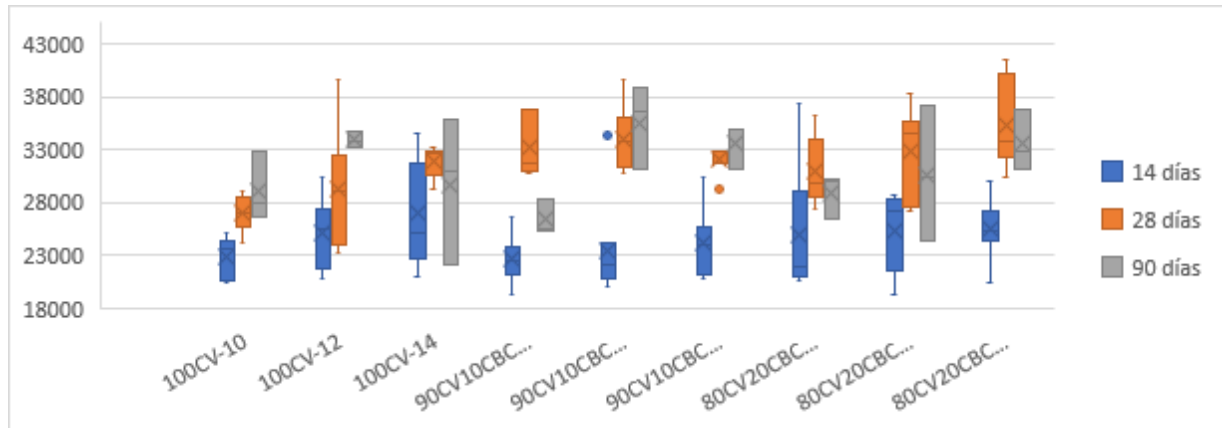


Figura 1.. Valores de atenuación temporal para las diferentes mezclas.

Se observa que existen diferencias en la α_t con respecto a las edades, ya que se observan diferencias grandes al comparar los resultados de 14 y 28 días, con incremento notorio entre la edad mayor y la menor. Para comparaciones entre los valores encontrados en 28 y 90 días, se observan diferencias, pero en menor medida.

El porcentaje de reemplazo de CV por CBC parece relacionarse a los valores mayores de α_t , aunque las mezclas presentan menor porosidad. Estos valores altos de α_t entonces deben estar relacionados a la presencia de poros o discontinuidades puntuales muy grandes en los especímenes, o a mayores pérdidas por dispersión o absorción en este tipo de mezclas, o a la unidimensionalidad en cuanto a la aplicación del pulso ultrasónico.

Se aprecia que el aumento en el porcentaje de Na_2O parece mostrar una ligera tendencia a incrementar los valores de α_t .

Los resultados obtenidos concuerdan con aquellos para la atenuación espacial. Se observa a 14 días una relación con los valores mayores de porosidad y con los menores de densidad volumétrica. A 28 y 90 días se sigue observando la relación con la porosidad, observándose mayores valores de α_t en las mezclas que presentan mayor porosidad, con la excepción de algunas mezclas: la que contiene 10% de CBC con 10 y 12% de Na_2O , y las mezclas con 20% CBC y 12 y 14% de Na_2O .

3.5 Energía de la señal (ϵ)

En la Figura 7 se muestran los resultados del contenido energético de la señal, obtenida en forma adimensional como el área bajo la curva de la derivada de la transformada de Fourier en el dominio del tiempo, y por tanto, en términos de velocidad. Los resultados se encuentran en un rango de

3,317,900-7,185,833 (m/s).

Los resultados muestran una disminución del contenido energético al pasar de 14 a 28 días, mientras que si se comparan las edades de 28 y 90 días los resultados no muestran grandes diferencias. Estos resultados son opuestos a lo ocurrido en el caso de las atenuaciones espacial y temporal (α_e y α_t), y coinciden con los principios de la propagación de señales, que a valores mayores de energía corresponden menores valores de atenuación.

La sustitución de CV por CBC no muestra un efecto negativo importante el contenido energético de las señales. El incremento en el porcentaje de Na_2O muestra una tendencia a disminuir los resultados de contenido energético en las señales para las mezclas con 100% CV, y 10% CBC, mientras que para las mezclas con 20% CBC no se observa esta tendencia. Las barras de error se traslapan en la mayoría de los casos, por lo que no se puede hablar de un efecto evidente o pronunciado.

Se puede mencionar que las barras de error son más grandes en la edad de 14 días, a comparación de las barras de error para edades posteriores, lo que muestra que hay una mayor variabilidad en el contenido energético de las señales a edades tempranas, y los valores son más consistentes a edades posteriores.

En la Figura 7 se muestra el contenido energético y los valores de porosidad y densidad a las diferentes edades de prueba. Se observa una correspondencia entre los mayores valores de energía y los menores valores de porosidad. En los casos donde la reducción de la energía no se corresponda a incrementos importantes en los valores de porosidad o valores altos de densidad volumétrica, la explicación puede atribuirse al retardo o dispersión de la señal ultrasónica debido a defectos puntuales o propiedades intrínsecas del material, o en dado caso a la unidimensionalidad de la prueba de pulso ultrasónico, ya que la presencia de un poro especialmente grande en la trayectoria de aplicación del pulso puede afectar de manera importante el resultado en el cálculo de la energía.

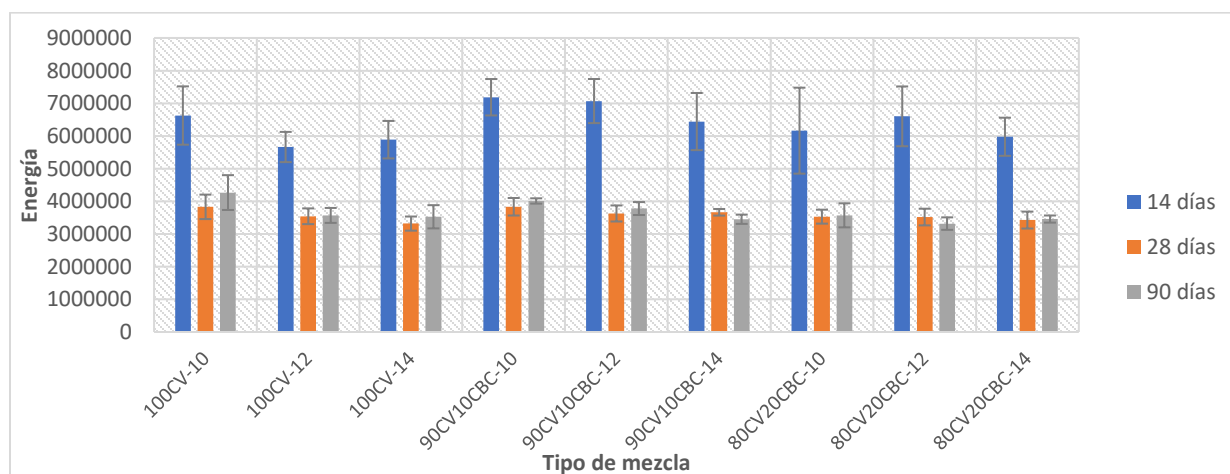


Figura 2. Energía de la señal para las diferentes mezclas de morteros a 14, 28 y 90 días.

3.6 Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión en morteros de CAA para las diferentes mezclas y edades de los especímenes se muestran en la Tabla 5. Los valores son reportados en MPa, y el rango de valores es de 16.24-27.06 MPa.

Tabla 5. Resultados de resistencia a la compresión de los morteros de CAA elaborados a 7, 14, 28 y 90 días (MPa)

Mezcla	% CBC	% Na ₂ O	Promedio RC 7 días	Desv. Est	Promedio RC 14 días	Desv. Est	Promedio RC 28 días	Desv. Est	Promedio RC 90 días	Desv. Est
100CV-10	0	10	19.44	1.45	22.96	1.16	22.36	2.84	27.06	1.30
100CV-12	0	12	22.29	2.49	20.56	4.37	21.22	2.49	19.58	4.16
100CV-14	0	14	23.64	2.90	21.88	4.87	21.82	1.98	18.82	3.78
90CV10 CBC-10	10	10	18.06	0.97	18.61	5.73	20.70	0.77	23.79	4.46
90CV10 CBC-12	10	12	19.55	0.98	20.05	1.43	21.06	1.75	21.93	1.31
90CV10 CBC-14	10	14	21.12	0.28	19.85	1.24	19.15	2.74	20.25	0.61
80CV20 CBC-10	20	10	16.79	0.98	16.24	0.93	16.85	3.55	18.82	1.65
80CV20 CBC-12	20	12	18.78	1.20	18.25	0.71	19.32	2.11	23.00	1.67
80CV20 CBC-14	20	14	18.29	1.82	17.59	2.39	20.25	1.32	20.83	0.87

La resistencia inicial de los CAA con 100% CV es más alta que en los sistemas combinados, sin embargo, al aumentar la edad se observa una disminución en la RC para los niveles de 12 y 14% de Na₂O, mientras que para 10% de Na₂O la RC se incrementa. En los sistemas con 10 y 20% de CBC la RC de los morteros presenta una tendencia a incrementar con la edad, siendo este incremento más pronunciado entre 28 y 90 días.

En cuanto al porcentaje de Na₂O, para las mezclas 100% CV se aprecia un incremento en la RC en la edad de 7 días para las mezclas con 12 y 14% de Na₂O, pero se observa una disminución en el incremento de RC a edades mayores. Para las mezclas con porcentajes de reemplazo de CV por CBC se observa un incremento en la RC al aumentar el porcentaje de Na₂O de 10 a 12%, mientras que este incremento en el nivel de 14 % se aprecia menor o poco significativo.

Para investigar la significancia estadística de los factores en los valores de RC obtenidos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se muestran en la Tabla 6. La prueba fue realizada con un intervalo de confianza del 95%, con el criterio de rechazo basado en el p-valor $\alpha=5\%$. El análisis de varianza muestra que los factores que afectan a la RC son la edad y el %CBC, y, aunque el factor %Na₂O no tiene influencia por sí misma, si lo tienen sus interacciones con el %CBC y con la edad.

Tabla 6. Análisis de varianza de los resultados de resistencia a la compresión en morteros.

Análisis de varianza para los valores de RC					
Normality Test:	Passed	(P = 0.163)			
Equal Variance Test:	Passed	(P = 0.581)			
Fuente de variación.	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-valor	P-valor
%CBC	2	189.176	94.588	15.726	<0.001
Edad	3	58.066	19.355	3.218	0.028
% Na₂O	2	2.867	1.434	0.238	0.789
%CBC x Edad	6	23.894	3.982	0.662	0.68
%CBC x % Na₂O	4	68.02	17.005	2.827	0.031
Edad x % Na₂O	6	113.215	18.869	3.137	0.009
%CBC x Edad x % Na₂O	12	82.8	6.9	1.147	0.337
Residual	72	433.049	6.015		
Total	107	971.087	9.076		

Para conocer con certeza que niveles son estadísticamente diferentes entre sí, y evitar la contribución de los valores extremos a la significancia o no de los factores, se realizó la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un intervalo de confianza del 95%. Los resultados de la prueba para cada una de las edades de curado se muestran en la Tabla 7, en un arreglo similar al presentado por (Pérez-Cortés, et al., 2016). Los niveles de los factores que no comparten alguna letra son estadísticamente diferentes en el intervalo de confianza analizado. De los resultados obtenidos, se extrae que el incremento en la sustitución de CV por CBC, provoca una disminución en los valores de RC obtenidos en los morteros. Sin embargo, se observa que, a los 90 días estas diferencias se vuelven poco significativas, debido sobre todo a la tendencia mostrada en los CAA con 100% CV a disminuir su RC con la edad, y en los sistemas combinados (con 10 y 20% de CBC), de manera contraria, a incrementarse.

Tabla 7. LSD de Fischer de la RC de morteros con un intervalo de confianza del 95 %

Factores	Niveles	General			7 días			14 días			28 días			90 días		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Agrupamiento	% CBC															
	0	X			X			X			X			X		
	10		X		X	X			X	X			X	X		
	20			X		X			X		X			X		
% Na₂O	10	X			X			X			X			X		
	12	X			X	X		X		X		X		X	X	
	14	X				X		X		X		X			X	
Edad	7	X														
	14	X														
	28	X	X													
	90		X													

En el caso del Na₂O, no hay diferencias significativas al comparar niveles próximos entre sí (10 % vs 12%, y 12% vs 14%), pero si las hay si se comparan los niveles más alejados (10 vs 14%). Se



observa que el incremento del % Na₂O unido al incremento en el % CBC, tiende a incrementar la RC. Cuando se observa el incremento de edad, se un incremento de la RC en los sistemas con sustituciones de CV por CBC, mientras que en aquellos 100% CV no se observan incrementos, e incluso a 90 días se observan disminuciones.

Para la variable edad, los resultados de la prueba LSD de Fischer muestran que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las primeras tres edades (7, 14 y 28 días), y tampoco hay diferencia si se comparan las dos últimas (28 vs. 90 días), encontrándose únicamente diferencias al comparar la última edad con las dos primeras (7 vs 90, o 14 vs 90). Los resultados coinciden con lo reportado en la literatura, donde se establece que los CAA desarrollan la mayor parte de su RC a edades tempranas, aunque con cierto grado de desarrollo, más lento, en edades posteriores (Duxson, et al., 2007).

Se ha reportado en la literatura que la temperatura de curado es un factor determinante durante las primeras horas de reacción. La temperatura utilizada durante el curado inicial (80°C) pudo provocar una reacción demasiado rápida con la formación de productos de reacción en forma de capas, que envuelven partículas sin reaccionar en su interior, como se ha reportado en algunos casos (Puligilla & Mondal, 2013) (Duxson, et al., 2007) (Pérez-Cortés, et al., 2016). Este hecho podría ser responsable de lo ocurrido en los sistemas 100%CV, en los que al incrementar el porcentaje de activador provocan una reacción muy rápida inicial, mientras que a edades posteriores no reaccionan más.

Los mayores contenidos de silicatos pueden explicar las RC mayores en sistemas con 100% CV a edades tempranas, y también, esto mismo podrían explicar la pérdida de RC al incrementar los porcentajes de activador en estas mezclas, ya que se podría favorecer la formación de estructuras metastables debido al alto contenido de silicatos. Por otra parte, la ganancia en la RC con el aumento de la edad en los sistemas combinados puede atribuirse a que la adición de CBC contribuye a incrementar la relación Si/Al de los productos formados, debido a su contenido menor de aluminatos en comparación con la CV, y por consiguiente produce la formación de una red más estable en los productos finales. La disminución de la RC al incrementar el porcentaje de CBC debe ser entonces atribuida a las características de la ceniza, como la forma alargada e irregular de las partículas y las impurezas como el contenido de carbón de la CBC.

De acuerdo con los valores de RC obtenidos en el ensayo a 28 días, los morteros de CAA obtenidos pueden clasificarse de acuerdo con la clasificación establecida por la norma ASTM C1329 y la UNE-EN 1504-3:2006. De acuerdo con los criterios de la ASTM la mayoría de los morteros corresponden al tipo M, a excepción de la mezcla con 20% CBC y 10% Na₂O, la cual corresponde al tipo S. La clasificación de los morteros de acuerdo a las normas de la Unión Europea, es del tipo no estructural, con clase resistente R2. Los resultados de las clasificaciones obtenidas indican que este tipo de morteros si pueden ser utilizados para aplicaciones en la industria de la construcción, ya sea como morteros de junta, aplanados o para la fabricación de blocks prefabricados, que son los usos que establecen las normas según la clasificación obtenida

4. CONCLUSIONES

Con base en el análisis y discusión de resultados se presentan las siguientes conclusiones:

- La adición de CBC sustituyendo CV tiene un impacto significativo en la RC, disminuyendo con el incremento en el porcentaje de sustitución; la edad de los especímenes tiene una influencia significativa en los valores de RC, las diferencias encontradas son mayores al comparar 14 y 28



días, mientras que estas diferencias son menores o no significativas al comparar entre 28 y 90 días. Por su parte, el % de Na_2O no muestra una influencia estadísticamente significativa sobre los resultados de RC, pero presenta interacciones significativas con los otros factores, por lo que su contribución real al desarrollo de la RC es poco clara. De acuerdo con los valores de RC obtenidos, contrastados con los criterios de las normas ASTM C1329 y la UNE-EN 1504-3:2006, los morteros de CAA obtenidos si pueden ser utilizados para aplicaciones en la industria de la construcción, ya sea como morteros de junta, aplanados o para la fabricación de blocks prefabricados

- Para los parámetros ultrasónicos de velocidad (V_p), el % de sustitución de CV por CBC no afecta los valores de manera significativa; el incremento en el porcentaje de Na_2O disminuye los valores encontrados, y los mismos incrementan con la edad, y de manera más pronunciada entre 28 y 90 días. Estos resultados indican que, con la edad, y sobre todo entre 28 y 90 días ocurren cambios en la estructura interna del material, que afectan la propagación de la onda, y, ya que los resultados de densidad y porosidad no muestran cambios significativos con la edad, estos deben estar ligados a las propiedades elástico-dinámicas del material.
- Para los parámetros que caracterizan aspectos energéticos de la señal (α_e , α_t y ϵ), el incremento en el % de Na_2O y de sustitución de CV por CBC en los niveles utilizados no afectan de manera significativa a estos parámetros, siendo la edad la variable que muestra una mayor influencia, al incrementar de manera importante los valores de α_e y α_t y disminuirlos valores de ϵ , entre 14 y 28 días. Los valores de α_e acotados entre 5.5-8 dB, permite cuantificar que la atenuación de la señal original en el material es entre 40-50%.
- Los parámetros energéticos muestran una congruencia entre sí, y con los resultados estimados para la porosidad de los morteros, de manera que se tienen valores de energía altos en los especímenes que presentan atenuaciones bajas en combinación con valores menores de porosidad, y contenidos energéticos disminuidos en los especímenes con valores altos de atenuaciones y porcentajes altos de porosidad.
- El análisis de los resultados para los diversos parámetros ultrasónicos indica que no son afectados negativamente por el incremento en el porcentaje de reemplazo de CV por CBC. Este resultado es significativo ya que no se ha encontrado reportado en la literatura. Los resultados anteriores, más la disminución del porcentaje de porosidad con el incremento de CBC, parecen indicar que los valores menores de RC obtenidos en los sistemas combinados no están ligados a la aparición de discontinuidades importantes, y deben atribuirse a un cambio en los productos de reacción formados o la influencia de las impurezas aportadas por la CBC, así como a la forma y tamaño de las partículas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional de México mediante los proyectos SIP-20230346, SIP20242799 y SIP20240133.

6. REFERENCIAS

- ACI commite 209, 1997. ACI committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure, s.l.: American Concrete Institute.
- Arenas-Piedrahita, J. C. et al., 2016. Mechanical and durability properties of mortars prepared with



- untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials*, Volume 105, p. 69–81.
- ASTM International, 2014. ASTM C-270 Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. s.l.:s.n.
- ASTM International, 2015. ASTM C1437 - 15 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International, 2016. ASTM C1329/C1329M Standard Specification for Mortar Cement. s.l.:s.n.
- ASTM-International, 2012. ASTM C778-12, Standard Specification for Standard Sand. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- ASTM-International, 2013. ASTM C109 / C109M-13e1, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM-International, 2014. ASTM C230 / C230M-14, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bitá, H. et al., 2017. Ultrasonic nondestructive characterization of mortars by the width of the resonances. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 186(1).
- Carette, J. & Staquet, S., 2015. Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement. *Construction and Building Materials*, Volume 94, p. 196–208.
- Duxon, P. et al., 2007. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers.. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), pp. 8-20.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A. & Kaczmarek, M., 2006. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, Volume 36, pp. 625-633.
- Liang, M. T. & Wu, J., 2002. Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures. *Cement and Concrete Research*, Volume 32, p. 1763– 1769.
- Martínez-Martínez, J., 2008. Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos), Alicante: Universidad de Alicante.
- Panzerá, T. H. et al., 2001. Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. In: D. P. Tesinova, ed. *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*. Rijeka, Croacia: InTech Europe, pp. 411-436
- Pérez-Cortés, P., Montes-García, P. & Escalante García, J. I., 2016. *Cende bagazo de caña para la síntesis de nuevos cementos compósitos con ceniza volante*, Oaxaca de Juárez, México: CIIDIR-Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional.
- Popovics, S., Rose, J. L. & Popovics, J. S., 1990. The behavior of ultrasonic pulses in concrete. *Cement and Concrete Research*, 20(2), p. 259–270.
- Popovics, S. & Popovics, J. S., 1991. Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. *Materials and Structures*, 24(1), p. 15–23.
- Puligilla, S. and Mondal, P. (2013) *Microstructural Changes Responsible for Hardening of Fly Ash-Slag Geopolymers Studied Through Infrared Spectroscopy*, ASTM International and American Society for Testing and Materials. <https://books.google.com.mx/books?id=L6t7zgEACAAJ>, Publisher ASTM International.

- Punurai, W., Jarzynski, J. & Qu, J., 2007. Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research*, 37(1), p. 38–46.
- Sipusic, J., Ukrainczyk, N. & Vrbos, N., 2013. Compressive strength of calcium aluminate mortar determined by ultrasonic non-destructive test method. *Advances in Cement Research*, 25(3), p. 143–154.
- Red Durar, 1997. Red DURAR. “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Maracaibo, Venezuela: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. CYTED.
- Tharmaratnam, K. & Tan, B. S., 1990. Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, Volume 20, p. 335– 345.
- Wang, C.-C., Wang, H.-Y., Chen, B.-T. & Peng, Y.-C., 2017. Study on the engineering properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass. *Construction and Building Materials*, Volume 132, p. 130–141.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W. & Setunge, S., 2017. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, Volume 143, p. 272–279.
- Ye, G., Lura, P., van Breugel, K. & Fraaij, A. L. A., 2004. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cement & Concrete Composites*, Volume 26, p. 491–497.



Evaluación comparativa del desempeño de diferentes fibras estructurales dosificadas como refuerzo en términos de su área superficial específica en concretos fibro-reforzados

F. Zuñiga-Gamez¹, L. G. López-Yepez¹, C. A. Juárez¹, A. Duran-Herrera^{1*}

*Autor de Contacto: alejandro.duranhr@uanl.edu.mx

^{1*} Facultad de ingeniería civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolas de lo Garza, México.

RESUMEN

En la actualidad, las fibras de acero o sintéticas han cobrado mucha relevancia como refuerzo para el concreto, las cuales para su incorporación se dosifican en términos de volumen con relación al volumen del concreto, sin embargo, en las últimas fechas como resultado del surgimiento de muchas opciones de fibras sintéticas estructurales, con propiedades mecánicas, elásticas y geométricas muy diferentes a las que presentan las fibras de acero disponibles en el mercado y a la comparación en términos de costo que se hace entre ambas, resulta necesario evaluar el desempeño de las fibras mediante una metodología que compare el desempeño de las fibras, independientemente del material. Para este fin, en este trabajo se propone evaluar el desempeño a flexión y tenacidad de diferentes fibras dosificándolas en términos de su superficie específica. La cuantificación de la tenacidad se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma europea EN 14651, que emplea vigas de concreto ranuradas para inducir y controlar la aparición de la grieta durante el ensaye justo al centro del claro de la viga. En este trabajo los resultados nos permitieron generar una gráfica que correlaciona la tenacidad bajo flexión y la dosificación de la fibra en términos de superficie específica, misma que se vislumbra resultara de mucha utilidad para que los ingenieros en la práctica seleccionen la fibra más económica, con menor huella ecológica que ayuden a satisfacer los requisitos de tenacidad del proyecto.

Palabras clave: Absorción de energía, Tenacidad, Superficie específica, Concreto fibro-Reforzado.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado con fibras (FRC) ha emergido como una innovación revolucionaria en la industria de la construcción, transformando la manera de cómo se diseñan y construyen las estructuras. Esta tecnología combina los materiales tradicionales para la fabricación del concreto con el uso de fibras de refuerzo, ofreciendo una serie de ventajas sobre el concreto convencional en términos de resistencia, durabilidad y rendimiento estructural. La inclusión de fibras en el concreto no solo mejora su resistencia a la tensión y flexión, sino que también proporciona una mayor resistencia al agrietamiento por contracción y mejora la tenacidad del concreto, lo que resulta en estructuras más duraderas y seguras.

El desarrollo de nuevas tecnologías en los materiales y la experiencia de trabajo de campo han permitido ampliar el conocimiento para la aplicación del concreto reforzado con fibras[1]. De acuerdo con el American Concrete Institute “Report on the physical properties and durability of fiber reinforced concrete” las fibras se han utilizado como refuerzo de materiales frágiles. Desde 1967, diferentes tipos de fibras han mejorado con éxito las propiedades físicas y la durabilidad del concreto.

Los requerimientos de las nuevas estructuras han dado paso al desarrollo de diferentes tipos de fibras que satisfagan las necesidades presentes en la industria de la construcción. Así mismo las fibras han recibido ciertas clasificaciones para permitir una distinción entre estas mismas, es de ahí que desde el tipo de material existen las metálicas y las sintéticas; las fibra metálicas se fabrican de acero, y se usan como un refuerzo estructural en concretos que requieren presentar altos desempeños estructurales en aplicaciones como pisos industriales, pistas de aeropuertos y en la industria minera; mientras que en las sintéticas existen distintos materiales siendo el más utilizado el polipropileno. Estas fibras en principio se utilizaban para reducir los agrietamientos por contracción en el concreto [2], sin embargo, se han estado desarrollando fibras que puedan satisfacer necesidades estructurales.

Así mismo existe una clasificación con relación al tamaño del diámetro del filamento que a su vez es una característica importante para determinar el uso que se le puede dar a la fibra. Cuando el filamento tiene un diámetro que va de 0.05mm a 2.0mm reciben el nombre de macrofibras, las cuales son idealmente utilizadas como refuerzo estructural ya que por su tamaño permiten distribuir mejor las cargas dentro de la matriz de concreto[3]. Cuando las fibras tienen un diámetro que va de 0.023mm a 0.05mm reciben el nombre de microfibras, las cuales tienen la función de disminuir los agrietamientos por contracción dentro del concreto.

No obstante, la manera en que las fibras se dosifican para una mezcla de concreto se ha mantenido a lo largo del uso de estas en la industria de la construcción, esta dosificación por volúmenes ignora propiedades importantes de las fibras como lo son el diámetro y su longitud. Las fibras se dosifican en relación al volumen total de la mezcla siendo los porcentajes más comunes en las fibras estructurales los que están entre 0.5% (utilizado para disminuir los agrietamientos que pueda sufrir la matriz por contracción) y 3.0%(utilizado para cumplir una función estructural de mejora de la resistencia ante los esfuerzos de tensión y de capacidad de absorción de energía del material) [4], lo que podría generar un sobreadición de las fibras en el concreto conduciendo esto pérdida de trabajabilidad y aumentos de costos totales de la mezcla de concreto.

Es por eso que en esta investigación se ha desarrollado un método donde las propiedades geométricas del filamento son relevantes ya que se permite cuantificar la superficie de contacto de la fibra disponible para adherirse a la matriz de concreto, lo que conduce a una mejor optimización



de uso de la fibra en el material, este concepto tiene como principio el que la longitud de los filamentos permiten mejorar la resistencia a la flexión del concreto[3], ya que esta característica geométrica de la fibra, habilita a la matriz para generar una mejor distribución de los esfuerzos de tensión internos dentro del material.

En ese sentido en trabajo de investigación se tiene como objetivo implementar un método de dosificación diferente, que permita tomar en cuenta las propiedades antes mencionadas de las fibras, de manera que se logrará hacer una selección más asertiva en cuanto a la cantidad de filamentos que se deben agregar a la mezcla de concreto para satisfacer los requerimientos estructurales del proyecto. Este método de dosificación distinto al tradicional tiene por nombre de dosificación por superficie específica.

La superficie específica es una medida aplicada a todos los sólidos con granos o partículas y es una propiedad importante debido a que muchos procesos físicos y químicos tienen lugar en la superficie de los sólidos, en el caso de las fibras, la definición de la superficie específica está ligada al área disponible que tiene un filamento para estar en contacto con la matriz de concreto.

Si conoce esta medida para integrarla a una mezcla de concreto, permite cuantificar de una manera puntual el desempeño que está teniendo la fibra dentro de la matriz en relación con el área de contacto que esta tiene disponible. Esta superficie específica se calcula con base a las propiedades geométricas de la fibra (diámetro y longitud) obteniéndose esta característica para cada fibra, la cual al considerarse en porcentajes definidos dentro de la masa de concreto permite conocer su efecto en la matriz desde el punto de vista desde la flexión o en su capacidad para absorber energía [5].

Cuando se habla acerca de la capacidad de absorción de energía en el concreto, se refiere a la capacidad de resistir y disipar la energía durante la carga, lo que eleva el punto en el que este alcanza su falla y el agrietamiento cuando se encuentra bajo cargas dinámicas y de impacto.

Hay varios mecanismos por los cuales las fibras contribuyen a la absorción de energía en el concreto[6]; Cuando se necesita un refuerzo de tenacidad, las fibras actúan como un refuerzo disperso aleatoriamente dentro de toda la matriz, por lo cual distribuye de manera tridimensional los esfuerzos en todo el material. Lo que aumenta su absorción de energía antes de llegar a la falla. Cuando se necesita mejorar el control del agrietamiento: Las fibras permiten controlar la propagación de las fisuras, de manera que el escenario en el que se produzca una falla repentina es más complicado y a su vez esto permite que el material pueda deformarse en mayor medida antes de llegar a la ruptura. De la misma forma la mejora la resistencia al impacto, ya que la dispersión de las fibras dentro de la matriz permite una mejor distribución de las tensiones internas, lo que mejora su resistencia al impacto. Y finalmente el incremento de la resistencia a la fatiga: Debido a que las fibras son las encargadas de soportar los esfuerzos de tensión dentro de la matriz de concreto, estas pueden soportar cargas repetitivas sin que el material en su totalidad tenga un deterioro en su capacidad de absorber energía.

Como se observa en los mecanismos que tienen las fibras dentro de la matriz, la capacidad de absorción de energía es una propiedad importante que se ve mejorada debido a la adición de este refuerzo al concreto, por lo que es necesario cuantificarla de manera confiable. Uno de los ensayos para poder cuantificar la absorción de energía en un material fibroreforzado es mediante la norma "EN 14651 viga ranurada". Este ensayo permite determinar la capacidad de absorción de energía que existe en el material, esto gracias a que esta propiedad se define como el área bajo la curva en un diagrama de esfuerzo deformación.

En este trabajo de investigación, se busca desarrollar una herramienta que permita correlacionar la superficie específica de una fibra con la capacidad de absorción de energía del material,



permitiendo realizar una mejor selección de una fibra con a base a sus características geométricas y a la vez seleccionar la cantidad necesaria de fibra dentro de la matriz para poder alcanzar una tenacidad requerida por el proyecto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

En esta investigación se utilizó cemento comercial CPC 40 de acuerdo con las especificaciones de las normas mexicanas NMX-C-414, agregado grueso calizo de la región noreste de México con tamaño máximo nominal de 3/8” el cual se obtuvo mediante cribado para asegurar el tamaño necesario y agregado fino #4. Se usó polvo de caliza como “filler” para densificar la matriz de concreto y 2 tipos de aditivos: HRWR (Flowcon P01) base policarboxilato para obtener un revenimiento de $140.0\text{mm} \pm 2.0\text{mm}$ y un aditivo acelerante (Sureshot SF) de alto rango. Se usaron fibras comerciales de uso estructural de tres diferentes materiales cuyas características principales se observan en la tabla 1, en la misma tabla se observan las densidades de los otros componentes de los concretos con fibras producidos, así como también las absorciones de los agregados finos y gruesos.

En la tabla 1 se presenta la caracterización de los materiales utilizados en el trabajo de investigación.

Tabla 1. Caracterización de fibras y materiales del concreto

ID	Material	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
AC1	Fibra Acero	0.55	35	210	7.80	---
AC2	Fibra Acero	0.55	33	210	7.80	---
BC	Fibra Polipropileno	0.70	54	9.0	0.91	---
PP	Fibra Polipropileno	0.69	51	9.5	0.92	---
K	Fibra Alcohol polivinílico	0.66	30	12.0	0.91	---
EN	FibraAlcohol polivinílico	0.70	50	12.0	0.91	---
---	Cemento	---	---	---	3.10	---
---	Ag. Grueso	---	---	---	2.60	0.66
---	Ag. Fino	---	---	---	2.70	1.69
---	Polvo de caliza	---	---	---	2.70	---

2.2. Métodos

En esta investigación se diseñó una mezcla para un $f'c=400\text{kg/cm}^2$ a los 28 días con un revenimiento de $140.0\text{mm} \pm 2.0\text{mm}$, de igual forma para el diseño de concreto fibroreforzado se consideró un nivel de desempeño de tenacidad (TPL) de 3 según el ACI 506 [7], con el fin de tener

una especificación de desempeño del concreto desde el punto de vista de la tenacidad. En la tabla 2, se puede observar la dosificación de los concretos estudiados los cuales se trabajaron con 3 diferentes materiales para las fibras (acero, polipropileno y Alcohol polivinílico) definiendo dos tipos de fibra para cada material estudiado. Se variaron los porcentajes de adición de fibra (1.0%, 1.5% y 2.0%) respecto a su superficie específica y se fabricaron para cada una de las mezclas 3 probetas.

Tabla 2. Proporcionamiento de mezclas de concreto por superficie específica y por volumen

Mezcla	Diseño de Mezcla (kg/m ³)												
	Agua	cemento	SU	A. Fino	A. Grueso	Aditivo Químico		Fibras					
						Super Plastif.	Aceler.	Superficie Especifica			volumen		
								(ml/kg)		m ² /kg		%	
Referencia	168	350	32	1006	754	4	13	-	-	-	-	-	-
AC1 1.0%	168	350	32	1079	687	4	13	533,333.33	-	-	0.73	-	-
AC1 1.5%	168	350	32	1073	684	4	13	-	800,000	-	-	1.1	-
AC1 2.0%	168	350	32	1067	679	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.5
AC2 1.0%	168	350	32	1079	687	4	13	533,333.33	-	-	0.73	-	-
AC2 1.5%	168	350	32	1073	684	4	13	-	800,000	-	-	1.1	-
AC2 2.0%	168	350	32	1067	679	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.5
BC 1.0%	168	350		1089	693	4	13				1.0		
PP 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.33	-	-	0.92	-	-
PP 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000	-	-	1.38	-
PP 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.84
K 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.33	-	-	0.87	-	-
K 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000	-	-	1.30	-
K 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.75
EN 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.33	-	-	0.93	-	-
EN 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000	-	-	1.4	-
EN 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.85

La tabla 2 muestra el proporcionamiento de las mezclas por el método de la superficie específica el cual consiste en tener en cuenta las dimensiones de cada tipo de fibra tal y como se describe a continuación.

2.3. Metodología del cálculo de superficie específica

Con el fin de tener en cuenta la forma y la longitud de las fibras en la capacidad de las mismas para otorgar ductilidad y disipación de energía en el concreto, se procedió a establecer un procedimiento en el cual se tuviera en cuenta la interacción entre el área de contacto disponible de la fibra con la matriz cementante. Para la implementación de este nuevo método de diseño por superficie específica se toman en cuenta características ya definidas por el fabricante de las fibras comerciales tales como el diámetro (D), la longitud (L) (Ver figura 1) y la densidad de la fibra, dimensiones que permiten calcular la superficie de la fibra que estará en contacto con la matriz del concreto (despreciando las tapas del filamento). A continuación, se describirá un ejemplo: Suponiendo que se cuenta con un filamento de una fibra de sintética que tiene como propiedades geométricas, 0.075 cm de diámetro y una longitud de 3.50 cm, el cálculo de la superficie específica de la fibra se obtendría así:

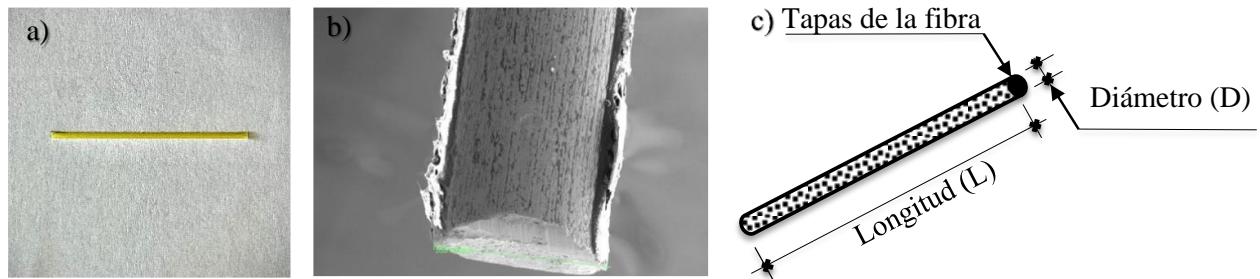


Figura 1. Idealización teórica forma de la fibra para el cálculo de la superficie específica. (a) Forma de fibra sintética, (b) micrografía de fibra. (c) Modelo teórico de forma y dimensión de la fibra.

Se calcula el perímetro teórico a partir de la idealización de que las fibras tienen la forma que se muestra en la figura 1(c), teniendo en cuenta lo anterior para un diámetro constante y una longitud de la fibra determinada por dimensiones comerciales, la superficie específica (SE) es igual a:

$$SE = [(\pi)(0.075\text{cm})] * 3.5\text{ cm} = 0.825\text{ cm}^2$$

Se hace importante en esta metodología el cálculo del volumen (Vu) y del peso (Pu) para finalmente relacionar estos parámetros con la cantidad de fibras que se necesitan para un volumen final, dichos cálculos se muestran a continuación:

$$Vu = [(\pi)0.0375\text{ cm}^2] * (3.5\text{cm}) = 0.0155\text{cm}^3$$

El peso de un filamento:

$$Pu = (0.0155\text{cm}^3) \left(\frac{0.91\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = 0.014\text{gr}$$

Finalmente, si se requiere calcular la superficie específica total para un 1.0% de adición de fibra sintética se realiza lo siguiente:

Si el 1% de fibra sintética es igual a 9.1 kg por metro cúbico, entonces el número de filamentos de fibra (N_f) será igual a $N_f = 9100g/0.014gr = 650,000.00$ filamentos.

Lo que permite definir una superficie específica de total (SE_t) de fibras sintéticas de:

$$SE_t = 650,000.00 * 0.825 \text{ cm}^2 = 536,250.00 \text{ cm}^2$$

Ya habiendo obtenido la superficie específica total de esta fibra sintética, esta cantidad se tomó como base, de manera que el resto de las fibras del trabajo de investigación cubran esta misma superficie de contacto dentro de la matriz de concreto. De esta forma la evaluación se realizó de manera equivalente entre todas las fibras y permitió definir cual presenta el mejor comportamiento respecto a la tenacidad.

Para obtener una la cantidad de fibras a adicionar, se realizó este mismo método solo que de manera inversa, despejando el número de filamentos necesarios a partir de la superficie específica total a cubrir.

Una vez dosificado el concreto se fabricaron probetas para evaluar la resistencia a la compresión del concreto en cada una de las mezclas mostradas en la tabla 2, mediante especímenes cilíndricos de 10cm x 20cm, los cuales se fallaron a las edades de 28 y 56 días.

Las resistencias a la compresión se determinaron a través del procedimiento descrito en la norma ASTM-C109-20 utilizando una maquina universal Instron, Modelo 600DX, con una capacidad máxima de 60 toneladas. Las probetas fueron curadas a $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ con una humedad del 98%.

Con el objeto de conocer los esfuerzos residuales y la tenacidad en las mezclas estudiadas se procedió a fabricar especímenes prismáticos tipo viga de acuerdo con la norma UNE-EN14651 "Viga ranurada", cuyas dimensiones son 60cm x 15cm x 15cm, estas probetas una vez cumplida del edad de 56 días de curado, fueron sometidas a un corte en la mitad del claro para dejar una ranura de 2.5 cm de profundidad en el ancho de la probeta, después de la preparación del ensayo se procedió a ensayar la viga a flexión para de esta forma obtener absorción de energía del material a través del área bajo la curva generada por el ensayo descrito en norma antes mencionada, del cual se obtuvo valores de carga y abertura de ranura (c_{mod}), que permitieron obtener las curvas respectivas de donde se pudo estimar la tenacidad para cada fibra.

Todos los ensayos a flexión se realizaron a una edad de 56 días en una maquina universal Instron Modelo 600DX con capacidad de 60 toneladas, la adquisición de datos carga y desplazamiento se realizó a través de un equipo compacto (DAQ) National Instrument, el cual está vinculado a un a un software funcional programado en Labview.

Todas las probetas después de la fabricación se colocaron en un cuarto con temperatura y humedad controlada durante 24 horas, seguido a esto, los especímenes se desmoldaron y se llevaron a un cuarto de curado con una humedad relativa del 98% y una temperatura del 23 ± 2 donde se mantuvieron hasta alcanzar su edad de ensaye.

3. RESULTADOS.

3.1. Resistencia a la compresión del concreto fibroreforzado.

En la Tabla 3 se muestra las resistencias a la compresión promedios para las edades de ensayos de 28 y 56 días, para las cuales se ensayaron 3 probetas por edad de ensayo.



Tabla 3. Resistencias a la compresión promedio de las mezclas de concreto.

Tipo de mezcla	Edad		Pendiente
	(días)		
	28	56	28 - 56
Referencia	41.8	43.3	5.25
AC1 1.0%	45.8	47.6	6.36
AC1 1.5%	41.7	45.7	14.00
AC1 2.0%	45.0	41.6	-12.11
AC2 1.0%	42.5	45.9	12.04
AC2 1.5%	40.9	43.0	7.63
AC2 2.0%	41.9	42.9	3.50
PP 1.0%	39.2	40.5	4.69
PP 1.5%	42.3	41.5	-2.94
PP 2.0%	41.0	43.5	8.73
Bc 1.0%	39.5	41.3	6.47
K 1.0%	41.1	42.2	3.84
K 1.5%	41.5	42.6	3.92
K 2.0%	41.2	44.1	10.55
EN 1.0%	41.5	42.6	4.13
EN 1.5%	41.1	41.4	1.33
EN 2.0%	39.7	41.0	4.55

La tabla 3 muestra que los cambios en la resistencia a la compresión entre las edades evaluadas presentan pendientes de ganancia de resistencia bajas, excepto en algunos porcentajes de fibras de acero (AC1 1.5%, AC2 1.0% y K1 2.0%) las cuales manifiestan pendientes entre el 10% y el 14% positivas, y de alrededor del 12% negativa para la mezcla AC2 2.0%.

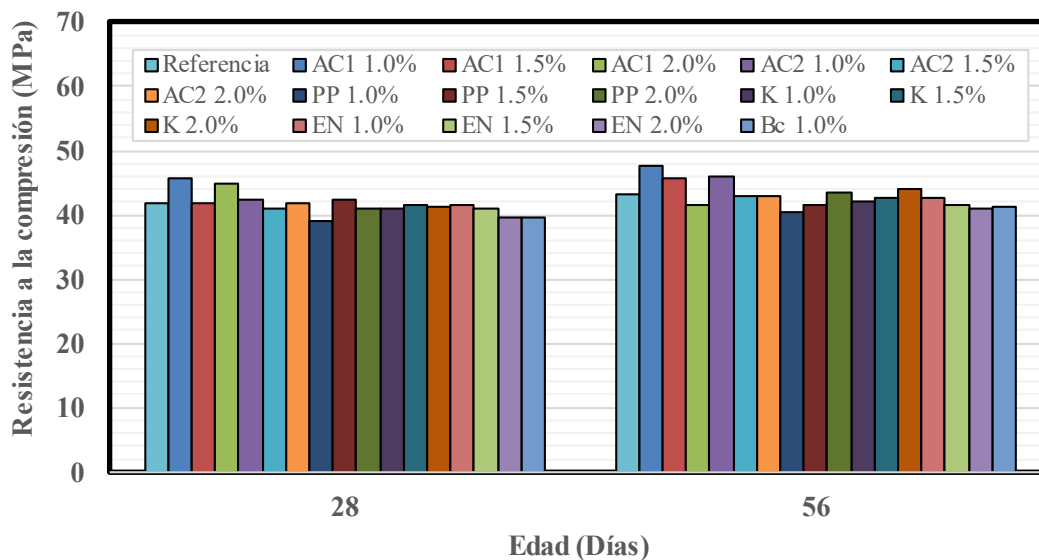


Figura 2. Resistencia a la compresión de concretos reforzados con fibras.

La figura 2 muestra similitud en la resistencia a la compresión entre las distintas fibras estudiadas para una resistencia la compresión especificada (40 MPa), indicando que el método de superficie específica no afecta de manera importante la resistencia del concreto. De igual forma se puede observar los mayores incrementos de resistencias respecto a la resistencia de 40 MPa se da para la mezcla AC1 1.0%, AC1 1.0%, AC2 1.0% PP1 1.5% y K1 2.0 % con incrementos de alrededor del 18, 14, 14, 8 y 10 % respectivamente.

3.2. Resistencia a la flexión del concreto fibroreforzado.

Las gráficas de resistencia a la flexión en el concreto fibroreforzado, se construyeron mediante el ensayo de la viga ranurada EN 14655, para la que se define una curva idealizada curvas carga-desplazamiento definida por diferentes puntos respecto al desplazamiento del CMOD, estos puntos permiten trabajar el cálculo de la tenacidad con una estandarización respecto al desplazamiento máximo de 3 mm, tal y como se puede observar en la figura 3.

En el caso de las fibras de acero la figura anterior muestra que entre mayor sea el porcentaje de fibras, el endurecimiento por deformación del concreto se incrementa, mostrando una mayor disipación de energía respecto al comportamiento de la fibras de polipropileno (BS y PP), en el caso de la fibra de alcohol polivinílico (EN y K), las fibra tipo K, la fibra con un porcentaje de 2, muestra comportamientos similares a las de acero del 1.5 y 2.0% en lo referido a la disipación de energía ya que para esta fibra se ve un comportamiento de endurecimiento por deformación.

Las fibras de acero con porcentajes de 1.0 % muestran degradación después de los 0.25 milímetros de desplazamiento, esto debido a que en esta deformación se reduce la capacidad resistente a la flexión por falta de filamentos que permitan generar mayor resistencia y ductilidad, eso en comparación con las fibras de acero de 1.5%, que, aunque la resistencia es menor que las de 2.0% todavía este porcentaje presenta un comportamiento de endurecimiento por deformación.

Todas las fibras de polipropileno después de los 0.25 mm de desplazamiento presentan degradaciones importantes de la resistencia conservando casi linealidad en la ganancia de carga desde los 0.5 mm hasta los 3 mm de desplazamiento. En este tipo de fibras el porcentaje con mejor comportamiento es el de 2.0%.

Las fibras EN de Alcohol polivinílico, muestran degradaciones después de los 0.25 mm, más sin embargo después de los 0.5 mm se observa en la figura 3 un pequeño endurecimiento por deformación hasta los 2 mm, para después mostrar una segunda etapa de degradación final, lo que indica posiblemente falla en la matriz tanto de las fibras como de la adherencia de las misma con la matriz del concreto.

Por otro lado, las fibras tipo K (1.0 y 1.5%), muestran etapa de degradación a los 0.5 mm, más sin embargo a partir de dicha deformación presentan incrementos de la resistencia por encima del punto de falla del concreto indicando una adecuada disipación de energía en desplazamientos de hasta 3 mm. El mejor comportamiento de las fibras tipo K se da para el 2.0% de adición de fibras con un comportamiento de endurecimiento por deformación.



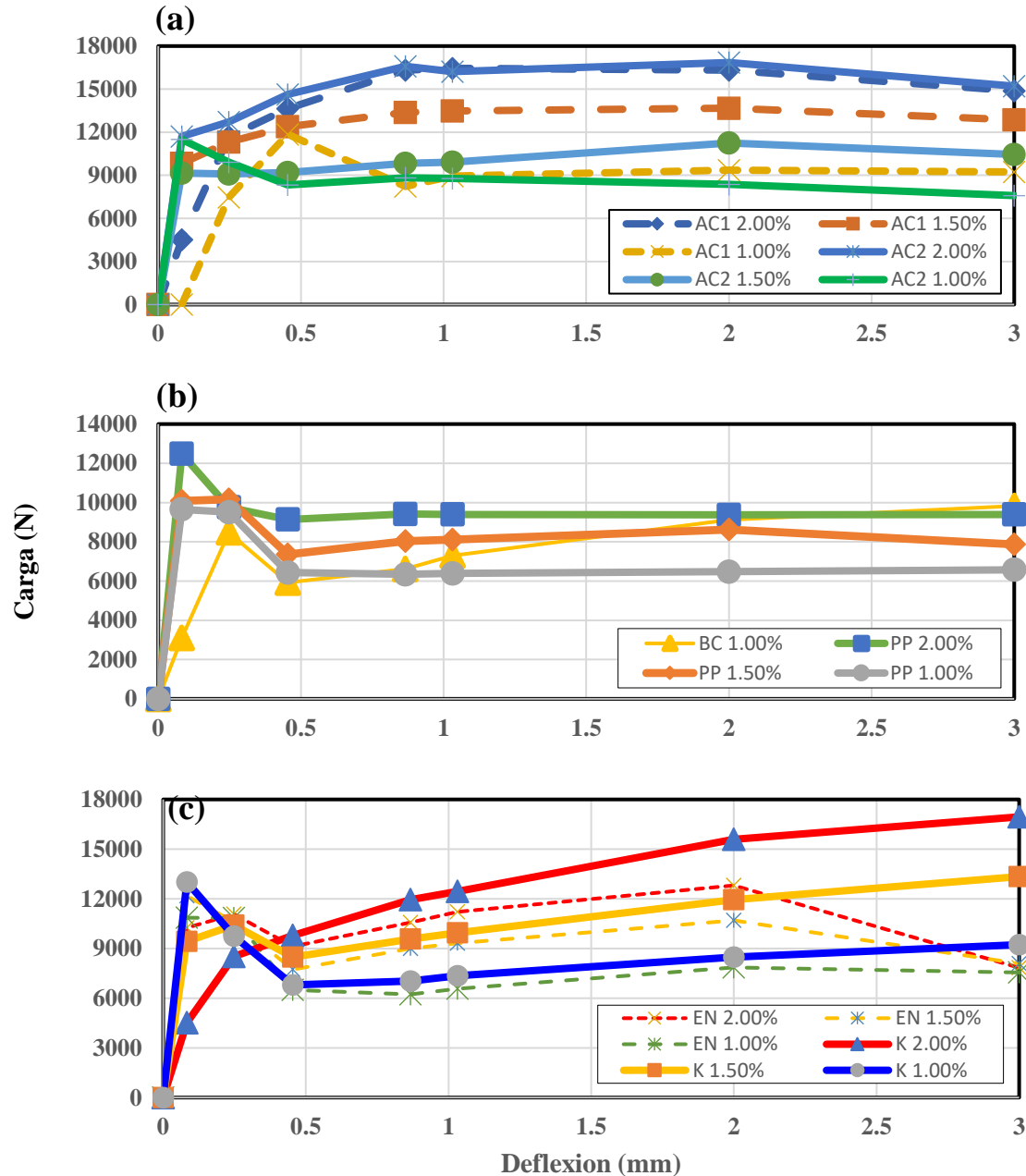


Figura 3. Resistencia a la flexión de concretos con fibras. (a) fibras de acero, (b) fibras de polipropileno, (c) fibra de alcohol polivinílico.

3.3. correlación de la tenacidad bajo flexión vs dosificación de la fibra en términos de superficie específica.

Una vez que se cuantificó la absorción de energía para cada tipo y porcentaje fibra, se realizó un gráfico donde se incluye la absorción de energía contra la superficie específica adherida a la mezcla de concreto, lo que permitió crear una herramienta visual para calcular a través de la superficie específica la tenacidad de las fibras de acero, polipropileno y alcohol polivinílico según las necesidades del proyecto de infraestructura.

Como se mencionó anteriormente la figura 4 muestra la correlación que hay entre la tenacidad presentada en cada porcentaje de fibras y la superficie específica de cada porcentaje analizado, en ella posible mencionar que las fibras de acero son las que mejor se comportan desde la disipación de energía, de igual forma se muestra un resultado atípico en el la fibra AC2 1.5 %, debido a problemas de manejo experimental, más sin embargo por los resultados obtenidos para 1.0 % y 2.0 % es posible plantear que si se establece una tendencia lineal el comportamiento de esta fibra para sus tres porcentajes de evaluación conserva la misma tendencia que la otras fibras ensayadas en esta investigación.

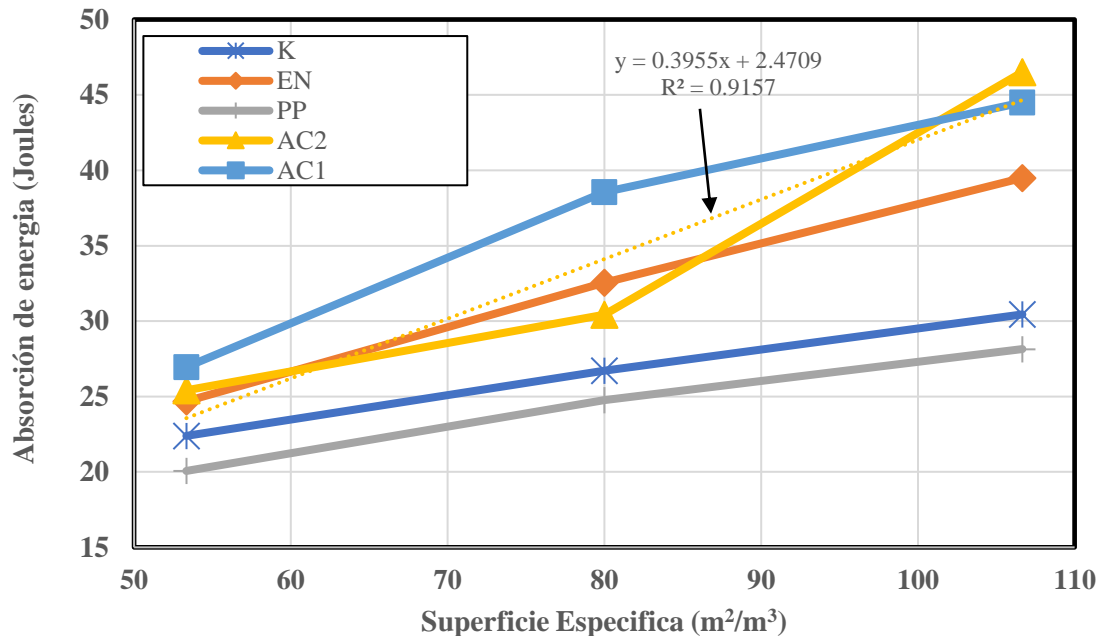


Figura 4. Absorción de energía vs superficie específica de concreto fibroreforzado con distintos niveles de fibras y diferentes tipos de fibras.

De la gráfica anterior es posible mencionar que las fibras de polipropileno presentan el menor desempeño en tenacidad para los tres porcentajes estudiados (1.0, 1.5 y 2.0%) respecto a las fibras de acero y alcohol polivinílico.

El porcentaje de fibra de 1.0%, para superficies específicas bajas indica niveles de absorción de energía con reducciones del hasta el 45 % respecto al porcentaje de 2% con la máxima superficie específica estudiada.

4. CONCLUSIONES.

De esta investigación después de revisar el efecto del uso de distintos tipos de fibras en los concretos fibroreforzados mediante el uso del método de la superficie específica se puede concluir lo siguiente:

1. El método de la superficie específica, muestra otra manera de visualizar la incidencia de la interacción entre las formas de los filamentos y la matriz de concreto en materiales

- fibroreforzado con diferentes tipos de fibras.
2. El uso de diferentes dosificaciones de fibras y de distintos tipos de fibras no afecta la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades.
 3. Las fibras con mejor desempeño desde el punto de vista de un comportamiento de endurecimiento por deformación son las fibras de acero respecto a fibras de otros materiales como el polipropileno y el alcohol polivinílico.
 4. Las dosificaciones del 2.0% en las fibras de acero y alcohol polivinílico muestran comportamientos de endurecimiento por deformación.
 5. La de absorción de energía vs superficie especifica permite definir a través de los datos de superficie especifica de la fibra la mejor opción de fibra para ciertos niveles de tenacidad requeridos por la industria.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al Concejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONHACYT) por el apoyo económico a los estudiantes que participaron en esta investigación y por apoyo del este Concejo al proyecto 319778, “Evaluación de combinaciones híbridas de fibras dosificadas en términos de su superficie específica, como una opción más confiable, para la cuantificación de su desempeño como refuerzo en compuestos cementantes fibro-reforzados de alto comportamiento”, que se realizó con apoyo de la convocatoria para Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022. Así como para la beca que le brindo al Ing. Fernando Zúñiga Gámez para la realización de sus estudios de maestría en la FIC-UANL. También queremos agradecer a las siguientes personas por los donativos que se recibieron en especie para la realización de los trabajos experimentales.

Material	Donante	Empresa
Cemento y agregados	Ing. Sergio Flores Doria	Concretos Tepeyac
Aditivos y fibra Sintética 1	Ing. Filiberto Marín López	EUCOMEX
Fibra de acero 1	Ing. Luis Miguel Laredo	Bekaert Trade México S de RL de CV
Fibra de Acero 2	Ing. Pedro Alberto Ramírez Garza	Ing. Pedro Alberto Ramírez Garza
Fibra sintética 2	Ing. Claudio Parada Ibañez	Barchip Inc. LATAM
Fibra sintética 3	Ing. Daniel Reyna	Kuraray México
Fibra sintética 4	Ing. Lars Vedstesen	Herramientas D.K. S.A. de C.V.

6. REFERENCIAS

- [1] *ACI 544.3R-08-Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete.*
- [2] S. Dejian, L. Ci, L. Yueyao, and S. Haoze, “Early-age autogenous shrinkage, tensile creep, and restrained cracking behavior of ultra-high-performance concrete incorporating polypropylene fibers,” *Cem Concr Compos*, vol. 138, Apr. 2023.
- [3] Z. Deng, F. Shi, S. Yin, and R. Tuladhar, “Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test,” *Constr Build Mater*, vol. 121, pp. 229–235, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.134.
- [4] R. F. Zollo, “Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development,” 1997.



- [5] R. Rostami, M. Zarrebini, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, S. M. Abtahi, and H. Fashandi, "The effect of specific surface area of macro fibers on energy absorption capacity of concrete," *Journal of the Textile Institute*, vol. 110, no. 5, pp. 707–714, May 2019, doi: 10.1080/00405000.2018.1512040.
- [6] S. A. Carmona Malatesta and C. Molins, "Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona," Universitat Politecnica de Valencia, Mar. 2018. doi: 10.4995/hac2018.2018.5668.
- [7] ACI Committee 506. and American Concrete Institute., *Guide for specifying underground shotcrete (ACI 506.5R-09)*. American Concrete Institute, 2009.



Incorporación de pellets de polipropileno reciclado como sustituto de agregados finos en la fabricación de bloques huecos de concreto de geometría no convencional: Evaluación de la resistencia a compresión y conductividad térmica

P. G. Pérez-Padilla ^{1*}, A. A. Zaldívar-Cadena¹, G. Sanchez-Anguiano²,
J. R. González- López¹, M. Z. Figueroa-Torres¹, F. R. Ruvalcaba-Ayala¹,
M. A. Guerra-Cossio¹

*Autor de Contacto: paul.perezp@uanl.edu.mx; antonio.zaldivarcdn@uanl.edu.mx

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L., MEXICO.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L., MEXICO.

RESUMEN

En México el Polipropileno (PP) es el tercer polímero plástico más reciclado por debajo del polietileno y el PET. Los residuos de PP aumentan y requieren de recolección, procesamiento y disposición final. Las adiciones de pellets de PP reciclado en materiales de construcción como sustitutos parciales de agregados se ha convertido en una opción para eliminar residuos plásticos y reducir la explotación de recursos naturales como los agregados pétreos. Los pellets de PP son subproductos producidos por inyección en la fabricación de cajas de baterías automotrices. En este trabajo fueron fabricados Bloques Huecos de Concreto (BHC) liviano con sustituciones de 0%, 20%, 30% y 40% en volumen de pellets del PP por agregados finos. La fabricación de este bloque fue realizada en base a un diseño geométrico reportado por Al-Tamimi et al., 2020. Además, se estudiará la caracterización de la microestructura mediante técnicas como SEM-EDS, DRX, FTIR, Raman y se evaluará la resistencia a compresión y conductividad térmica. Por último, se desarrollarán simulaciones térmicas mediante el software ABAQUS por análisis de elemento finito para diseñar un bloque de geometría no convencional buscando mejorar propiedades de resistencia a la compresión y aislamiento térmico.

Palabras clave: Pellets de polipropileno reciclado; bloque hueco de concreto; resistencia a la compresión; conductividad térmica.

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos plásticos son el principal problema medioambiental al que se enfrenta hoy en día el mundo en general. El problema radica en que la mayoría de los plásticos no son biodegradables por naturaleza y tardan más de 400 años en degradarse. Por otro lado, actualmente en la industria de la construcción se ha promovido fuertemente la fabricación y uso de materiales para envolventes de las edificaciones y mampostería con mejores propiedades de aislamiento térmico resistente a bajas y altas temperaturas que permitan un mejor confort en espacios cerrados.

Este trabajo tiene como propósito desarrollar un material de mampostería, como una solución a los problemas mencionados, utilizando residuos de polipropileno (PP) reciclado en forma de pellets (tamaño de 4.5 mm), como sustituto parcial (20%, 30% y 40% en volumen) de agregados finos en una matriz de concreto para la fabricación bloques huecos de concreto (BHC), con un diseño geométrico diferente al bloque convencional.

La finalidad es evaluar su conductividad térmica y resistencia a la compresión para contar con un material alternativo con una resistencia a la compresión aceptable (60 kg/cm^2), mejor aislamiento térmico en comparación de los bloques huecos convencionales existentes en el mercado y un material más liviano, buscando contribuir en el desarrollo de viviendas y edificaciones sustentables.

2. METODOLOGÍA

En la figura 1, se presenta un esquema de la metodología experimental a realizar para el desarrollo del proyecto.



Figura 1. Etapas de la experimentación.

2.1. Materiales

En el siguiente apartado se describen los materiales y moldes (Tabla 1 y Figura 2), que se utilizarán para esta investigación.

Tabla 1. Materiales a utilizar para la metodología experimental.

1. Cemento portland compuesto 30 R (CPC 30 R)	Cumpla con los requisitos de la Norma ASTM C150.	
2. Arena caliza #5	Arena caliza, proveniente del área metropolitana de Monterrey.	
3. Grava de 3/8"	Proveniente del área metropolitana de Monterrey.	
4. Pellets de polipropileno reciclado (POLY-1)	Los pellets de polipropileno son un subproducto del reciclado de este polímero termoplástico, obtenido de la planta Johnson Controls, ubicado en el municipio de García, Nuevo León.	

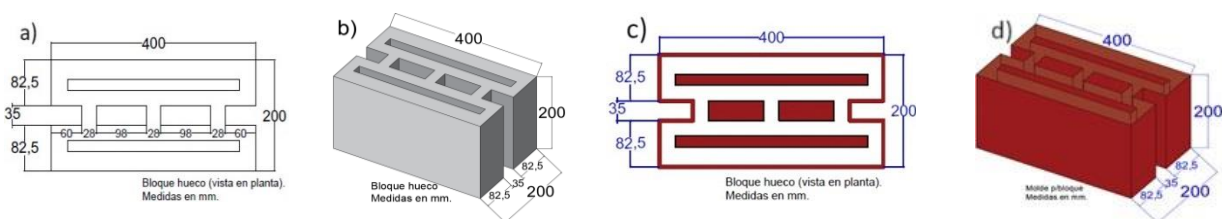


Figura 2. Geometría del bloque hueco de concreto propuesto. a) Medidas del bloque vista en planta, b) medidas y geometría del bloque en isométrico, (c) Medidas del molde vista en planta y d) geometría del molde vista isométrica. (todo expresado en mm). Fuente: Elaboración propia adaptada de bloque elaborado por (Al-Tamimi et al., 2020).

3. RESULTADOS

3.1. SEM y EDS del cemento y los polipropilenos.

De la Figura 3 a la Figura 5, se muestran las imágenes generadas por el Microscopio electrónico de barrido (SEM) y la Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS).

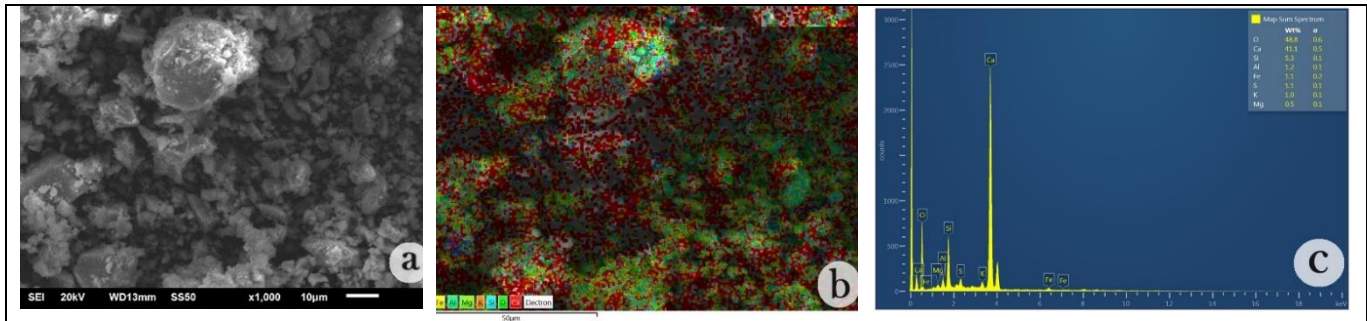


Figura 3. Imágenes de SEM y EDS del cemento portland (CPC-30 R). a) SEM con magnificación X1000. b) Mapeo de rayos X y c) Espectro EDS.

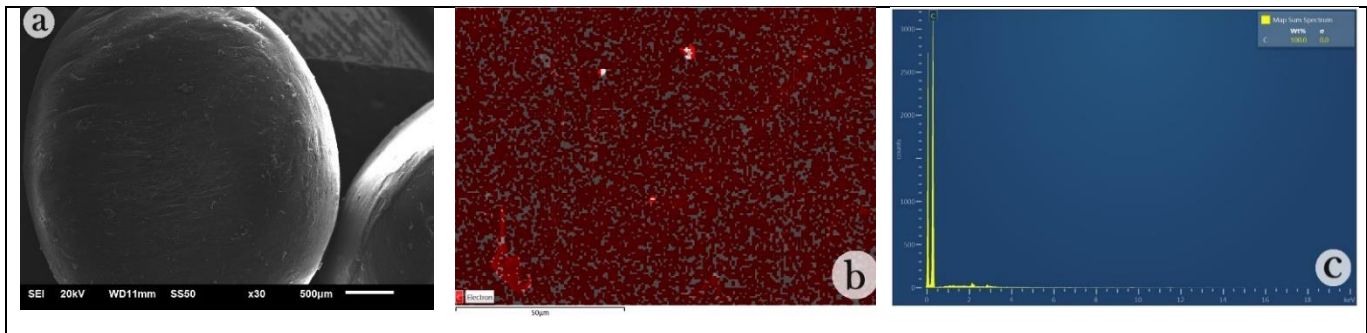


Figura 4. Imágenes de SEM y EDS del polipropileno virgen PP-121. a) SEM con magnificación X30. b) Mapeo de rayos X y c) Espectro EDS.

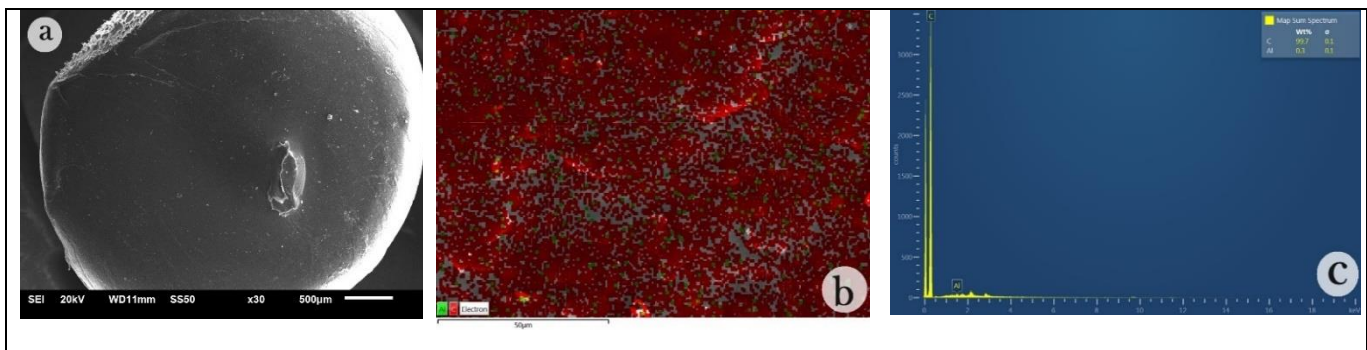


Figura 5. Imágenes de SEM y EDS del polipropileno reciclado. a) SEM con magnificación X30. b) Mapeo de rayos X y c) Espectro EDS

3.2. DRX y FTIR del cemento CPC 30-R y de los polipropilenos.

Los resultados del análisis del CPC-30R mediante la técnica de DRX y la Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), se muestran en la Figura 6.

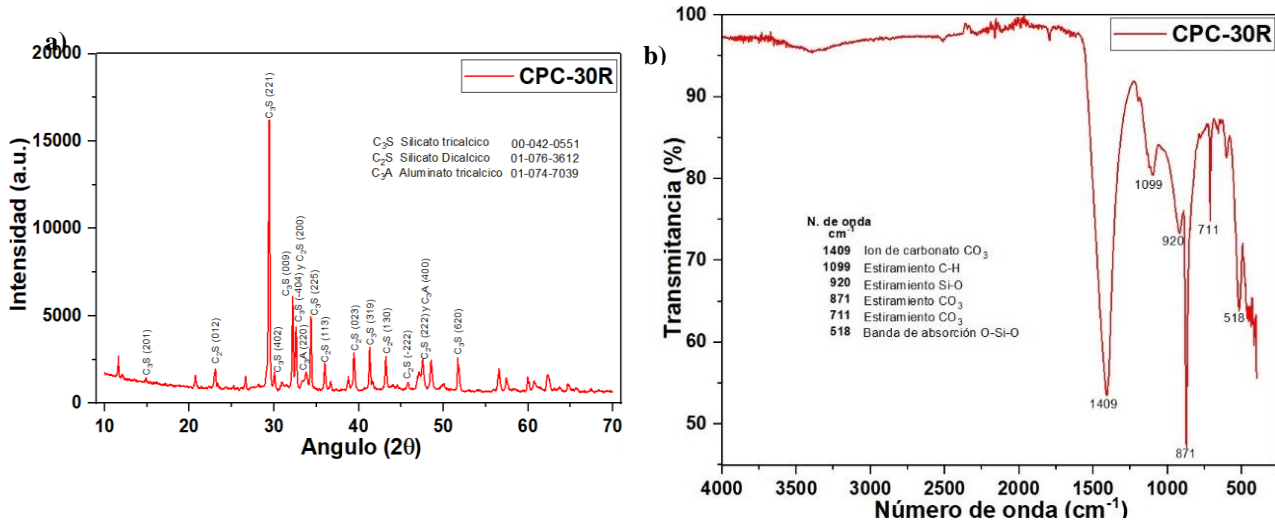


Figura 6. a) DRX y b) FTIR del cemento portland CPC-30 R.

En la Figura 7, se muestra el difractograma de las muestras de PP virgen y reciclado analizadas por medio de la técnica de DRX y la Espectroscopia Infrarrojo FTIR. La intención es caracterizar los polipropilenos con las diferentes técnicas y poder compararlos.

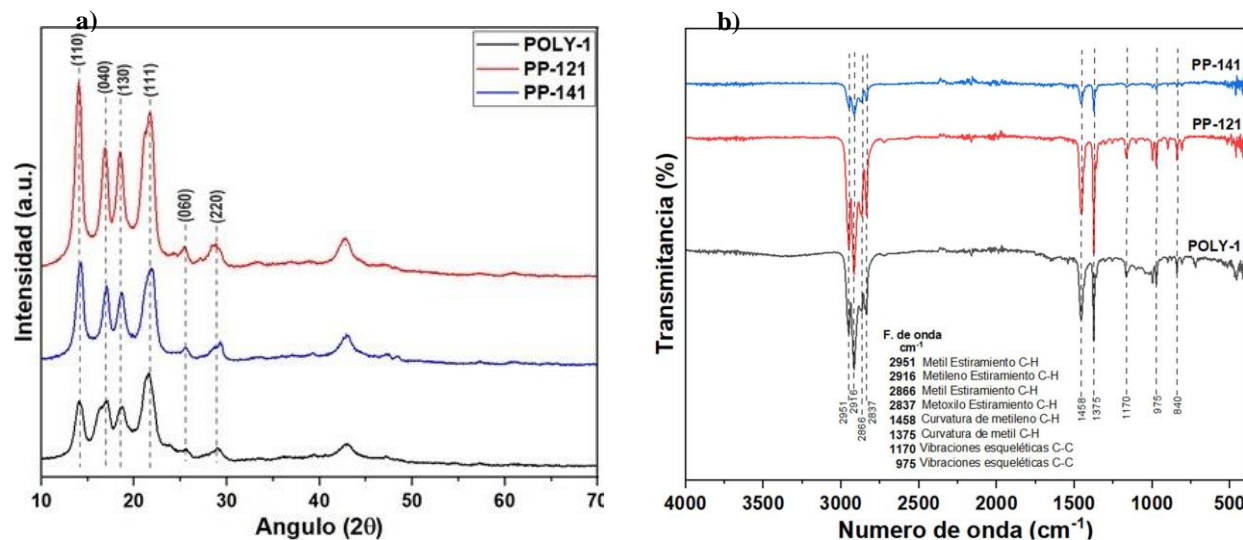


Figura 7. a) DRX y b) FTIR de los pellets de polipropileno y los polipropilenos vírgenes analizados.

3.3. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm.

En la Figura 8, se presentan los resultados de la resistencia a compresión de los especímenes de concreto con diferentes porcentajes de sustitución del PP reciclado (20%, 30% y 40% en volumen) por agregados finos, ensayados a 7 y 14 días.



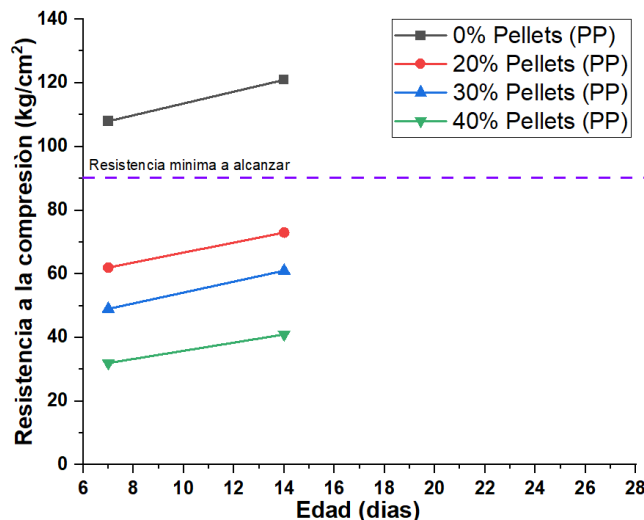


Figura 8. Resistencia a compresión de especímenes de concreto con diferentes porcentajes de sustitución ensayados a 7 y 14 días.

4. CONCLUSIONES

- La composición química elemental del cemento fue obtenida por análisis EDS y se encontró que cada uno de los elementos presentes cumple con la norma (ASTM C150, 2012). Además, por la técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX) fue detectado una composición química de 75% de Óxido Calcio (CaO) y un 12% de Óxido Silicio (SiO₂).
- El análisis SEM mostró que los polipropilenos (PP) vírgenes cuentan con una superficie sin porosidad y semiesférica, además de una muy baja rugosidad. Por otra parte, el PP reciclado, presenta una forma cilíndrica, lisa y sin poros, donde la nula porosidad fue confirmada con la prueba de absorción.
- El mapeo de rayos X y sus Espectros EDS, mostraron que los polipropilenos vírgenes y reciclados están conformados principalmente por carbono en un 100% y un 99.7% respectivamente.
- En el análisis DRX del cemento fueron observados picos que pertenecen a las fases principales del cemento, mientras que en el DRX de los polipropilenos aproximadamente a $2\theta = 14^\circ$ y 17° , fueron asociadas a los planos (110) y (040) del polipropileno isotáctico cristalizado en forma monoclinica.
- Los especímenes cilíndricos de concreto fueron fabricados con una relación cemento-arena-grava = 1:5:4, donde se realizaron los diferentes porcentajes de sustitución del PP reciclado (20%, 30% y 40% en volumen) por agregados finos (arena). Se utilizó una relación agua/cemento= 0.45. Los ensayos a 7 y 14 días muestran estar por debajo de la mínima resistencia a la compresión esperada para cilindros hasta el momento.

5. AGRADECIMIENTOS



Los autores agradecen el apoyo de la FIC-UANL y del CONAHCYT por la beca otorgada con el número **1314034** para el desarrollo del actual proyecto de investigación como parte del posgrado de la “*Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción*” perteneciente a la UANL.

6. REFERENCIAS

- Al-Tamimi, A. S., Al-Amoudi, O. S., Al-Osta, M. A., Ali, M. R., & Ahmad, A. (2020). *Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks*. *Construction and Building Materials*, 254(19). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119300>
- ASTM C150. (2012). ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement. doi:10.1520/C0150-07
- NMX-C-404-ONNCCE-2012.** (2012). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – MAMPOSTERÍA – BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICONES PARA USO ESTRUCTURAL – ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. MEXICO D.F.: ONNCCE, S.C., MMXII.



Caracterización química-estructural y mecánica de la pasta cementante incorporando la concha de ostión *Crassostrea Virginica*

M. Somoza-Mendez¹, E. Onofre-Bustamante^{1*}, A. C. Espíndola-Flores¹

*Autor de Contacto: eonofre@ipn.mx

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Altamira Tamaulipas, México.

RESUMEN

En este trabajo se busca utilizar materiales a base de polvo de concha de ostión (OSP por sus siglas en inglés) y OSP tratada térmicamente, para sustituir parcialmente el cemento y evaluar las propiedades mecánicas, a través del método estándar y estimar una correspondencia con la técnica de nanoindentación. La OSP será fraccionada hasta alcanzar el tamaño de partícula del cemento para ser incorporada en la matriz de la pasta cementante a diferentes porcentajes de sustitución. La OSP será tratada térmicamente a diferentes temperaturas para favorecer la formación del óxido de calcio (CaO). Posteriormente, se determinará su contribución en las reacciones álcali-hidrolisis por medio de las técnicas de IR-TF y DRX, en los diferentes tiempos de fraguado (7, 14 y 28 días). Adicionalmente, se medirán las propiedades mecánicas por medio de nanoindentación. Y en un futuro comparar los resultados de nanoindentación con resistencia a la compresión buscando establecer una correspondencia entre el método estándar y la nanoindentación para ensayar probetas de materiales base cemento. Y finalmente medir la resistividad eléctrica para tomarla como referencia de la calidad de las mezclas elaboradas con material a base de OSP.

Palabras clave: Concha de ostión; Concreto verde; Propiedades mecánicas; Correspondencia; Nanoindentación.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha crecido exponencialmente como consecuencia de un rápido desarrollo urbano. Esto se debe a que el concreto posee excelentes características como son: bajo costo, buena capacidad de soportar condiciones climáticas adversas, excelente resistencia a la compresión, fácil de moldear, lo que permite ser un excelente material de construcción.

Mundialmente se ha reportado un consumo de 4.4 mil millones de toneladas de cemento cada año y se predice que en el año 2050 se superarán los 5.5 mil millones de toneladas. Este material de construcción se produce fácilmente mezclando arena, grava, cemento y agua, por lo que es muy utilizado en todo el mundo. Sin embargo, crece la demanda de recursos naturales para su producción. Esto ha causado que la utilización de más de 0.9 mil millones de toneladas de cemento Portland, 5 mil millones de toneladas de agregados y 0.6 mil millones de toneladas de agua (Ruslan et al., 2021).

Debido a esto la industria del concreto enfrenta varios problemas medio ambientales, provocados por la extracción de materiales como la piedra caliza, arcilla, arena entre otros. Además de la extracción de estos recursos, la industria del cemento ha contribuido en gran medida a la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente CO_2 a causa del proceso de fabricación del cemento, y la quema de combustibles para conseguir las altas temperaturas que demanda este proceso (Figura 1) (Ruslan et al., 2021)(Zhang et al., 2014).

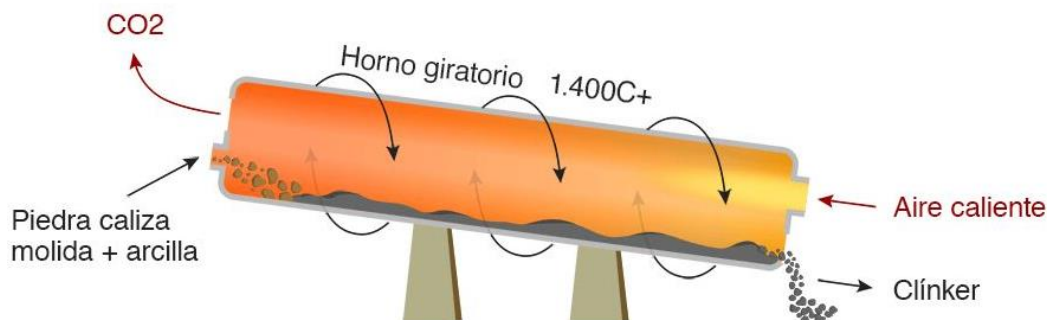


Figura 1. Proceso de fabricación del cemento.(Rosamund, 2018).

Además del cemento, los agregados utilizados en la producción de concreto han recibido una alta demanda. En el 2019 el programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas publicó que después del agua, la arena y la grava son los recursos naturales más utilizados en el mundo (UNEP, 2019)(Sreebha & Padmalal, n.d.).

Por otra parte, las conchas de ostión son un residuo acuícola que provoca problemas medio ambientales, debido a su alta producción y la no disposición correcta. La FAO para el año 2020 reportó una producción mundial de 5,450.3 miles de toneladas de ostión (FAO, 2022), en el mismo año México registró una producción de 22,534 toneladas, de las cuales en el estado de Tamaulipas se produjeron 2,148 toneladas representando el 9.53% de la producción nacional de ostiones (CONAPESCA, 2021). Este desecho no tiene una disposición final adecuada, terminando en vertederos o rellenos sanitarios, es importante buscar potenciales aplicaciones para este material. Este residuo es de interés en el desarrollo de materiales base cemento por su alto contenido de carbonato de calcio, superior al 90% y este compuesto se puede transformar en CaO por medio de tratamientos térmicos (de los Santos et al., 2016).

Otra de las aplicaciones para utilizar la concha de ostión triturada es para obtener polvo fino y sustituir parcialmente por arena, demostrando tener buenos resultados (Ruslan et al., 2021). También se ha modificado la concha de ostión triturada con ácido esteárico y se sustituyó como agregado grueso para aplicación de un concreto poroso (Horiguchi et al., 2021; Hu et al., 2023; Song et al., 2022).

En la actualidad una de las técnicas que está cobrando relevancia, es la nanoindentación debido a que permite medir las propiedades elásticas en zonas localizadas de los materiales microestructurados o nanoestructurados.

En este sentido la investigación tiene como objetivo final obtener un concreto modificado con la concha de ostión sin tratamiento y con tratamiento térmico con mejores propiedades mecánicas que el concreto comercial, aprovechando un residuo. Se caracterizará el concreto modificado por las técnicas de espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (IR-FT) y Difracción de Rayos X (DRX), para identificar su composición y el efecto sobre las reacciones álcali-hidrólisis de la pasta cementante. Las propiedades mecánicas se evaluarán utilizando la técnica de nanoindentación al término de 7, 14 y 28 días y en un futuro por el método convencional, para establecer una correlación entre ambos resultados que permita establecer una metodología alternativa para la caracterización mecánica del concreto.

2. METODOLOGÍA

2.1. Recolección de material

El material requerido se obtuvo de cooperativas y restaurantes de mariscos de la zona conurbada del sur de Tamaulipas, conformada por las ciudades de Tampico, Madero y Altamira (Figura 2). Antes de ser triturada se eliminó la materia orgánica e inorgánica por medio de un lavado con agua de grifo y cepillado.



Figura 2. Depósito de conchas de ostión, en la localidad de Morón Tamaulipas.

2.2. Preparación del material

2.2.1. Granulometría

La concha de ostión se utilizará para ser sustituida parcialmente por el agregado fino, en este sentido es necesario triturar y realizar la granulometría. El material se trituro en un molino de cuchillas y se realizó la granulometría de la OSP utilizando un juego de tamices hasta alcanzar una granulometría para substituirse parcialmente por cemento (Secretaria de Comunicaciones y Transportes, 2018; Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019).

2.2.2. Tratamiento térmico

Se aplicó un tratamiento térmico a la OSP a diferentes temperaturas: 700 °C, 800 °C y 900 °C, para favorecer la transformación de los carbonatos presentes a óxidos, principalmente buscando la presencia del óxido de calcio (CaO) elemento característico del cemento.

2.3. Caracterización química y estructural

2.3.1. Difracción de Rayos X (DRX) y espectroscopia IR-TF

Las muestras de OSP sin tratamiento y con tratamiento térmico se caracterizaron por DRX, para identificar su estructura cristalina y se comparó con una muestra de cemento comercial. Se utilizó un Difractometro de rayos X, marca Bruker, modelo D8 Advance, con una configuración de 2 θ “Bragg – Brentano” en un rango de análisis de 10° a 80° a una velocidad 0.02°/s, con una radiación K α de Cu (0.15406 nm), operando con un voltaje de 40 kV y una corriente de 40 mA.

2.3.2. Espectroscopia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier (FT-IR)

Se caracterizaron por FT-IR las distintas muestras del proyecto en un equipo FTIR, marca Perkin Elmer, modelo spectrum one, con un rango de número de onda de 4000 a 600 cm⁻¹, utilizando un accesorio universal ATR (diamante/ZnSe).

3. RESULTADOS

3.1. Granulometría

La OSP se trituro (Figura 4) y se calculó el Modulo de finura (MF) (Figura 5), obteniendo un resultado de MF 3.94. De acuerdo a lo establece la norma que debe ser: 2.3>MF<3.1 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019).



Figura 4. OSP triturada.

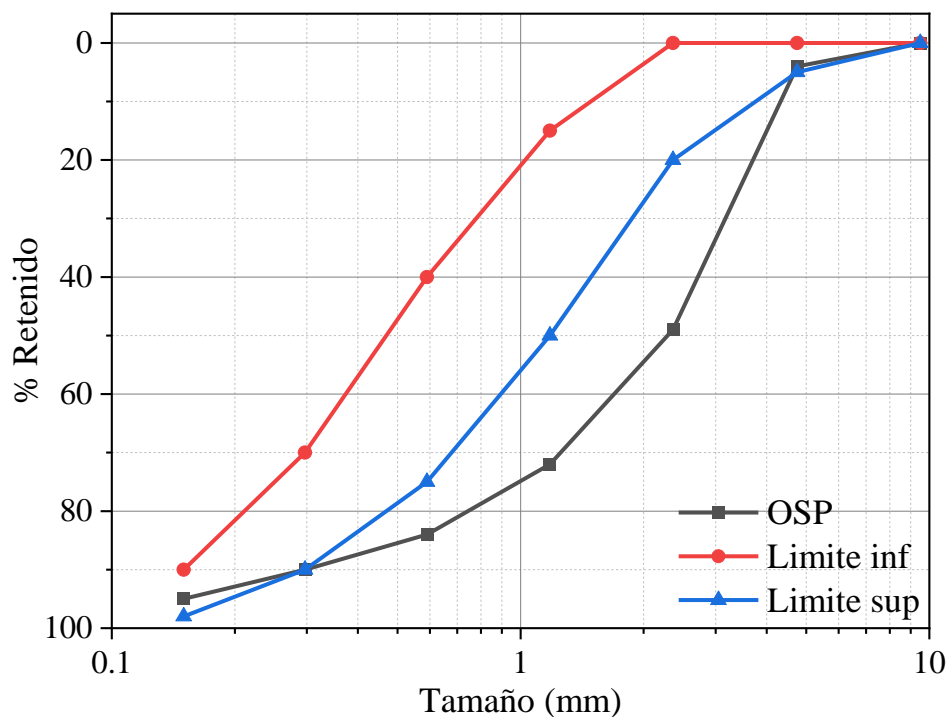


Figura 5. Diagrama de granulometría de OSP.

3.2. Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos se realizaron en una mufla convencional con un tamaño de muestra de 100 g de OSP, programando tres temperaturas, 700 °C, 800 °C y 900 °C durante una hora. En la Figura 6 se muestra la apariencia visual del material tratado térmicamente.



Figura 3. Muestras de OSP tratada térmicamente a 700°C, 800°C y 900°C.

3.3. Caracterización química y estructural

3.3.1. Resultados de DRX

Los resultados obtenidos por DRX (Figura 7) para la muestra OSP, se pueden observar las señales asociadas al carbonato de calcio (CaCO_3) en $2\theta = 29, 39, 43$ y 47° y óxido de silicio (SiO_2) en $2\theta = 27$ y 29° (la señal de 29° se traslapa con la asociada al CaCO_3), de acuerdo con la carta cristalográfica PDF No. 471743, base de datos JCPDS).

Los difractogramas (Figura 7) obtenidos después del tratamiento térmico se observa un cambio en la composición de la muestra SOP tratada térmicamente, disminuyendo algunas intensidades

conforme aumenta la temperatura y observando el incremento de otras. Para la muestra tratada térmicamente a 800°C se observa la presencia de las señales en la posición $2\theta = 18^\circ$ y 34° asociadas al $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y la disminución de las señales asociadas al CaCO_3 . Para la muestra tratada térmicamente a 900°C, se observa una disminución en la intensidad de las señales asociadas al CaCO_3 , mientras que se intensifican las señales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pero principalmente se observan las señales en la posición $2\theta = 23^\circ, 27^\circ, 53^\circ, 64^\circ$ y 67° asociadas al óxido de calcio (CaO), componente característico del cemento.

Los resultados indican que es posible obtener en mayor proporción el CaO , tratando térmicamente la OSP.

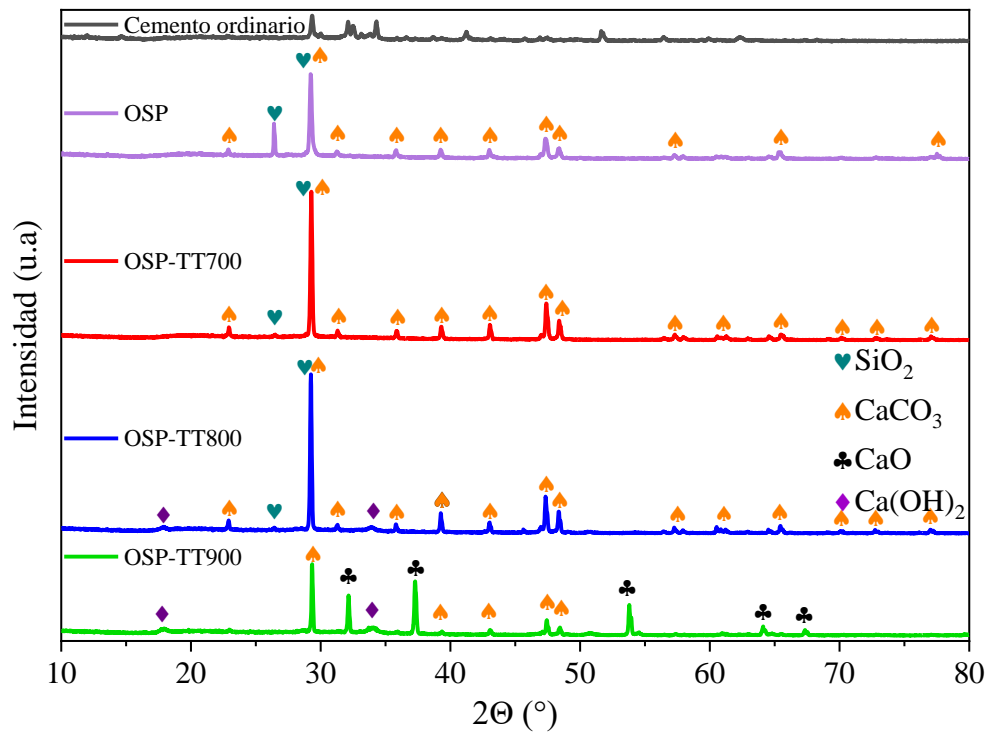


Figura 4. Difractogramas del cemento, muestras de OSP y OSP tratadas térmicamente.

3.3.2. Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR)

Los resultados obtenidos por FT-IR, para la muestra de OSP se observa la presencia predominante de CaCO_3 , que indican con las señales intensas en 880 y 1400 cm^{-1} . Sin embargo para las muestras de OSP tratadas térmicamente se observa como dichas intensidades disminuyen y se observa este cambio principalmente en la muestra tratada térmicamente a 900°C, esto se debe al cambio de composición de la muestra a CaO confirmando este compuesto con la señal intensa en 3605 cm^{-1} , asociada al CaO .

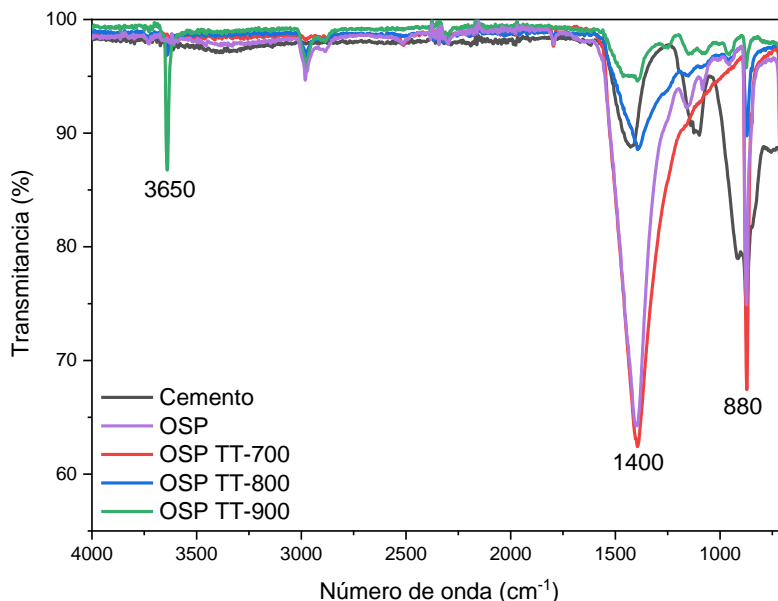


Figura 5. Espectros de Infrarrojo, de la muestra de OSP sin tratamiento y con tratamiento térmico.

4. CONCLUSIONES

La OSP sin tratamiento térmico caracterizada por DRX y FTIR, indican que contiene una gran cantidad de CaO_3 en la fase calcita.

La OSP tratada térmicamente a 900°C , indican la presencia mayoritaria de CaO , de acuerdo con los resultados obtenidos por DRX y FTIR.

El uso de la OSP es un material que a menor temperatura es posible obtener CaO , lo que indica un menor gasto de energía y menor tiempo de proceso.

La OSP tratada térmicamente a 900°C , promete ser un material alternativo para ser sustituido por cemento y poder obtener un concreto verde. Este material puede ser utilizado para construir viviendas sostenibles y que ayuden a minimizar los impactos negativos ambientales que provoca la fabricación del cemento, como minimizar la huella de carbono y los gases de efecto invernadero.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación se ha realizado con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional, con los proyectos SIP 20241778 y SIP 20241400. Al CONAHCYT por la beca otorgada y al programa BEIFI.

6. REFERENCIAS

CONAPESCA. (2021). Anuario Estadístico De Acuicultura Y Pesca De La Comisión Nacional De Acuicultura Y Pesca. 1–292.

de los Santos, C. R., López Rodríguez, A. S., Sifuentes Gallardo, P., Hernández Rivera, M. Á., Rivera Trejo, J. G. F., & Díaz Flores, L. L. (2016). Reuso de desechos de conchas de ostión «*crassostrea virginica*». para la obtención de un material como aglomerante de mortero a partir de

- tratamientos de molienda y calcinación. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, 5(12), 38–48. <https://doi.org/10.31644/imasd.12.2016.a03>
- FAO. (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul. In FAO. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.01.032%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.007%0Ahttp://www.fao.org/publications/es>
- Horiguchi, I., Mimura, Y., & Monteiro, P. J. M. (2021). Plant-growing performance of pervious concrete containing crushed oyster shell aggregate. *Cleaner Materials*, 2(May), 100027. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100027>
- Hu, C., Zhong, D., & Li, S. (2023). A study on effect of oyster shell powder on mechanical properties of asphalt and multiple degrees of modification mechanism. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01786. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01786>
- Rosamund, P. (2018). Reducing emissions from cement. *Carbon Brief*. <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change/>
- Ruslan, H. N., Muthusamy, K., Syed Mohsin, S. M., Jose, R., & Omar, R. (2021). Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review. *Materials Today: Proceedings*, 48, 713–719. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.208>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). M-MMP-2-02-020/18 - Materiales para Concreto Hidráulico - Granulometría de los Agregados Pétreos (pp. 1–9).
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2019). N-CMT-2-02-002/19 - Materiales para Concreto Hidráulico - Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico (Issue 75, pp. 1–22). <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-002-19.pdf>
- Song, Q., Wang, Q., Xu, S., Mao, J., Li, X., & Zhao, Y. (2022). Properties of water-repellent concrete mortar containing superhydrophobic oyster shell powder. *Construction and Building Materials*, 337(April), 127423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127423>
- Sreebha, S., & Padmalal, D. (n.d.). Environmental Impact Assessment of Sand Mining from the Small Catchment Rivers in the Southwestern Coast of India: A Case Study. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9571-6>
- UNEP. (2019). Sand and Sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources (Issue August 2016, pp. 1–56). https://www.researchgate.net/profile/Amir-Abdulazeez-2/publication/343481022_A_Review_on_the_Impact_of_River_and_Inland_Sand_Mining_on_Nigerian_River_Basins/links/5f2c0efc458515b72907316a/A-Review-on-the-Impact-of-River-and-Inland-Sand-Mining-on-Nigerian-
- Zhang, J., Liu, G., Chen, B., Song, D., Qi, J., & Liu, X. (2014). Analysis of CO₂ Emission for the Cement Manufacturing with Alternative Raw Materials: A LCA-based Framework. *Energy Procedia*, 61, 2541–2545. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.12.041>





Evaluación de la capacidad de almacenamiento de energía térmica en un elemento ligero adicionado con materiales de cambio de fase

A. Bohorquez^{1*}, R. Alavez¹, M. Caballero², F. Chiñas³

*Autor de Contacto: adrian.bs.1415@gmail.com

¹ Centro Interdisciplinario De Investigación Para El Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Oaxaca, México.

RESUMEN

Controlar la carga térmica de la envolvente de un edificio es un punto clave para reducir la demanda energética. Paredes y ventanas que utilizan algún material de cambio de fase (PCM) ofrecen una amplia capacidad de almacenamiento de energía térmica, reduce la carga térmica dentro del espacio habitable, manteniendo el confort térmico dentro de un rango estable.

Esta investigación evaluó el rendimiento térmico de un material granular compuesto a partir de materiales porosos (tepexil) y material de cambio de fase orgánico utilizando el método de impregnación al vacío. El material compuesto se somete a diferentes técnicas de caracterización convencionales como calorimetría diferencial de barrido (DSC) y determinación de puntos de fusión por el método Fisher Johns. Utilizando un método de basado en la entalpia, se implementa un simulador de condiciones climáticas para analizar a profundidad los efectos del PCM presente en el material poroso utilizando un material de referencia.

Los resultados indican un retardo térmico superior a 7 °C en las muestras que contienen PCM, además que la influencia de la proporción del PCM en el elemento constructivo es proporcional a la cantidad que se encuentra presente en la muestra. Los resultados de la caracterización térmica basadas en el método de entalpia propuestos en esta investigación son bastantes cercanos a los obtenidos con la técnica DSC, por lo que la metodología propuesta puede ser una opción viable para caracterizar elementos constructivos de mayor tamaño a un bajo costo.

Palabras clave: Sustentabilidad; Aislamientos de Edificios; Transferencia de calor en paredes; Almacenamiento térmico; Confort térmico.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento constante de la población tiene como efecto secundario la demanda de vivienda, aunado a la situación económica y los recursos con las que se cuenta para cubrir dicha necesidad, la construcción se ha orientado a la reducción de costos dejando a un lado características técnicas importantes como las condiciones climáticas del lugar. La incompatibilidad de la construcción con las condiciones climáticas repercute en la salud del usuario, así como en el aumento del consumo energético de la edificación lo cual representa un impacto negativo al medio ambiente (problemas de salud confort, energía utilizada por un edificio) (David et al., 2011).

La utilización de los materiales térmicos en la construcción tiene como objetivo el aislamiento del ambiente interior al cambio de temperatura del medio ambiente exterior, impidiendo el paso de la energía calorífica radiada por el sol y otras fuentes de calor con el fin de reducir el consumo energético por climatización. Con el surgimiento de la corriente ambiental se han investigado materiales con características de almacenamiento térmico por medio de calor latente que puedan ser incorporados a los métodos actuales de construcción con la finalidad de reducir la demanda energética generada por sistemas de aire acondicionado. Los materiales de cambio de fase (PCM) que demandan una alta concentración de energía y una temperatura cercana al confort humano para realizar dicho cambio, han mostrado características favorables en aplicaciones de amortiguamiento térmico y reducción de demanda energética (Zhang, 2005).

El uso de los PCM en concretos se ha concentrado en materiales de fácil incorporación y con alta ganancia térmica sin modificar las propiedades físicas del concreto, actualmente son ampliamente conocidos tres métodos para incorporar los PCM a materiales de soporte, la incorporación directa, la micro y macro encapsulación y la impregnación al vacío. Siendo esta última la técnica adecuada para incorporar PCM como aceites orgánicos en matrices porosas en grandes cantidades sin elevar el costo de producción. Los PCM más utilizados son los que presentan alta capacidad de almacenamiento térmico al realizar el cambio de estado de sólido a líquido y viceversa, por lo que los compuestos como las parafinas y los ácidos grasos resultan ser estables y tienen propiedades idóneas para esta función.

Los materiales de soporte de origen mineral son ideales gracias a la compatibilidad con el cemento y por la abundancia natural lo que reduce el costo comercial, por lo que materiales con matrices porosas y con alta absorción son utilizados para la fabricación de materiales compuestos PCM. Investigaciones previas han demostrado que los ácidos grasos orgánicos son una alternativa como sistema de almacenamiento térmico por su bajo costo y fácil obtención. Sin embargo se han reportado efectos distintos en la cantidad en la incorporación de PCM en materiales base cemento por lo que no está claro si el tipo de observaciones son debido a la técnica de impregnación o a la cantidad de PCM retenido por el material de soporte.

Por lo que la presente investigación plantea la fabricación de un material PCM compuesto de un ácido graso como la manteca de cacao y el tepexil como material de soporte, mediante la técnica de impregnación al vacío, lo anterior tuvo como finalidad fabricar bloques ligeros de tepexil como los que actualmente se comercializan en la región. Los cuales fueron analizados térmicamente.



2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales

Se eligió material de cambio de fase manteca de cacao, debido a sus características conocidas de temperaturas de cambio de fase, así como que estas temperaturas se encuentran dentro del rango de confort térmico (20-29 °C), adquirida comercialmente marca CACEP, la cual se utilizó sin tratamiento previo alguno.

Se utilizó como material de soporte por su textura y su amplia utilización en la construcción en el sureste mexicano tepexil, que es un agregado de origen volcánico altamente poroso.

2.2 Preparación del compuesto PCM

Para realizar el material compuesto se optó por la técnica de impregnación al vacío, previamente el tepexil fue secado en un horno durante ocho horas a una temperatura de 110 °C, posteriormente se registró el peso y se dejó enfriar. Para facilitar la impregnación se calentó la manteca de cacao a 85 °C para disminuir su viscosidad. El material de soporte seco se introdujo en una olla de impregnación al vacío y se procedió a extraer el aire que se encontraba en el recipiente y en los poros del tepexil, hasta alcanzar 88 kPa. A continuación, se abrió la llave de paso del recipiente contenedor de la manteca de cacao (PCM) para que por medio del vacío se ingrese el PCM sin aire hasta inundar el tepexil y se dejó reposar durante 30 minutos. Posteriormente se procedió a abrir lentamente la llave que libera la presión para retirar el tepexil impregnado y se dejó escurrir por 4 horas en la una cámara térmica a 60 °C para eliminar todo el exceso de material PCM. Después de escurrir el tepexil impregnado se dejó reposar sobre papel absorbente 48 horas hasta que la cámara térmica alcanzó la temperatura ambiente.

2.2.1 Fabricación de tabiques

Con el objetivo de identificar el retardo térmico a causa de la incorporación del PCM en cada una de las muestras, para la fabricación de los tabiques ligeros se utilizaron las siguientes cantidades indicadas en la tabla 1, con las cuales se obtiene un tabique con medidas 10 cm x 14 cm x 28 cm con un volumen de 0.0028 m³.

Tabla 1 Proporción de las mezclas de tepexil impregnado con PCM para la fabricación de tabiques ligeros.

	Cemento (kg)	Tepexil(kg)	Tepexil/PCM (Kg)	Agua (L)
100% TM	6	0	25	5
50% TMC	6	12.5	12.5	5
0 % T	6	25	0	5

2.3 Caracterización del compuesto PCM

2.3.1 Puntos de fusión y solidificación

El punto de fusión y solidificación son características importantes del material de cambio de fase, ya que nos indica la temperatura en la que el material cambia de fase sólida a líquida o viceversa. Para identificar estas temperaturas el PCM fue sometido a un análisis que consistió en una serie de calentamientos y enfriamientos controlados dentro de una cámara térmica construida de espuma

rígida de poliestireno extruido, donde la temperatura ambiente interior fue regulada con un intercambiador de calor y controlada con la ayuda de una tarjeta Arduino Mega y programadas en el rango dentro del cual, sucede el cambio de fase según las características del PCM. Se colocaron 28 gramos de manteca de cacao en estado sólido en un tubo de ensayo, dentro del tubo se instaló un sensor de temperatura TMC20-HD. La muestra fue colocada en la cámara térmica y se estableció como rango de trabajo 60 °C la temperatura máxima de calentamiento y 5 °C como temperatura mínima de enfriamiento. Con la ayuda de un registrador de datos HOBO UX100-001 se censaron y almacenaron cada 10 segundos las temperaturas. Cada muestra fue sometida a tres ciclos de calentamiento-enfriamiento. Los resultados se compararon con los obtenidos del análisis de calorimetría diferencial de barrido.

2.3.2 *Calorimetría diferencial de barrido (DSC)*

Se realizó un análisis de calorimetría diferencial a tres muestras diferentes, para evaluar el rendimiento térmico del PCM, en la universidad del Papaloapan, para la primera muestra se pesaron 3.1 mg de manteca de cacao y con la ayuda de una prensa se encapsuló en un crisol de aluminio. Para la segunda muestra de igual manera se pesaron y encapsularon en un crisol de aluminio 3.1mg del compuesto PCM/Tepexil y la tercera muestra se extrajo 3.1mg de material de un tabique elaborado con el 100% de material compuesto PCM/Tepexil. los crisoles fueron colocados en un calorímetro diferencial de barrido modelo DSC2500 de TA Instruments. La configuración utilizada se determinó a partir de un muestreo previo para conocer el rango de temperaturas en las que la muestra presenta un cambio de fase, que consistió en una rampa de calentamiento de 40 °C/min con una temperatura inicial de -30 °C hasta alcanzar a los 100 °C, y un enfriamiento de los 100 °C hasta los -30 °C a una velocidad de enfriamiento de 10 °C/min con un flujo de nitrógeno de 50.01 mL/min. Una vez identificados los rangos de temperatura, la configuración experimental de las siguientes series del análisis se estableció en una velocidad de calentamiento y enfriamiento en 10 °C/min, como temperatura mínima de enfriamiento se establecieron -10°C y como temperatura máxima 80 °C.

2.3.3 *Coefficiente de transferencia de calor (U)*

Para medir el coeficiente de transferencia de calor (U), se utilizó un kit para medir el valor U de la marca GREENTEG modelo gsSKIN-XO 677C, el cual consta de dos sensores de temperatura y uno de flujo de calor. Para instalar el kit de medición se construyó una cámara térmica con una división por la mitad para colocar las muestras de tabiques ligeros, como se muestra en la figura 1. Para realizar las variaciones de temperatura, se instaló un intercambiador de calor el cual se controla con una tarjeta de adquisición de datos Arduino modelo UNO y un sensor de temperatura LM 35. En la tarjeta Arduino se programaron las temperaturas por hora del día más caluroso del año para el estado de Oaxaca. Se colocó una muestra y se puso en funcionamiento durante 72 horas (tiempo que le lleva al equipo calcular el coeficiente de transferencia de calor) simulando las condiciones térmicas a las que estaría sometido el tabique en condiciones reales. Una vez transcurrido el tiempo se procedió a la lectura de los datos.



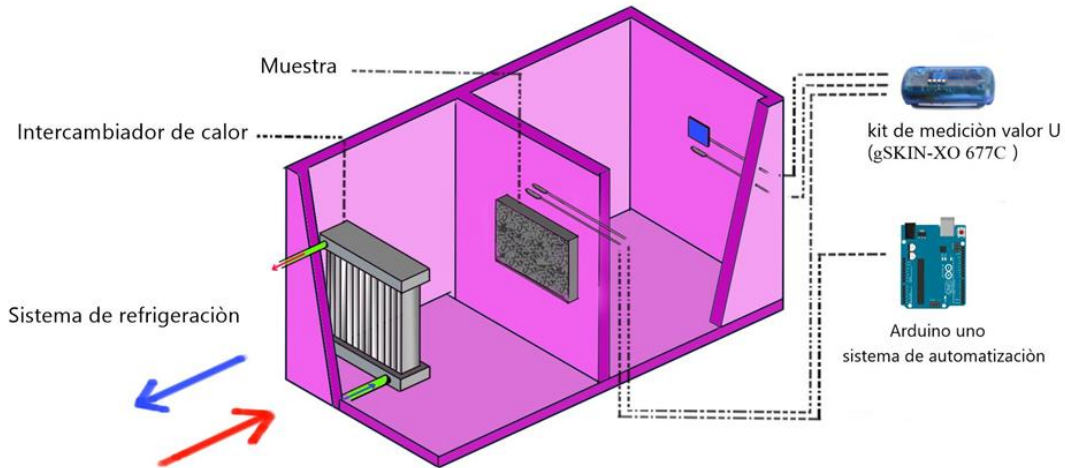


Figura 1. Diseño de experimental para la medición del valor U de las muestras PCM/Tepexil

2.3.4 Calor latente por calentamiento y enfriamiento

Para medir la entalpía de cambio de fase y el calor específico Zhang et al (2014) propone una técnica que consiste en una serie de calentamientos-enfriamientos de la muestra y de un material conocido como referencia, sometidos a un mismo ambiente, por lo que para fines prácticos de esta investigación se tomó como base dicha metodología y se realizaron modificaciones que se adaptan a las condiciones del material compuesto PCM/tepexil como se muestra en la figura 2.

Para determinar el calor específico y el calor latente de fusión las muestras se colocaron 28 gramos de material compuesto PCM/tepexil en un tubo de ensayo y 28 gramos de agua destilada en otro tubo de ensayo, dentro de cada tubo se instaló un sensor de temperatura TMC20-HD, las muestras fueron colocadas en la cámara térmica y se procedió a programar como rango de trabajo: 60 °C la temperatura máxima de calentamiento y 5 °C como temperatura mínima de enfriamiento.

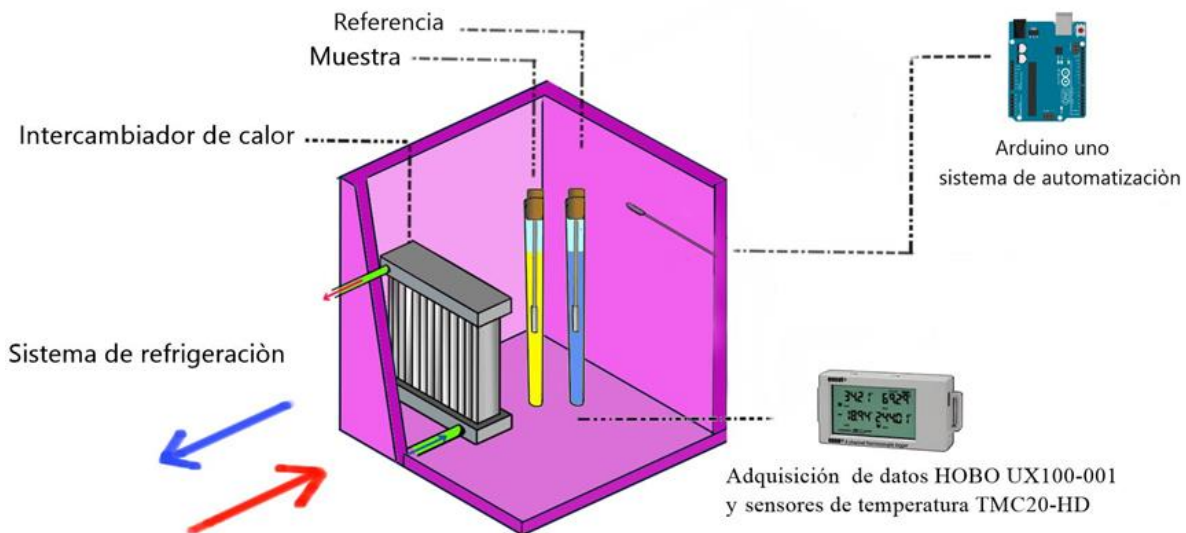


Figura 2. Diseño de experimento para medición de calor latente mediante calentamientos y enfriamientos.

3. RESULTADOS

3.1 Puntos de fusión y solidificación

La temperatura inicial observada fue de 20 °C al momento que empezaron a derretirse las primeras partículas de la muestra del cambio de estado sólido-líquido, debido a que la temperatura aumenta en una tasa menor de velocidad en el proceso de cambio de fase y finalizó cerca de los 30 °C, cuando toda la muestra se encontraba en estado líquido y empezó a aumentar la temperatura a una tasa constante como se muestra en la figura 3 (A). Durante el enfriamiento el cambio de estado va de líquido a sólido, por lo que la temperatura de solidificación se inicia cerca de los 21 °C y finaliza a los 18 °C como se aprecia en la figura 3 (B).

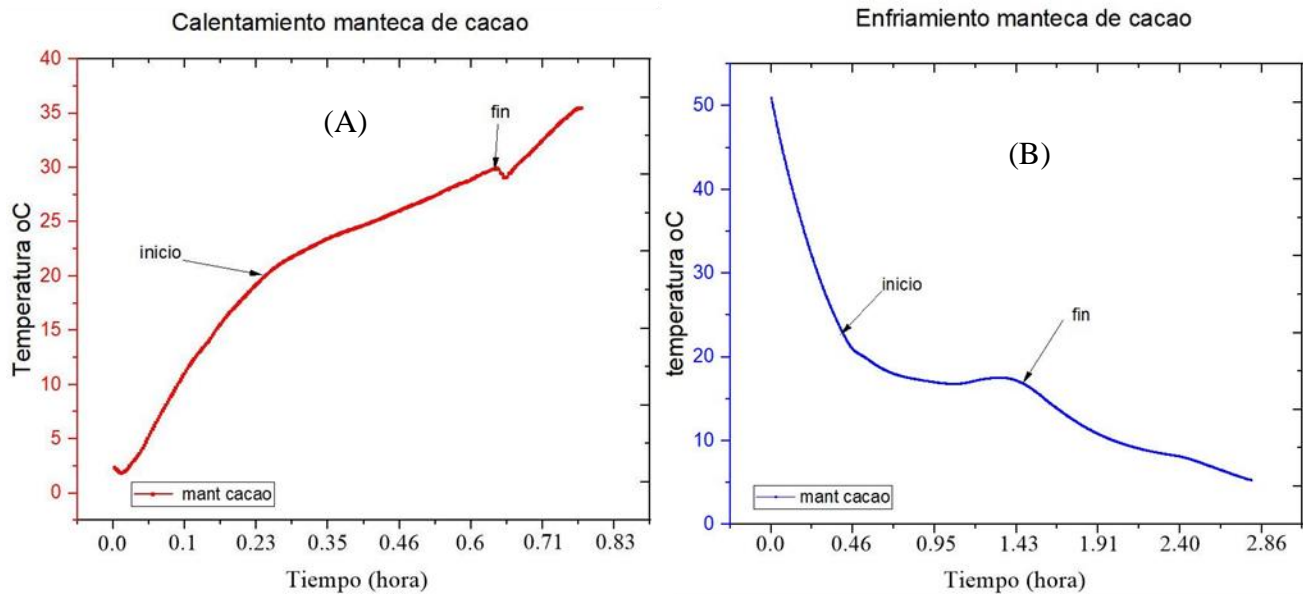


Figura 3. Ciclo de calentamiento (A) y enfriamiento (B) de la manteca de cacao (PCM).

3.2 Análisis calorimetría diferencial de barrido (DSC)

3.2.1 Calorimetría diferencial de barrido PCM

Se obtuvo que la fusión y solidificación de la manteca de cacao, se inicia en 18.53 °C, se registra la formación de un pico a 14.35 °C, con un valor de $\Delta H = -58.88$ J/g, como se observa en la figura 4. Al llegar a -5 °C se completó la cristalización. En la etapa de calentamiento no se aprecia de manera clara el inicio de la fusión, pero se registra a 14.96 °C como el inicio debido a los cálculos realizados por el software. El punto máximo se registró a 22.21 °C con un valor de $\Delta H = 77.185$ J/g. La etapa de fusión termina aproximadamente en los 30.00 °C.

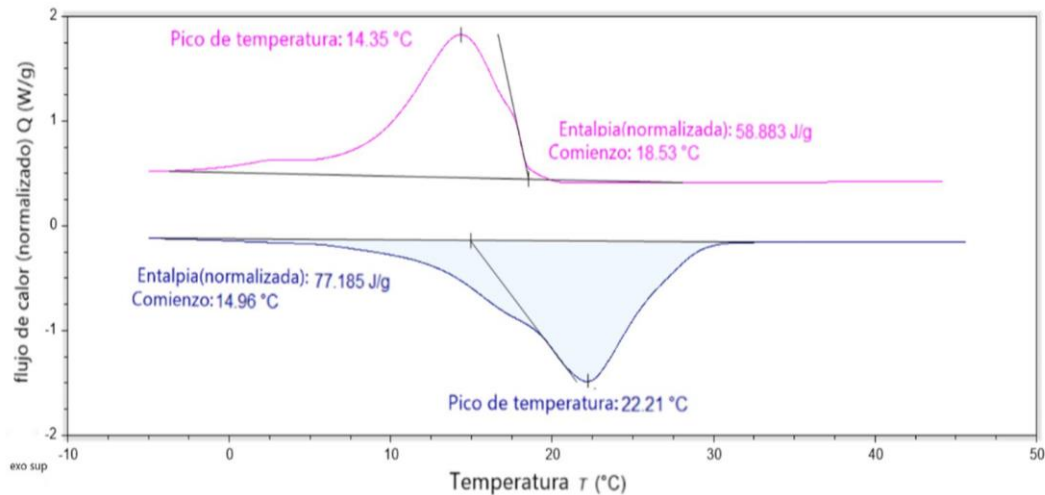


Figura 4. DSC termo grama de manteca de cacao enfriamiento y calentamiento

3.2.2 Calorimetría diferencial de barrido PCM/ Tepexil

En el análisis del tepexil impregnado con manteca de cacao, la figura 5 muestra la etapa de enfriamiento (línea rosa), que la solidificación se inicia a los 16.71 °C llegando a su punto más alto con un valor máximo de 13.85 °C y $\Delta H=16.127$ J/g, cerca de la base de inicio se registra una zona donde permanecen constantes los valores, posiblemente corresponda a la solidificación de una forma cristalina, por lo que se recomienda realizar un calentamiento más lento para diferenciar si es parte de la solidificación o corresponde al mismo pico presente. En la etapa de calentamiento (línea azul) la fusión parece iniciar a los 14.37 °C, el pico máximo lo alcanza a los 20.80 °C, con un valor de $\Delta H=21.752$ J/g.

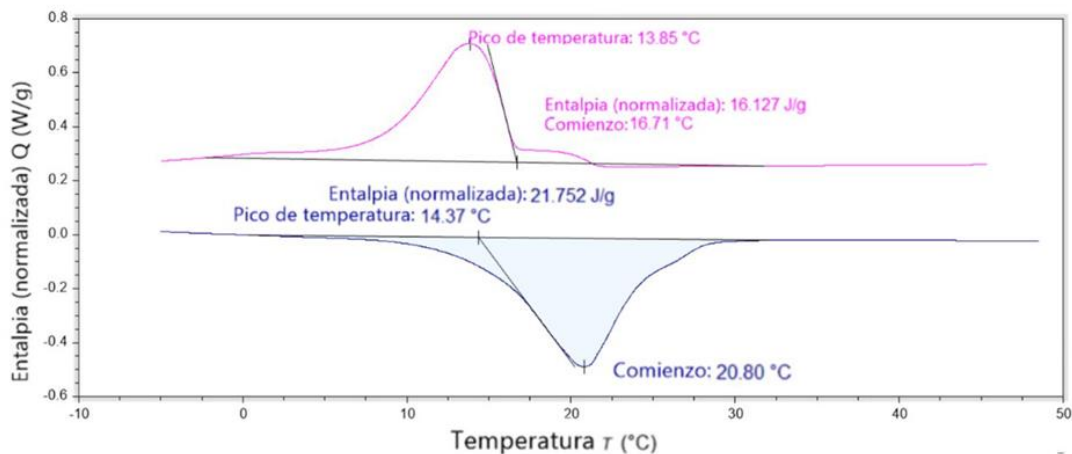


Figura 5. DSC termo grama de compuesto manteca/tepexil enfriamiento y calentamiento.

3.3 Coeficiente de transferencia de calor(U)

3.3.1 Muestra control tepexil 0% PCM

Durante la medición de control, las temperaturas para el día más caluroso del año fueron simuladas representando las temperaturas exteriores (T1), las cuales permanecieron dentro de los valores

programados, el rango de variación máximo fue de 31 °C mientras que el mínimo fue de 10 °C como se observa en la figura 6 (A). La temperatura interior (T2) permaneció entre los 28.5 °C y los 26 °C. El efecto de la diferencia de temperaturas entre T1 y T2 conducen a estabilizar el valor de transmitancia (U), por lo que después de 72 horas, el equipo de medición calculó un valor U de 0.45 W/(m²K) Figura 6 (B).

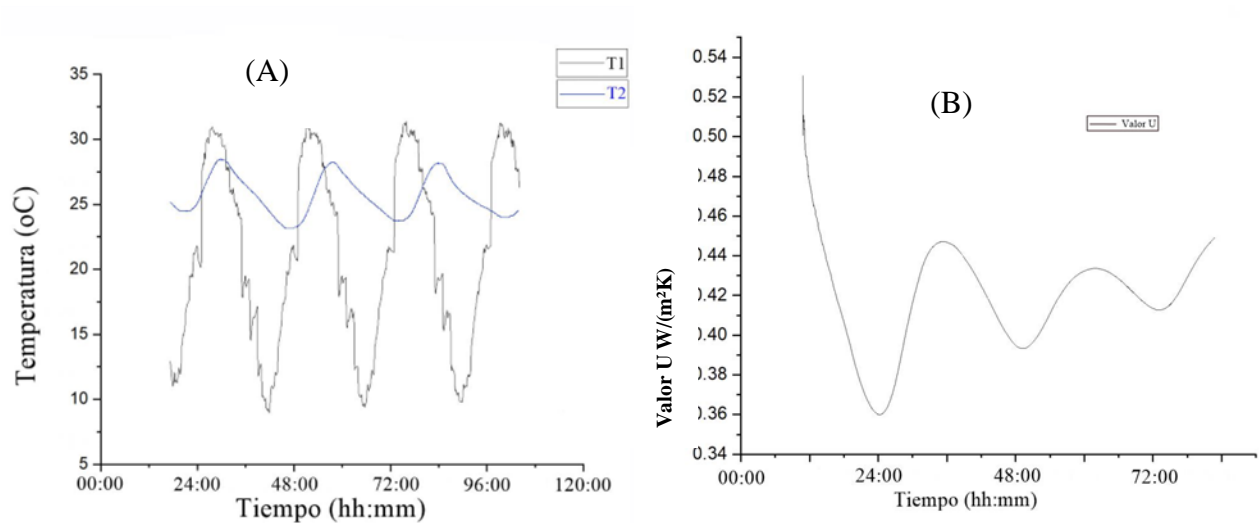


Figura 6. (A) comportamiento del amortiguamiento térmico muestra control sin PCM. (T1) indica las temperaturas simuladas del exterior, (T2) indica el comportamiento térmico del interior. Figura 6 (B) Comportamiento del valor U durante el periodo de medición

3.3.2 Tepexil /50 % PCM

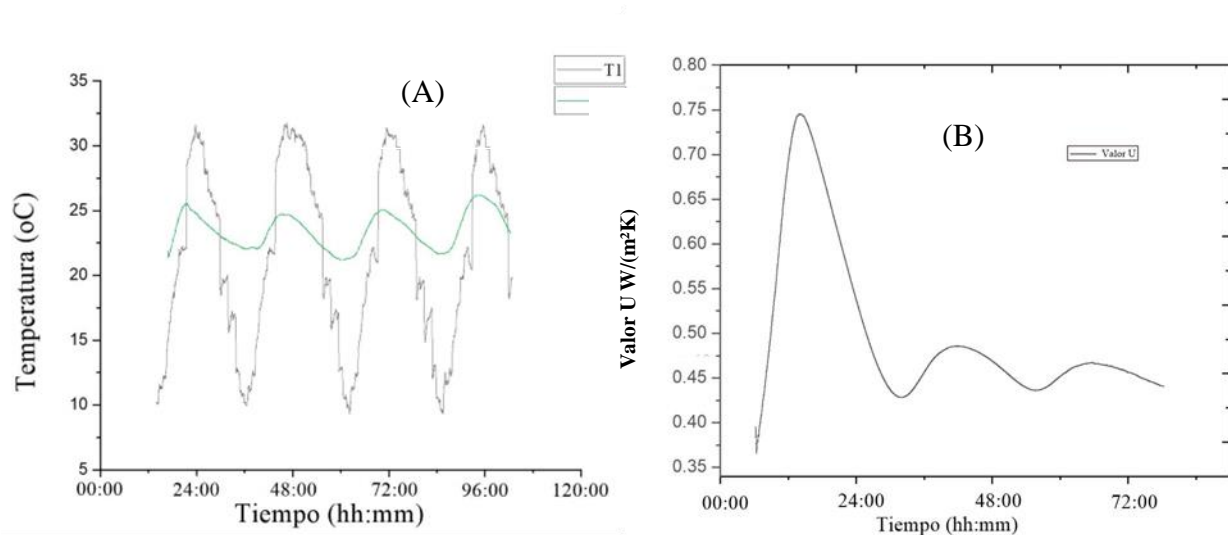


Figura 7. (A) comportamiento del amortiguamiento térmico muestra que contiene 50% PCM. (T1) indica las temperaturas simuladas del exterior, (T2) indica el comportamiento térmico del interior. Figura 7 (A) Comportamiento del valor U durante el periodo de medición.

La temperatura exterior permaneció controlada dentro del rango programado (T1), provocando que la temperatura interior (T2) se mantuviera entre los 27° C y los 23° C, durante las 72 horas de medición, el amortiguamiento térmico fue de 5.2 ° C menor respecto a la temperatura exterior Figura 7 (A); por lo que el coeficiente de transferencia de calor se ve reducido a 0.42 W/(m²K), esto es correspondiente a la cantidad de PCM presente en la muestra analizada, que realiza la función de amortiguar la temperatura interior y esto conlleva a la disminución del valor U.

3.3.3 Tepexil /100 % PCM

El amortiguamiento térmico de la muestra que contiene un 100 % de PCM, fue mayor en comparación con la muestra de control que no contiene PCM. En la figura 8 (A), la temperatura interior (T2) se mantuvo entre los 25 °C y los 19 °C, esto da una diferencia de temperatura de 7 °C respecto a la exterior (T1), El amortiguamiento térmico fue similar los tres días simulados, por lo cual se ve reducido el valor U, calculado por el equipo de medición a 0.31 W/(m²K).

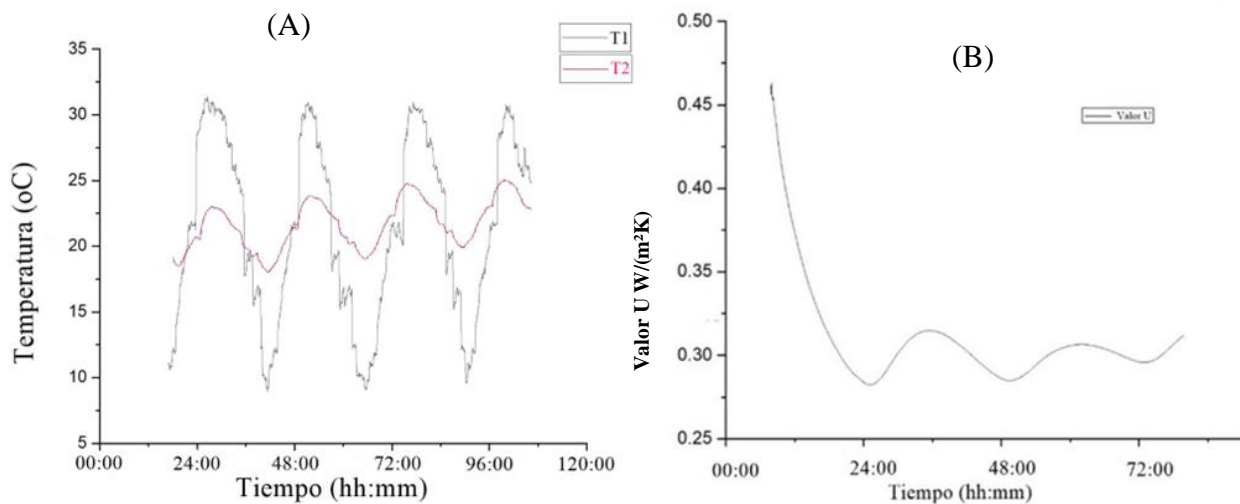


Figura 8. (A) comportamiento del amortiguamiento térmico muestra que contiene 100% PCM. (T1) indica las temperaturas simuladas del exterior, (T2) indica el comportamiento térmico del interior. Figura 8 (B) Comportamiento del valor U durante el periodo de medición de 72 horas.

3.4 calor latente por calentamiento y enfriamiento material PCM

3.4.1 Calentamiento y enfriamientos de PCM

Durante el calentamiento de muestra de PCM puro se observa en la figura 9, el cambio de estado que inicia aproximadamente a los 21°C, donde la tasa de calentamiento disminuye y la temperatura se mantiene dentro de un rango estable, hasta que finaliza la fusión a los 28 °C y vuelve a aumentar la tasa de calentamiento. Mientras ocurre este proceso la temperatura del agua se encuentra en el rango de los 21°C hasta los 31°C; por lo que se puede estimar que la energía que absorbió el agua en ese lapso fue de 350 a 450 calorías en el ciclo completo de calentamiento-enfriamiento, mientras que el calor latente que ocupó el PCM para realizar dicho cambio se estima con la cantidad de energía absorbida por el material de referencia entre la masa del PCM obteniendo 45 J/g.

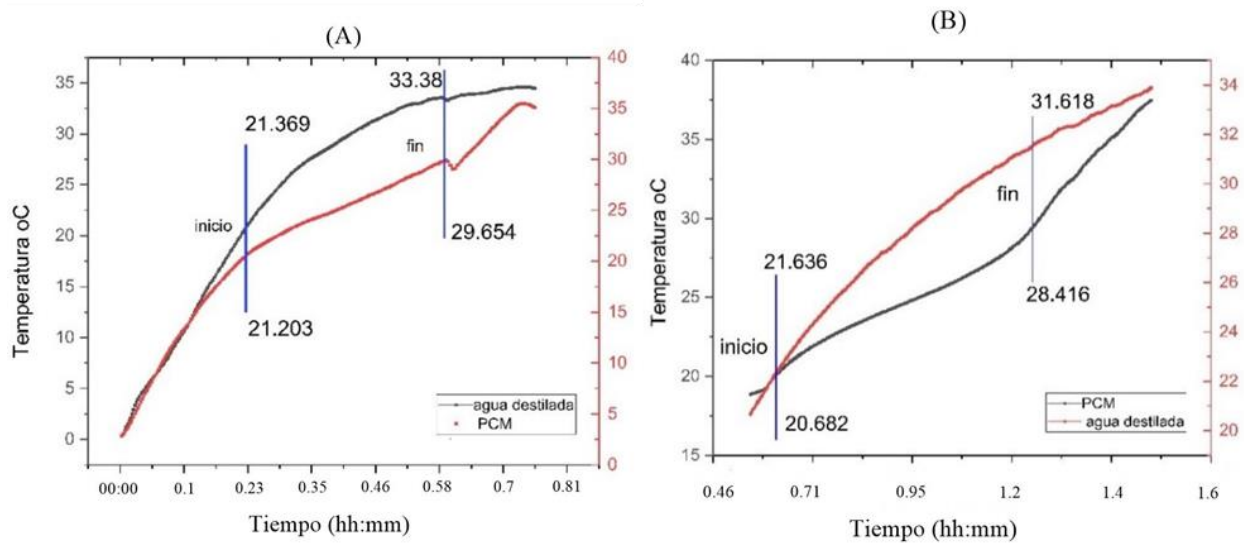


Figura 9. (A) Comportamiento térmico de manteca de cacao durante la etapa de calentamiento. (B) Comportamiento térmico de manteca de cacao durante la etapa de calentamiento lento.

Durante los enfriamientos figura 10, las temperaturas registradas durante el cambio de fase al comenzar la solidificación fueron de 21°C; el proceso de cambio de fase duró aproximadamente una hora, tiempo en el cual la temperatura se mantuvo estable hasta los 17 °C; mientras que la temperatura del agua pasó de los 27 °C a los 12 °C en ese mismo lapso. Se realizó un enfriamiento a mayor velocidad donde las temperaturas de inicio de solidificación se mantuvieron similares al enfriamiento lento dentro de los 21°C, las temperaturas del término del proceso de cambio de fase se presentan más bajas a las registradas anteriormente, sin embargo, la proporción energética se mantiene constante en los cálculos de la muestra referencia. Se obtuvo un calor latente de 65 J/g.

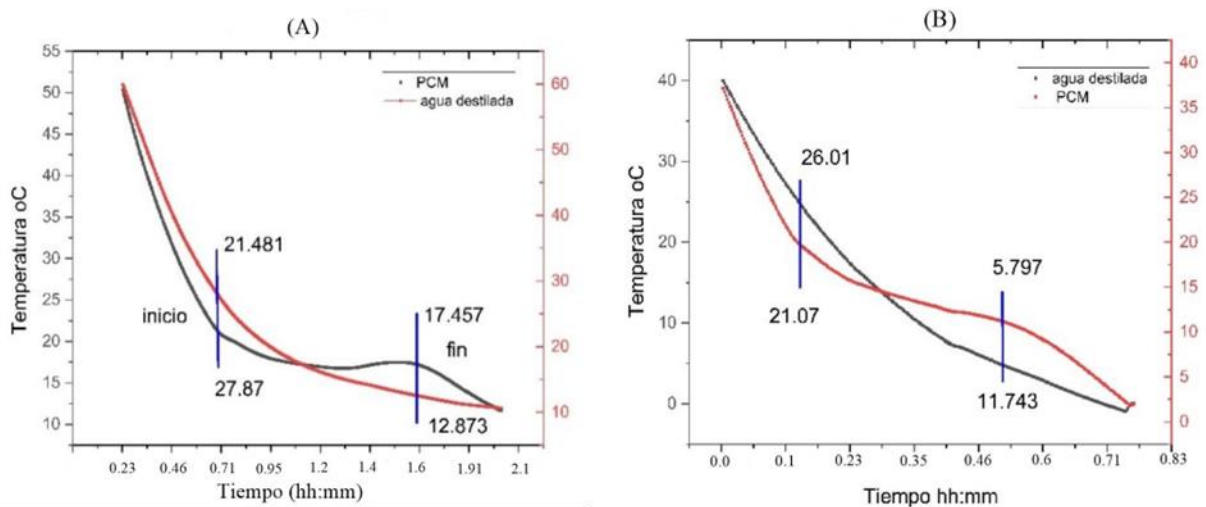


Figura 10. (A) Comportamiento térmico de manteca de cacao durante la etapa de enfriamiento lento. (B) Comportamiento térmico de manteca de cacao durante la etapa de enfriamiento.

3.4.2 Calentamiento y enfriamiento material compuesto PCM/tepexil

Durante el proceso de análisis del material compuesto se observa que las temperaturas del cambio de fase del PCM se presentan dentro de otro rango de temperatura; para la muestra que fue sometida al calentamiento, la temperatura que presentó al inicio de cambio de fase fue de 30.5 °C mientras que al término se presentó a los 35 °C, reduciendo considerablemente el rango de temperaturas donde se presenta el fenómeno de cambio de fase. El rango de temperaturas que presentó el agua durante este proceso fue de 35.6 °C al inicio del cambio de fase y de 46.9 °C cuando finalizó el proceso. El calor absorbido por el material de referencia se calculó en 280 calorías por lo que el calor latente absorbido por el material compuesto se puede estimar en 25 J/g.

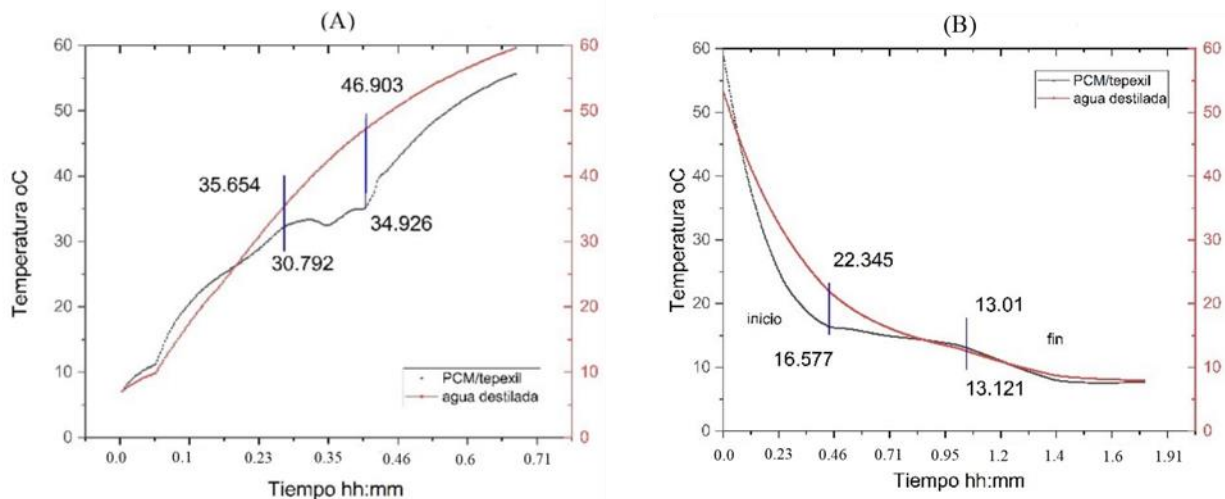


Figura 11. (A) Comportamiento térmico de PCM/tepexil durante la etapa de calentamiento. (B) Comportamiento térmico de PCM/tepexil durante la etapa de enfriamiento.

Durante el enfriamiento de igual manera que en el calentamiento como se muestra en la figura 11, el rango de temperaturas se redujo debido a la cantidad de material PCM contenido en la muestra, iniciando el proceso de cambio de fase a los 16.5 °C y finalizando a los 13 °C, mientras que las temperaturas del material de referencia en ese proceso fueron de 22.3 °C al inicio del cambio de fase y de 13 °C al finalizar la solidificación. El proceso de cambio de fase se redujo considerablemente en la duración del lapso, lo cual ocurrió en 32 minutos. Se calculó el calor latente en 37 J/g para el material compuesto PCM/tepexil lo que corresponde a la reducción de la presencia de PCM en la masa total de la muestra.

3.4.3 Calentamiento y enfriamiento material compuesto 50% PCM/tepexil

Durante las pruebas realizadas a las muestras que se componen de un 50% de material impregnado con PCM, se observa que el proceso de cambio de fase durante el calentamiento figura 12 (A) inicia a una temperatura de 19.5 oC y finaliza en los 24 oC, se reporta una reducción en las temperaturas y el tiempo en el que ocurre el proceso de cambio de fase, de igual manera sucede en el comportamiento del material de referencia, donde las temperaturas en las que sucede este cambio se encuentran a los 14.3 oC al inicio y 20.9 oC al finalizar la fusión. Él tiempo en que transcurrió el cambio de fase fue de 3 minutos aproximadamente. El valor de calor latente se ve reducido proporcionalmente a la cantidad de PCM presente en la muestra analizada. Para el caso del calentamiento se calcula un valor de 20 J/g.

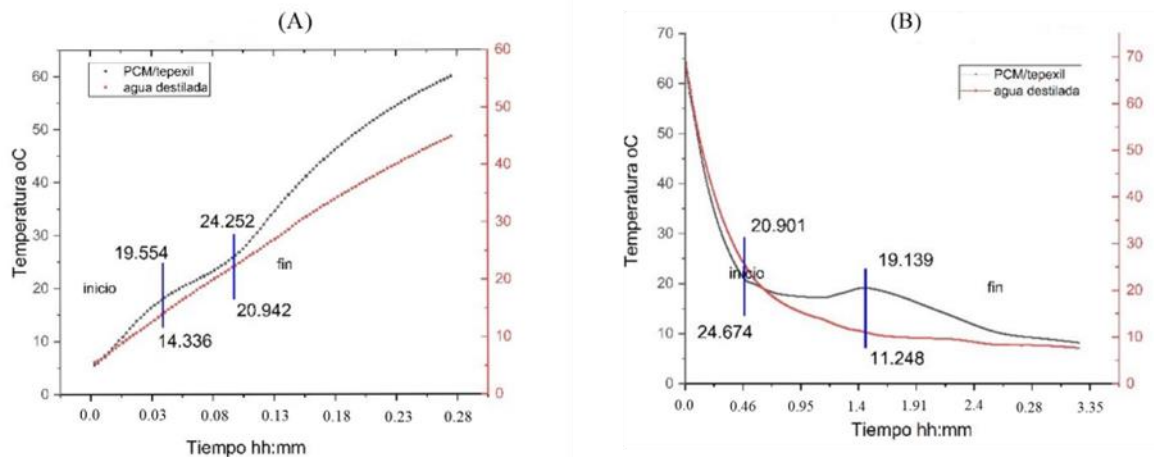


Figura 12. (A) Comportamiento térmico de muestra que contiene 50% PCM/tepxil durante la etapa de calentamiento. (B) Comportamiento térmico de muestra que contiene 50% PCM/tepxil durante la etapa de enfriamiento.

En el caso del enfriamiento figura 12 (B) se reporta una temperatura de inicio de solidificación a los 21 °C mientras que la temperatura se mantuvo constante hasta que finalizó el proceso de cambio de fase a los 19 °C. Las temperaturas que se reportan del material de referencia mientras ocurren el proceso de solidificación al inicio y al final fueron de 24.6 °C y 11.2 °C respectivamente. El enfriamiento en este caso fue más lento para poder obtener una definición más clara del proceso de cambio de fase en el material compuesto. Por lo que se estima un calor latente de 23 J/g.

4. CONCLUSIONES

Los resultados reportados en la metodología propuesta sobre la caracterización térmica indican una proximidad significativa a los valores reportados por métodos establecidos como lo fue el análisis de calorimetría diferencial de barrido DSC. Sin embargo, la diferencia de costos en equipo y análisis es sumamente inferior por lo que es una opción viable para el análisis de elementos constructivos PCM; además que permite analizar muestras de mayor tamaño que análisis convencionales y hacer variaciones de mezclas que en otro tipo de análisis no es posible.

Se comprobó la capacidad de almacenamiento térmico del PCM y la compatibilidad con el material de soporte, por lo que el material compuesto cumple con los objetivos propuestos. La reducción de PCM en las muestras nos permiten estimar la influencia del PCM sobre el tepxil para poder diseñar elementos constructivos que se adapten a los requerimientos especiales según sea el caso. En las mediciones realizadas no se consideró el intercambio de calor entre las muestras y el ambiente de la cámara térmica, debido a que las dos muestras siempre fueron sometidas a las mismas condiciones. Sin embargo, para obtener una mayor precisión y poder calcular su entalpía, es preciso tenerlas en cuenta por lo que se abre una línea para continuar con la caracterización de materiales que contiene PCM, las pruebas térmicas como conductividad y resistencia se ven limitadas a un valor constante contrario al dinamismo térmico que presentan los PCM en el proceso de almacenamiento y liberación de energía térmica, donde los valores de calor específico y calor latente cambian dependiendo la fase en la que se encuentre el PCM.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) CIIDIR-Unidad Oaxaca.

6. REFERENCIAS

- Chung, O., Jeong, S. G., & Kim, S. (2015). Preparation of energy efficient paraffinic PCMs/expanded vermiculite and perlite composites for energy saving in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *137*, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.11.001>
- David, D., Johannes, K., & Roux, J. (2011). *A review on phase change materials integrated in building walls*. *15*, 379–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.019>
- Hekimoğlu, G., & Sarı, A. (2022). A review on phase change materials (PCMs) for thermal energy storage implementations. *Materials Today: Proceedings*, *58*, 1360–1367. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.231>
- Hiki, Hong. Chang hyun park, & ju hwan choi. (2003). *Improvement of the T-history Method to Measure Heat of Fusion for Phase Change Materials.pdf* (pp. 32–39).
- Lakhdari, Y. A., Chikh, S., & Campo, A. (2020). Analysis of the thermal response of a dual phase change material embedded in a multi-layered building envelope. *Applied Thermal Engineering*, *179*(December 2019), 115502. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115502>
- Lee, K. O., Medina, M. A., Sun, X., & Jin, X. (2018). Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. *Solar Energy*, *163*(February), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086>
- Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). Nota técnica: Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energíatérmica. *Materiales de Construcción*, *62*(305), 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Pomianowski, M., Heiselberg, P., Jensen, R. L., Cheng, R., & Zhang, Y. (2014). Cement and Concrete Research A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated. *Cement and Concrete Research*, *55*, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.012>
- Sakulich, A. R., & Bentz, D. P. (2012). Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, *35*, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.042>
- Santaella, J. (2021). *COMUNICADO DE PRENSA NÚM 24 / 21 25 DE ENERO DE 2021 EN MÉXICO SOMOS 126 014 024 HABITANTES : CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2020*.
- Sukontasukkul, P., Sangpet, T., Newlands, M., & Yoo, D. (2020). Heliyon Thermal storage properties of lightweight concrete incorporating phase change materials with different fusion points in hybrid form for high temperature applications. *Heliyon*, *6*(June), e04863. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04863>
- Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K., & Shah, S. P. (2022). A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. *Energy and Buildings*, *260*, 111923. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>

Yinping, Z., & Yi, J. (1999). A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology*, 10(3), 201–205. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/3/015>





Caracterización mecánica de concreto con fibras orgánicas endémicas de la Península de Yucatán

J. J. Alvarado Pacheco¹, A. P. Rojo Nuñez², M. V. Dzib Vivas³, A. Bacelis Jiménez^{4*},
O. May Tzuc¹, T. Perez-Lopez.⁴ y M. Jiménez-Torres¹

*Autor de Contacto: aabaceli@uacam.mx

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.

²Empresa Concretos RICASA, Cancún, Quintana Roo, México.

³Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.

⁴Centro de Investigación en Corrosión, San Francisco de Campeche, México.

RESUMEN

En este trabajo se evalúan las propiedades mecánicas del concreto con agregados de fibras de henequén (FH) y bagazo de caña de azúcar (FBC), con la finalidad de observar el cambio en sus propiedades. Las muestras de concreto que fueron elaboradas se diseñaron con una relación a/c de 0.6 para soportar una resistencia a la compresión de 250 kg/cm² (NMX-C-083-ONNCCE-2014). Se realizaron cinco tipos de especímenes, un testigo de concreto convencional, dos agregando FH y otras dos agregando FBC, en ambos casos la cantidad de fibra que se agregó fue una de 600 g y otra de 900 g por metro cúbico de concreto. Estas fueron evaluadas a los 3, 7 y 28 días de curado (NMX-C-148-ONNCCE-2010), mediante resistencia a la compresión, resistividad y módulo de elasticidad. Los especímenes de concreto con fibras de henequén y bagazo de caña con dosificación de 600 g por metro cúbico de concreto tuvieron el mejor desempeño en las pruebas mecánicas. Alcanzando a los 28 días de curado superiores a 266 kg/cm² y 230,000 kg/cm², para la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, respectivamente. Por otro lado, la mayor resistividad la alcanzó la muestra con FBC con la menor dosificación.

Palabras clave: Concreto; Desempeño mecánico; Fibra de bagazo de caña; Fibra de henequén; Resistividad.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el concreto es considerado como el material de construcción más utilizado en la fabricación de viviendas por su bajo costo y versatilidad (Santamaria et al., 2021). Debido a las múltiples áreas de aplicación, la fabricación del concreto ha ido en aumento año con año, llegando a alcanzar una producción mundial de 4.1 billones de toneladas métricas de cemento en el 2023 (Statista, 2023). Sin embargo, la elaboración del concreto es un gran generador de contaminación ambiental, debido al cemento Portland que es uno de sus componentes primarios y el responsable de generar alrededor del 8% de CO₂ a nivel mundial (Nilimaa, 2023). Asimismo, en la búsqueda del desarrollo sostenible y la posibilidad de implementar materiales alternativos que contribuyan a la disminución de gases de efecto invernadero, la extracción y disminución de materiales convencionales de construcción y que a su vez genere menos contaminación sin descuidar las propiedades de durabilidad y resistencia del concreto, existe una necesidad para encontrar soluciones más sostenibles para el sector de la construcción (Hussien & Oan, 2022). En este sentido, la incorporación de fibras naturales en el concreto es cada vez más popular en la industria de la construcción ya que contribuye a mejorar las propiedades mecánicas de concreto convencional como lo son la ductilidad y la resistencia al agrietamiento. Al mismo tiempo que lo convierten en un buen sustituto de las fibras sintéticas (Pruthviraj et al., 2023). Por otra parte, el aprovechamiento de desechos orgánicos son una alternativa para implementar en la fabricación de concreto (Flores-Johnson et al., 2020). Entre estos desechos orgánicos las fibras de bagazo de caña y las fibras de henequén podrían influir positivamente en las propiedades del concreto.

Duong y colaboradores, 2021 observaron que la incorporación de fibras de cascara de maíz con una concentración del 1% respecto al peso del cemento, mejorando tanto la resistencia a la falla de la prueba no confinada, así como la resistencia a la tracción, aumentando estas propiedades en un 35.3 % y 72.6 % respectivamente. Del mismo modo, Ahmad y colaboradores, 2020 al incorporar 1.5 % de fibras de coco con respecto al peso del cemento, y después de 28 días de curado, la capacidad de compresión aumento en un 25% y la resistencia a la flexión en 15% con respecto al concreto sin fibras. Asimismo, Asaduzzaman y Islam, 2023 al utilizar fibra de yute de longitudes de aproximadamente 2.5cm, y añadir 0.1% de peso respecto al volumen de concreto. El concreto resultante obtuvo un aumento del 7% con respecto al concreto convencional. Además, que la fibra de yute tiene una influencia significativa en el control de las grietas por contracción. También, Ali y colaboradores, 2024 demostraron que la incorporación de fibras de bambú y basalto en el concreto aumentó la resistencia a la compresión y la flexión en un 6.5% y 21.5% respectivamente, en comparación con la muestra testigo a los 60 días de curado. Además, tuvo una permeabilidad al agua de 26.6% menor que la muestra de control lo que se asocia a tener mayor durabilidad. Por su parte, Jin y colaboradores, 2023 analizaron el rendimiento mecánico del concreto espumado híbrido al incorporar varias fracciones volumétricas de fibras de coco y basalto (0,15%, 0,43% y 0,45%). De acuerdo con los resultados, el contenido óptimo de fibra y la relación de mezcla son 0,3 % y 1:2, respectivamente, lo que aumentó el comportamiento de resistencia del concreto. Los resultados positivos de la incorporación de fibras orgánicas en concreto han motivado a este trabajo donde se evalúan los efectos en las propiedades mecánicas del concreto al adicionar fibras de bagazo de caña, y de henequén después de 28 días de curado.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño y construcción de probetas de concreto

Para el desarrollo del estudio se diseñaron y elaboraron probetas de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las muestras fueron diseñadas para alcanzar una resistencia de 250 kg/cm² con una relación agua/cemento de 0.6 de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2015). Para llevar a cabo la comparación se construyeron cinco probetas, un testigo de concreto convencional, dos adicionando fibras de henequén y dos adicionando fibras de bagazo de caña. Para el caso de estas dos últimas se varió la cantidad de fibra por metro cubico de concreto en 600 y 900 g, respectivamente, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de las probetas de estudio.

Muestras	Cantidad
Probeta de concreto con fibra de henequén (P1)	600 g/m ³
Probeta con fibra de henequén (P2)	900 g/m ³
Probeta con fibras de bagazo de caña (P3)	600 g/m ³
Probeta con fibra de bagazo de caña (P4)	900 g/m ³

Las fibras de bagazo de caña utilizadas en esta investigación se obtuvieron del ingreso de la Joya localizado en Sihochac municipio de Champotón Campeche. Por su parte, las fibras de henequén fueron producidas por Hidrosistemas y Soluciones Tecnológicas SAS de CV, Estas fibras fueron cortadas en dimensiones de aproximadamente 2.5 cm para después ser sometidas a un doble lavado con agua potable de la toma municipal. Posteriormente, fueron trasferidas a un vaso de precipitado donde se sumergieron con agua purificada, dejándolas reposar durante 24 horas, con la finalidad de eliminar las impurezas. Aunado a esto, las fibras se pusieron a secar a temperatura ambiente en un periodo de 24 horas adicionales.

Las dosificaciones de fibras se calcularon con respecto al porcentaje en peso del cemento. Por otro lado, el concreto para las probetas fue preparado con cemento Portland compuesto (CPC 40) marca Holcim, piedra caliza como agregado grueso, polvo de piedra caliza como agregado fino, agua potable y fluidificante comercial. En el caso de las probetas con fibras orgánicas estas fueron hidratadas previamente con un atomizador para mezclarlas con los agregados finos y gruesos. Posteriormente, se añadió cemento y fluidificante disuelto hasta obtener una dispersión homogénea, la cual fue mezclada con una revoladora mecánica. Finalmente, vaciado en los moldes cilíndricos, como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1. Proceso de elaboración de las probetas de concreto convencional y con adiciones de fibras de henequén y bagazo de caña de azúcar.

2.2. Caracterizaciones mecánicas de las probetas de concreto

Las probetas obtenidas fueron curadas mediante inmersión en una pileta con una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ según la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, 2016), y evaluadas a los 3, 7 y 28 días mediante pruebas de resistencia de compresión y resistividad eléctrica. Por otra parte, también se analizó el módulo de elasticidad de acuerdo con la norma NMX-C-128-ONNCCE-2020 (ONNCCE, 2022) este último se analizó a los 28 días de curado. La Figura 2 muestra el proceso de curado de las probetas.

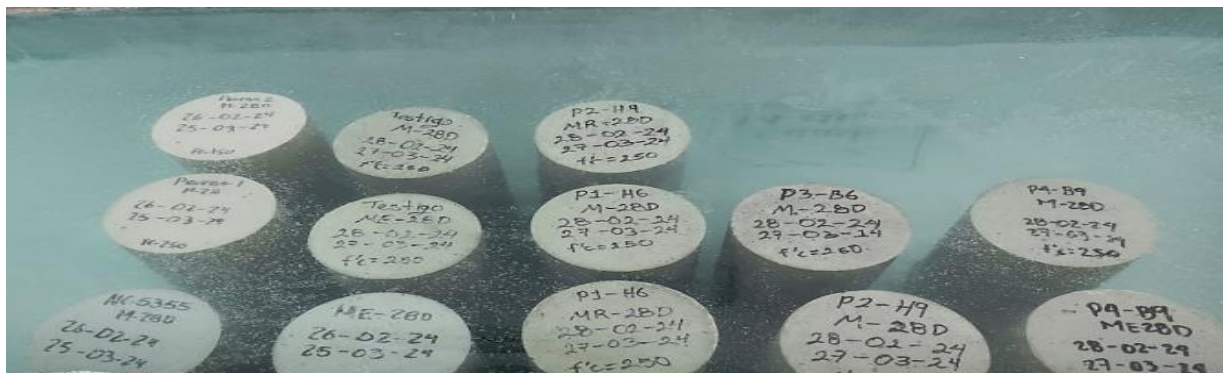


Figura 2. Proceso de curado de las probetas de concreto en la pileta con la solución saturada de hidróxido de calcio a los 3, 7 y 28 días.

Para la caracterización de las propiedades mecánicas de elasticidad y resistencia a la compresión del concreto se utilizó una máquina de ensayo de compresión 10100 psi (Power Team, Estados Unidos) con manómetro integrado. Para este estudio se pesaron las probetas, posteriormente se cabecearon para nivelarlas y se colocaron en el equipo para evaluar su resistencia a la compresión

(Zambrano Navarrete et al., 2022). Asimismo, para el análisis de la resistividad eléctrica se utilizó un resistivímetro de superficie de hormigón (Proceq, Suiza). Para este análisis se colocó el equipo en tres puntos diferentes de la probeta de concreto y con el principio de la sonda Wenner en donde se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores (Guzmán, 2023). La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas. La Figura 3 muestra las pruebas realizadas para obtener las propiedades mecánicas.

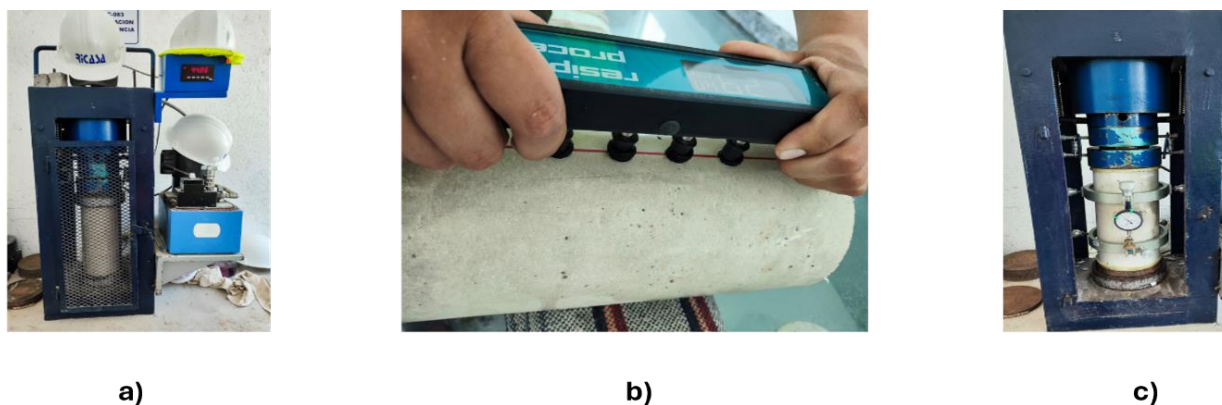


Figura 3. Pruebas mecánicas del concreto: a) resistencia a la compresión, b) resistividad eléctrica y c) módulo de elasticidad.

3. RESULTADOS

3.1. Resistencia a la compresión

La Figura 4 presenta los resultados del monitoreo de la resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado de las probetas de concreto, en donde se compara la muestra testigo con la probeta de concreto con 600 g/m^3 de fibra de henequén (P1), probeta de concreto con 900 g/m^3 de fibra de henequén (P2), probeta de concreto con 600 g/m^3 de fibra de bagazo de caña (P3) y la probeta de concreto con 900 g/m^3 de bagazo de caña (P4). Los análisis realizados mostraron que la adición de fibras de henequén y bagazo de caña aumentaron la resistencia a la compresión en comparación con la muestra base. Se tuvo un aumento del 5.53 % para P1, del 4.35 % para P2, del 7.12 % para P3 y del 5.14 % para P4 con respecto a la muestra base. Esto se atribuye a que las fibras quedan atrapadas en la matriz cementosa, reduciendo el tamaño de los poros del concreto confiriéndole mayor resistencia a la compresión (Talavera-Pech et al., 2021). Los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos en este trabajo (P1-P4), son mayores a los reportados por Rajkohila y colaboradores, 2023 quienes en su estudio sobre la incorporación de fibras naturales derivadas de residuos agrícolas (banano y coco) en la durabilidad del concreto de alta resistencia determinaron que este aumentaba su resistencia a la compresión entre 1-1.5% en comparación con la mezcla de control (sin fibras) a los 180 días de curado. Por otro lado, se encontró que al aumentar el contenido de fibras en el concreto (P2 y P4), la resistencia a la compresión y tracción del material se ve afectado negativamente debido al aumento del volumen de poros por la degradación de las mismas fibras (Shen et al., 2022).

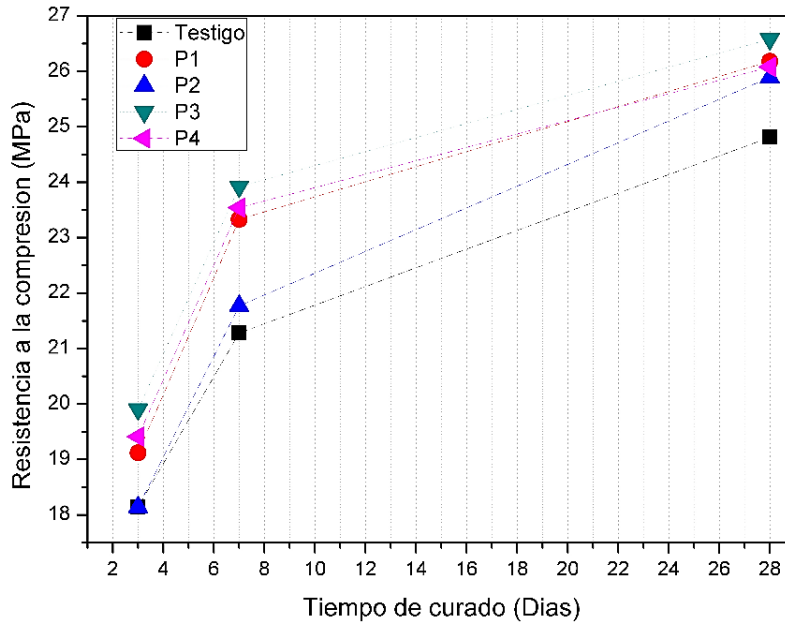


Figura 4. Resistencia a la compresión en función del tiempo de curado y los casos de estudio.

3.2. Resistividad eléctrica

En la Figura 5 se muestran los resultados de la resistividad eléctrica a los 3, 7 y 28 días del curado de las probetas de concreto. Se observa que P3, P4 y P5 obtienen mejores resultados de resistividad, representando un aumento del 3.53 % para P2 y P4, mientras que P3 aumentó el 5% siendo la probeta de concreto con 600 g m³ de henequén la que mejor desempeño demostró. Esto conlleva a que mientras mayor sea el valor de resistividad menor será la porosidad del concreto teniendo mayor resistencia mecánica y es menos propenso a presentar corrosión (Juela et al., 2020).

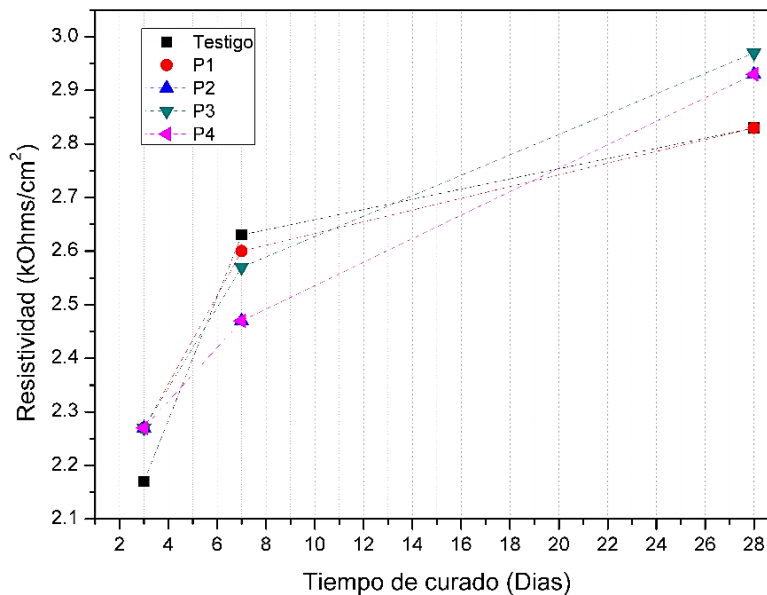


Figura 5. Resistividad eléctrica en función del tiempo de curado y los casos de estudio.

3.3. Módulo de elasticidad y densidad

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del módulo elástico y densidad evaluado a los 28 días de curado. Se observa que P1 y P3, obtuvieron mejores resultados del módulo elástico, representando un aumento del 6 y 8 % respectivamente con respecto al caso base. Para el caso de la muestra de concreto con fibras de bagazo de 600 g/m^3 es la que mejor desempeño ha demostrado con respecto a las propiedades mecánicas del concreto. Es por esta razón, que el agregar fibras orgánicas en cantidades adecuadas contribuye a tener un concreto con más durabilidad, aumentar la resistencia al agrietamiento y disminuir la abertura de las fisuras (Ahmad & Zhou, 2022).

Tabla 2. Propiedades mecánicas del concreto

Propiedad	Testigo	P1	P2	P3	P4
Módulo elástico (kg/cm^2)	220443	233539	218069	238765	221903
Densidad (kg/m^3)	2151	2155	2149	2125	2113

4. CONCLUSIONES

La incorporación de fibras orgánicas de henequén y bagazo de caña como aditivos en la elaboración del concreto, contribuye a mejorar sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Los especímenes de concreto con fibras de henequén y bagazo de caña con una dosificación de 600 g/m^3 de cemento a los 28 días de curado, obtuvieron valores superiores a los 266 kg/cm^2 y $230,000 \text{ kg/cm}^2$, para la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, respectivamente. Por otro lado, la mayor resistividad la alcanzó la muestra con FBC con la menor dosificación, mostrando mejores condiciones de durabilidad en comparación con el caso base. Esto sugiere que la incorporación de fibras de bagazo de caña en la menor dosificación es una opción para el diseño de concreto con mejores condiciones de durabilidad, a la misma vez que se aprovecha este residuo sólido proveniente de la industria azucarera. Como trabajo futuro se plantea analizar el proceso de corrosión en la barrilla de refuerzo, al incorporar las probetas en una cámara de carbonatación acelerada y realizar la una caracterización de las propiedades termofísicas de las probetas para poder visualizar si contribuyen estos materiales a tener menores ganancias de calor en comparación con el concreto convencional.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su agradecimiento al Centro de Investigación en Corrosión por las facilidades brindadas y a la empresa CONCRETOS RICASA CANCÚN por su apoyo en la elaboración de las probetas de concreto y en la obtención de las propiedades mecánicas de las mismas. Asimismo, se extiende el agradecimiento a los Ingenieros Iván Rubial, Anuar Kuri y Areli Rojo por todo el apoyo brindado para llevar a cabo esta investigación. Asimismo, J.J. Alvarado Pacheco (No. CVU:1050900) y A. Bacelis Jiménez agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por las becas otorgadas de maestría y posdoctorado (I1200/320/2022),



respectivamente.

6. REFERENCIAS

- Ahmad, J., Manan, A., Ali, A., Khan, M. W., Asim, M., & Zaid, O. (2020). A Study on Mechanical and Durability Aspects of Concrete Modified with Steel Fibers (SFs). *Civil Engineering and Architecture*, 8, 814–823. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:222126952>
- Ahmad, J., & Zhou, Z. (2022). Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 333, 127353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>
- Ali, D. M., Chin, S. C., Bao, C., & Gimbun, J. (2024). Enhancement of reinforced concrete durability and performance by bamboo and basalt fibres. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103572>
- Asaduzzaman, S. M., & Islam, G. M. S. (2023). Using Jute Fiber to Improve Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 2204452. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2204452>
- Duong Nga Thanh and Satomi, T. and T. H. (2021). Study on the Compressive and Tensile Strength Behaviors of Corn Husk Fiber-Cement Stabilized Soil. En W.-J. and Q. H. A. and G. L. H. and H. N.-L. Huang Yo-Ping and Wang (Ed.), *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development* (pp. 492–503). Springer International Publishing.
- Flores-Johnson, E. A., Company-Rodríguez, B. A., Koh-Dzul, J. F., & Carrillo, J. G. (2020). Shaking Table Test of U-Shaped Walls Made of Fiber-Reinforced Foamed Concrete. *Materials*, 13(11), 2534. <https://doi.org/10.3390/ma13112534>
- Guzmán, A. (2023). Umbrales de resistividad para evaluar durabilidad del hormigón con hidrofugantes y diferentes relaciones agua/cemento. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 286–298. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.699>
- Hussien, N. T., & Oan, A. F. (2022). The use of sugarcane wastes in concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00076-6>
- Ibrahim, A., Ramadan, M. R., Elsebaei, A., Elgohary, H., & AbdEldayem, A. E. (2021). Performance analysis of a Silicon PV module (100W) in outdoor conditions: Experimental and Simulation study. *Egyptian Journal of Solids*, 43(1), 192–210. <https://doi.org/10.21608/ejs.2021.100187.1025>
- Jin, Y., Wang, X., Huang, W., Li, X., & Ma, Q. (2023). Mechanical and durability properties of hybrid natural fibre reinforced roadbed foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 409, 134008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134008>
- Juela, D., Bermeo, J., & Alvarez, D. (2020). Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de hormigones elaborados con materiales cementicios suplementarios y agregados reciclados. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 10(1), 32–44. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2129>
- Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE). (2022). *NORMA MEXICANA NMX-C-128-ONNCCE-2020 “Industria de la Construcción-Concreto sometido a Compresión-Determinación del módulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson-Metodo de Ensayo”* (pp. 1–19). Secretaria de Gobierno-Diario



Oficial de Federación.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (ONNCCE). (2015). *NORMA MEXICANA NMX-C-083-ONNCCE-2014 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES-MÉTODO DE ENSAYO"* (pp. 1–10). Secretaria de Gobierno-Diario Oficial de Federación.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (ONNCCE). (2016). *NORMA MEXICANA NMX-C-ONNCCE-2016 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO"* (pp. 1–16). Secretaria de Gobierno-Diario Oficial de Federación.

Pruthviraj, K. N., Jagalur Mahalingasharma, S., & Patil, S. (2023). Experimental study on strength behaviour of concrete reinforced with natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 80, 659–667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.065>

Rajkohila, A., Prakash Chandar, S., & Ravichandran, P. T. (2023). Influence of Natural Fiber Derived from Agricultural Waste on Durability and Micro-Morphological Analysis of High-Strength Concrete. *Buildings*, 13(7), 1667. <https://doi.org/10.3390/buildings13071667>

Santamaria, J., Adame, B., & Bermeo, C. (2021). Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 4(1), 91–101. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.05>

Shen, Z., Deifalla, A. F., Kamiński, P., & Dyczko, A. (2022). Compressive Strength Evaluation of Ultra-High-Strength Concrete by Machine Learning. *Materials*, 15(10), 3523. <https://doi.org/10.3390/ma15103523>

Statista. (2023). *Producción mundial de cemento de 1995 a 2022*. <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/> on 27 Mar 2023

Talavera-Pech, W. A., Montiel-Rodríguez, D., Paat-Estrella, J. de los A., López-Alcántara, R., Pérez-Quiroz, J. T., & Pérez-López, T. (2021). Improvement in the Carbonation Resistance of Construction Mortar with Cane Bagasse Fiber Added. *Materials*, 14(8), 2066. <https://doi.org/10.3390/ma14082066>

Zambrano Navarrete, L. D., Alava Santos, R. J., Ruíz Párraga, W. E., & Menéndez Menéndez, E. A. (2022). Aplicación de métodos de curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón. *Gaceta Técnica*, 23(1), 35–47. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.4>



Análisis de propiedades físico mecánicas de un concreto permeable con microfibras sintéticas

M. G. Gómez^{1*}, W. Martínez¹, E. M. Alonso¹, M. Arreola¹, H. L. Chávez¹

*Autor de Contacto: maria.valdovinos@umich.com

¹Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas", Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

RESUMEN

El concreto permeable presenta grandes beneficios ambientales al ser usado en pavimentos para desalojar el agua pluvial en zonas urbanas; sin embargo, lograr su permeabilidad requiere un diseño con poros macroscópicos interconectados, lo que reduce significativamente su resistencia. Aunque existen varios estudios sobre las propiedades que adquiere un concreto adicionado con microfibras, aún son escasas las investigaciones sobre este tipo de incorporación en concreto permeable. Con el objetivo de ampliar los estudios referentes a este material, se elaboró un concreto permeable adicionado con el 0.08% de microfibras sintéticas (con respecto al peso total de componentes) con la finalidad de comparar sus propiedades mecánicas con las de un concreto permeable sin adición. Para el análisis mecánico se elaboraron especímenes que se dejaron curando 90, 120 y 180 días, edades en las que fueron ensayados con las pruebas de resistividad eléctrica, compresión simple y tensión indirecta. Se obtuvieron resultados favorables para la prueba de tensión indirecta en donde la mezcla con adición presentó una mayor resistencia en todas las edades. Respecto a las otras dos pruebas, los especímenes con microfibras tuvieron mayor resistencia, excepto en una edad de prueba: a 90 días en resistividad eléctrica, y a 120 días en compresión simple.

Palabras clave: Concreto; Permeabilidad; Microfibras; Evaluación; Mecánica.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto permeable ha ganado popularidad en varias regiones del mundo en las últimas décadas debido a la gran cantidad de beneficios que trae consigo sus diferentes aplicaciones (Chandrappa & Biligiri, 2016). Este material se elabora con cemento, agua y agregado grueso con poco o con nada de agregados finos, por lo que se genera una estructura abierta de poros con una conectividad que vuelve al concreto permeable al agua y al aire (Hesami et al., 2014).

Los beneficios ambientales que se obtienen con la aplicación de concreto poroso en zonas urbanas, suelen ser la gestión de la escorrentía de aguas pluviales (disminuyendo las escorrentías de aguas pluviales y ayudando en la restauración de aguas subterráneas), mitigación del ruido y reducción del efecto isla de calor (Rangelov et al., 2016). Es importante mencionar que los problemas de inundación están en primer orden a nivel mundial, destacando porque de los desastres en relación con el agua, 50% pertenece a inundaciones (Hernández-Urbe et al., 2017); además, como el recurso subterráneo representa el 43% del agua utilizada para riego y abastece por lo menos al 50% de la población mundial (FCEA, 2017), su sobreexplotación aumenta la importancia de poner mayor énfasis en la recargar de los mantos acuíferos. Cuando el concreto mencionado es utilizado como capa de rodadura de pavimentos, la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos enlista las siguientes ventajas: tratamiento de agua pluvial gracias a que la filtración natural elimina los contaminantes, disminuye la necesidad de bordillos y/o alcantarillas pluviales en los bordes del pavimento, mayor resistencia al deslizamiento traducido en una mayor seguridad y, si se diseña adecuadamente las capas inferiores del pavimento, recarga de mantos acuíferos locales (Giustozzi, 2016).

Todos los beneficios que ofrece este material están ligados a su porcentaje de poros, sin embargo, esta propiedad también está ligada a la resistencia mecánica del concreto. Para producir un concreto poroso que tenga estabilidad en la pasta de cemento y un recubrimiento eficaz de agregados, se sugiere relaciones agua-cemento de 0.26 a 0.45; si se consideran valores típicos de porcentajes de poros entre 15 y 35%, la resistencia a compresión para dichos porcentajes de poros y las relaciones agua-cemento mencionadas anteriormente, se encuentra en el rango de 2.8 MPa a 28 MPa (Elango et al., 2021). Los valores de resistencia a compresión en concreto hidráulico convencional son de 20 a 40 MPa (Rangelov et al., 2016), lo cual implica que, la resistencia de un concreto permeable está en un categoría menor al de un concreto convencional.

Existen varias investigaciones dentro del área de tecnología de materiales que analizan la adición de fibras y polímeros al concreto convencional para mejorar sus características mecánicas. Los beneficios que se han encontrado con la implementación de polímeros en concreto convencional han sido mejoramiento en la resistencia a compresión, la permeabilidad, y resistencia al proceso de congelamiento – deshielo (Park et al., 2022). Cuando se elabora un concreto con fibras, el material obtenido puede absorber energía, tiene mayor flexibilidad y una mayor resistencia al impacto, por lo que se reduce el riesgo de falla en situaciones donde es sometido a cargas repetidas (Hesami et al., 2014); de manera general, introducir fibras al concreto reduce la pérdida de agua, la segregación de la pasta de cemento, además de que la distribución aleatoria de las fibras en la estructura interna del concreto, aumenta su resistencia a grietas y disminuye su naturaleza quebradiza (Oni et al., 2020).

Aunque existen varios estudios sobre las propiedades que adquiere un concreto adicionado con microfibras, aún son escasas las investigaciones sobre este tipo de incorporación en concreto permeable.



Por ello, con la intención de ampliar los estudios sobre la incorporación de fibras en concreto permeable, se elaboró un concreto poroso adicionado con microfibras sintéticas y posteriormente fue sometido a diferentes pruebas que permitieran su análisis físico mecánico. El objetivo del trabajo es comparar las propiedades mecánicas de la mezcla adicionada con microfibras contra un concreto permeable sin adición, al mismo tiempo que se plantea su uso en zonas de bajo tránsito en zonas urbanas como estacionamientos, aceras, jardineras, o lugares de bajo tránsito, para aumentar las zonas de percolación y disminuir los problemas de inundaciones en las ciudades.

2. METODOLOGÍA

El diseño del concreto permeable se elaboró siguiendo los parámetros de diseño presentados en el Report on Pervious Concrete (ACI, 2010) elaborado por el American Institute Concrete (ACI) y siguiendo el procedimiento de la norma ACI 211.3 que presenta un ejemplo de diseño estándar para un concreto con revenimiento cero (ACI, 2002).

No se incluyó agregados finos en el diseño, por lo tanto, los materiales utilizados para la elaboración de la mezcla fueron: cemento, agua, agregados grueso y un aditivo inclusor de aire.

- Cemento Portland Compuesto clase resistencia 30, resistencia Rápida y con Resistencia a Sulfatos (CPC 30 R RS), de la clasificación expresada en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 (ONNCCE, 2017).
- Agua potable de la red municipal de Morelia, Michoacán.
- Grava triturada con tamaños de partículas de 19 mm (3/4”) a 4.76 mm (malla no. 4) del banco de materiales ubicado en el estado de Michoacán, México “TRACSA”
- El aditivo inclusor de aire utilizado corresponde al aditivo HPA-AIR-CRETE-SR del grupo High Performance Admixture, elaborado con resina sintética a base de tenso activos sintéticos.

La microfibra utilizada es la mostrada en la figura 1. Se trata de una fibra sintética estructural diseñada para ser usada en concreto con tamaños aproximados de 0.19 mm de espesor, 0.5 mm de ancho y 20 mm de largo.



Figura 1. Microfibra sintética para concreto utilizada en el diseño de la mezcla.

Se utilizó una relación agua-cemento de 0.45, así como 6 mililitros de aditivo inclusor de aire por cada kg de cemento en el diseño, con la finalidad de hacer una mezcla con la mejor trabajabilidad posible. Las mezclas elaboradas fueron dos: una mezcla control sin adición denominada TP-6, y

una mezcla con la adición de 0.08% de microfibras (el porcentaje de adición es con respecto al peso total de la mezcla) la cual se identificó como TP6-M. Las dosificaciones de materiales requeridas para un m³ de concreto, con base al diseño realizado se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidades de materiales necesarias para 1 m³ de concreto permeable

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Aditivo (ml/m ³)	Microfibra (kg/m ³)
TP-6	271.4230	1658.2500	133.7766	1628.5380	---
TP6-M	271.4230	1658.2500	133.7766	2442.8070	1.6508

Las pruebas llevadas a cabo fueron: resistividad eléctrica (RE), compresión simple (f'_c) y tensión indirecta (TI). Cada una de estas pruebas fueron ensayadas a edades tardías de 90, 120 y 180 días, con la finalidad de tener una visión más completa acerca del rendimiento del concreto pasada la edad de prueba estándar.

Se elaboraron especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura para llevar a cabo la prueba de resistividad eléctrica, siguiendo las especificaciones y métodos especificados en la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019 “Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico” (ONNCCE, 2019b).

Para la prueba de compresión simple se utilizaron las mismas probetas que las usadas en resistividad eléctrica gracias a que esta última no es una prueba destructiva. La norma que dicta el procedimiento para realizar la prueba de compresión simple en concreto hidráulico es la NMX-C-083-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014).

Finalmente, para obtener la resistencia a tensión indirecta de las dos mezclas elaboradas, se colaron muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, y se ensayaron de acuerdo a las especificaciones dictadas en la norma NMX-C-163-ONNCCE-2019 “Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto-Método de ensayo (ONNCCE, 2019a).

3. RESULTADOS

La figura 2 muestra los resultados de la prueba de resistividad eléctrica realizada a las muestras cilíndricas de 15 cm de diámetros por 30 cm de largo, a las edades de 90, 120 y 180 días. Contiene los resultados de las dos mezclas.

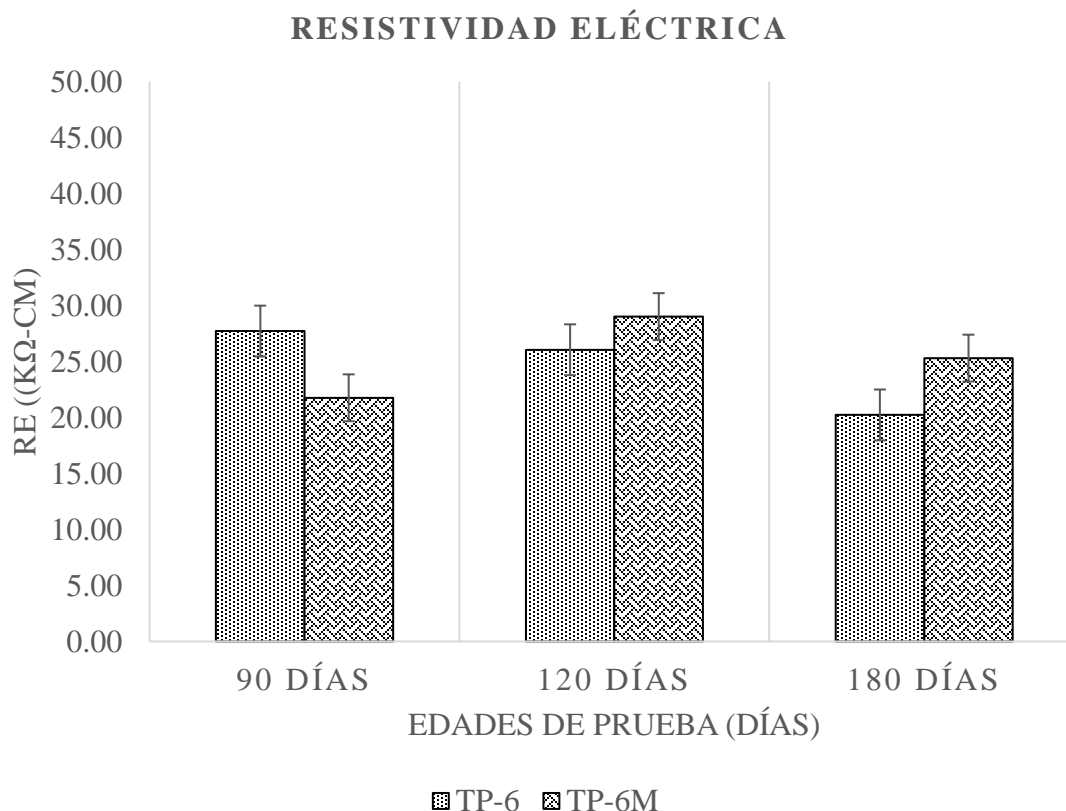


Figura 2. Resultados de la prueba de resistividad eléctrica realizada en la mezcla TP-6 y la TP6-M

La mezcla control (TP-6) muestra una tendencia de decrecimiento conforme al paso del tiempo, iniciando con una resistividad eléctrica a los 90 días de 27.72 KΩ-cm y terminando con un valor de 20.23 KΩ-cm en la edad de 180 días. La mezcla adicionada con 0.08% de microfibras tiene un valor mínimo de resistividad eléctrica en la primera edad de prueba, con un valor de 21.76 KΩ-cm, en la segunda edad de prueba el resultado crece hasta 29.01 KΩ-cm y a los 180 días este valor decrece un poco, sin llegar a ser menor que en la primera edad, con un dato de 25.30 KΩ-cm.

Comparando los valores de resistividad eléctrica obtenidos en las dos mezclas, se puede apreciar, primeramente, que la tendencia decreciente mostrada por la mezcla control no se observa en la mezcla TP6-M; y segundo, que en las dos últimas edades de prueba la mezcla con adición tiene un valor mayor de resistividad eléctrica, comparado con la muestra TP-6. Además, el valor menor de resistividad eléctrica en la mezcla con microfibra, llega a ser mayor que el resultado más baja expuesto por la mezcla control.

Para presentar los resultados de la resistencia a compresión de las dos mezclas se realizó la gráfica de barras que se encuentra en la figura 3. Las muestras cilíndricas probadas a las edades de 90, 120 y 180 días son las mismas muestras cilíndricas de 15 cm x 30cm utilizadas en la prueba no destructiva de resistividad eléctrica.

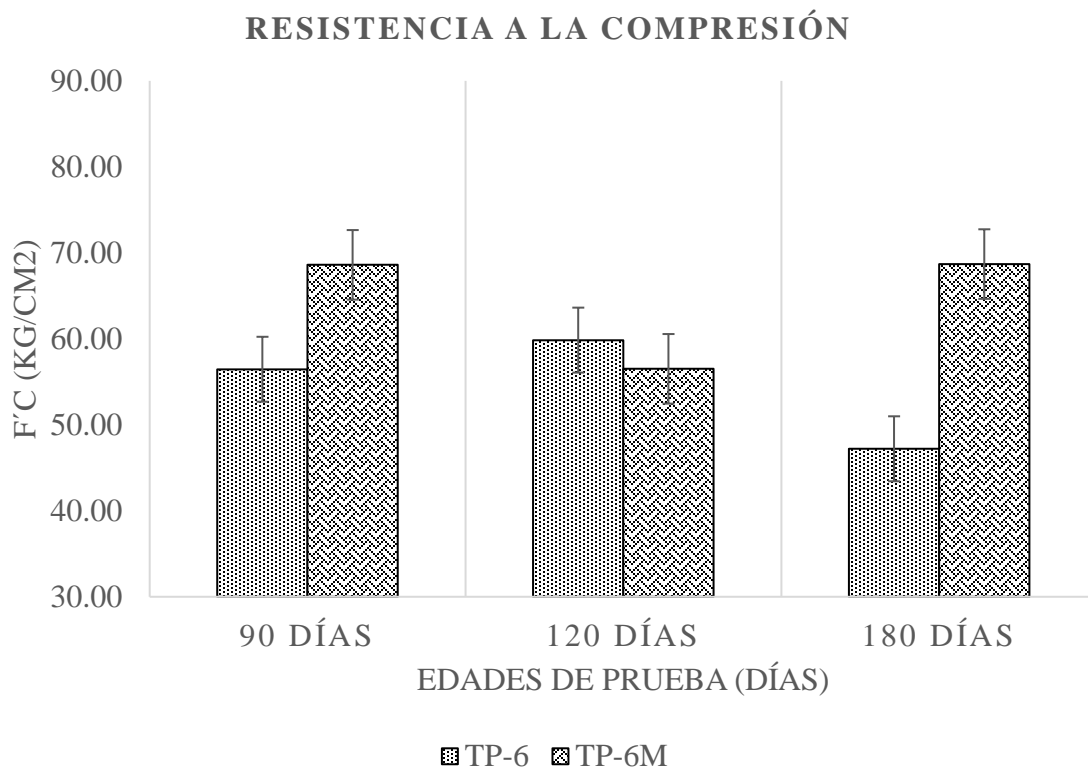


Figura 3. Resultados de la prueba de compresión realizada en la mezcla TP-6 y la TP6-M

La resistencia a compresión mínima en la mezcla TP-6 es de 56.46 kg/cm^2 a la edad de 180 días, mientras que el valor máximo de esta prueba en dicha mezcla se encuentra en la segunda edad de prueba (120 días) con una resistencia de 59.85 kg/cm^2 . Lo anterior indica que la mezcla control tiene primeramente una tendencia de crecimiento, y después una tendencia decreciente llegando a tener la menor resistencia en la última edad de prueba. La tendencia que exponen los datos de la mezcla adicionada con microfibras es contraria a la mezcla control; de la primera a la segunda edad se observa un decrecimiento, pero de la segunda a la última edad de prueba se muestra un ascenso en el valor de la resistencia. El $f'c$ mínimo para la mezcla TP6-M es de 56.51 kg/cm^2 y el valor máximo resulta de 68.69 kg/cm^2 .

Al analizar los valores de resistencia a compresión en las dos mezclas elaboradas, se confirma que la mezcla con microfibras tiene un mejor comportamiento, porque, aunque en la segunda edad de prueba su valor de resistencia es menor a la mezcla sin control, en las otras dos edades de prueba, los valores de compresión obtenidos para la mezcla TP6-M son mucho más altos que los obtenidos para la mezcla TP-6.

Por último, en la figura 4 se adjuntan los resultados obtenidos al llevar a cabo la prueba de tensión indirecta en los especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetros por 20 cm de largo. Las edades de prueba son las mismas que se presentaron para las pruebas de resistividad eléctrica y compresión: 90, 120 y 180 días.

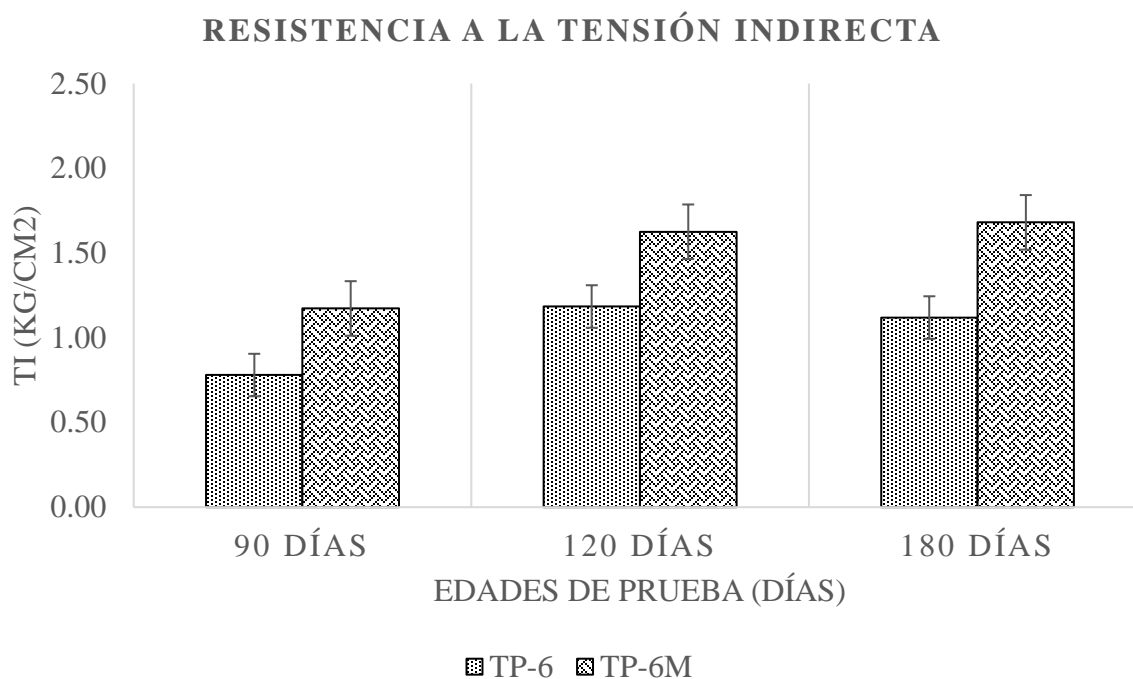


Figura 4. Resultados de la prueba de tensión indirecta realizada en la mezcla TP-6 y la TP6-M

Para la mezcla TP-6, la tendencia en los datos graficados es la misma que manifiestan los resultados de la prueba a compresión; se inicia con una tendencia ascendente y se termina con una decreciente. El valor mínimo del esfuerzo a tensión en la mezcla control es de 7.95 kg/cm^2 , mientras que el valor máximo es de 12.08 kg/cm^2 . A diferencia de las dos propiedades analizadas anteriormente, en el caso de la mezcla con microfibras, la tendencia es siempre ascendente, iniciando con una resistencia a la tensión de 11.96 kg/cm^2 a la primera edad de prueba, y terminando con 17.14 kg/cm^2 de esfuerzo a tensión indirecta a los 180 días.

Se aprecia que la mezcla con microfibras tiene un mejor comportamiento frente a esfuerzos de tensión al ser comparada con la mezcla que no tiene fibras adicionadas, porque tiene un mejor comportamiento siendo siempre ascendente conforme avanza el tiempo en los días de prueba, y a parte, en todas las edades de prueba se tiene una resistencia a la tensión indirecta mayor a la mezcla TP-6 (mezcla control).

4. CONCLUSIONES

La incorporación de microfibras sintéticas en un concreto permeable mejora su desempeño mecánico, principalmente en la prueba de tensión indirecta, donde se tuvo el mejor comportamiento para la mezcla TP6-M, ya que tuvo una tendencia completamente ascendente y en todas las edades de prueba se tiene un valor mayor de resistencia a tensión que la mezcla control.

Los datos de resistencia a la tensión indirecta obtenidos para la mezcla control (TP-6) representan el 14%, 20% y 24% de la resistencia a compresión para las edades de 90, 120 y 180 días. En la mezcla con la incorporación de microfibras estos porcentajes fueron del 17%, 29% y 25%. Lo anterior indica que la relación existente entre la resistencia a tensión contra la resistencia a compresión en un concreto permeable está comprendida dentro del rango de 15% a 30%, es decir,

la resistencia ante los esfuerzos de tensión indirecta en un concreto permeable es, aproximadamente entre un 15% a un 30% de su resistencia a la compresión.

El concreto permeable elaborada en este trabajo, uno que tiene incorporación de microfibras en su diseño, se presenta como una opción para mejorar la gestión de aguas pluviales en las ciudades. Se propone que su aplicación sea en zonas de bajo tránsito como banquetas, jardineras, zonas peatonales y estacionamiento, para aumentar las áreas de percolación en las zonas urbanas, buscando que se disminuyan los problemas de inundaciones y aumentando la recarga de los mantos acuíferos locales.

Es importante seguir ampliando los estudios sobre materiales alternativos que sean útiles y aplicables en las ciudades actuales, es decir, que puedan ayudar en la solución de los principales problemas por los que atraviesa la sociedad.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte de la UMSNH; del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) con el Proyecto Ciencia de Frontera CF-2023-G-985 y el Pronaces 321260. A la coordinación de la investigación científica de la UNSMH y el soporte técnico del personal del Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

6. REFERENCIAS

- ACI. (2002). *ACI 211.3, Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*.
- ACI. (2010). *ACI 522R. Report on Pervious Concrete*.
- Chandrappa, A. K. & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, *111*, 262–274. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.054>
- Elango, K. S., Gopi, R., Saravanakumar, R., Rajeshkumar, V., Vivek, D. & Raman, S. V. (2021). Properties of pervious concrete – A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 2422–2425. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.10.839>
- FCEA. (2017). *Agua en el planeta*. Centro Virtual de Información Del Agua. <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Giustozzi, F. (2016). Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. *Construction and Building Materials*, *111*, 502–512. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.136>
- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., Ramírez, A. I., Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H. & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *08*(3), 05–25. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>
- Hesami, S., Ahmadi, S. & Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, *53*, 680–691. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.070>
- Oni, B., Xia, J. & Liu, M. (2020). Mechanical properties of pressure moulded fibre reinforced pervious concrete pavement brick. *Case Studies in Construction Materials*, *13*, e00431. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00431>



ONNCCE. (2014). *NMX-C-083-ONNCCE-2014, Determinación de la Resistencia a la compresión.*

ONNCCE. (2019a). *NMX-C-163-ONNCCE-2019, Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto-Método de ensayo.*

ONNCCE. (2019b). *NMX-C-514-ONNCCE-2019, Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico.*

ONNCCE, O. N. de N. y C. de la C. y E. (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017, Especificaciones y métodos de ensayo para cementos hidráulicos.*

Park, S., Ju, S., Kim, H. K., Seo, Y. S. & Pyo, S. (2022). Effect of the rheological properties of fresh binder on the compressive strength of pervious concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 636–648. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.01.045>

Rangelov, M., Nassiri, S., Haselbach, L. & Englund, K. (2016). Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 875–885. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.035>



Evolución del calor de hidratación por calorimetría semi-adiabática de pastas de cemento adicionadas con biopolisacáridos

F. M. León-Martínez¹, P.F. de J. Cano-Barrita*¹, F. Castellanos¹,
E. Bautista-Hernández², J. Flores-Mendoza²
*Autor de Contacto: pcano@ipn.mx

¹ CIIDIR Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

² ITO-Tecnológico Nacional de México, Oaxaca, México.

RESUMEN

La búsqueda de aditivos químicos dirigidos al sector de los materiales de construcción basados en cemento Portland es constante debido a la importancia económica de este tipo de material en su forma de concreto, siendo este el segundo material más consumido a nivel mundial después del agua. En 2016 se estimó un consumo mundial de 557 kg de cemento per cápita. Este trabajo midió la evolución del calor de hidratación de pastas de cemento con relación a/c=0.45 por calorimetría semi-adiabática, adaptando el calorímetro descrito en la norma ASTM C-186 con celdas de cobre y agua destilada como fluido térmico. Los bioaditivos analizados fueron mucílago de cactus, alginato, éter de celulosa, así como gomas welan y xantana. El flujo de calor y el calor acumulado se calcularon con un balance de energía, y estos datos se utilizaron para estimar los tiempos de fraguado inicial y final, así como el grado de hidratación considerando las estimaciones de calor máximo generado de acuerdo con la composición química de óxidos mayores y las ecuaciones de Bogue. Los resultados mostraron curvas típicas de flujo de calor para un proceso semi-adiabático comparables con las reportadas en la literatura científica, con un efecto retardante de notable importancia presentado en muestras conteniendo mucílago en alta y baja concentración. El alginato de sodio comercial, el éter de celulosa y las gomas no presentan desfases notables respecto a la pasta control.

Palabras clave: Bioaditivo; Grado de hidratación; Reacción exotérmica; Retardante.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista del uso de materiales base cemento, ha sido un motivo de investigación cómo esos materiales anhidros entran en contacto con el agua para generar cualidades importantes para el desarrollo de la humanidad. La utilización de aditivos no es algo reciente, pues el hombre desde hace más de 2000 años ya adicionaba productos para poder mejorarlo (Lura et al., 2010). Actualmente, se sabe que los efectos de la cinética de hidratación del cemento mediante el empleo de adiciones son la disolución y nucleación heterogénea. Los aditivos orgánicos naturales se han empleado en la producción de morteros y concretos por décadas, dando como resultado cambios en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido. La evolución del calor de hidratación en pastas de cemento adicionadas con polisacáridos es un área crucial de estudio en la industria de la construcción moderna.

La incorporación de polisacáridos en materiales base cemento no solo trata de mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de éstos, sino también entender cómo estos aditivos afectan la generación de calor durante el proceso de hidratación. Los polímeros solubles en agua pueden disolverse a escalas moleculares sin surfactantes y pueden entrecruzarse con iones metálicos para formar geles. La solubilidad de estos se debe a la fuerte solvatación de grupos polares como carboxilo (-COOH), hidroxilo (-OH), éter (C-O-C), amino (-NH₂) y amida (-CONH₂) en sus estructuras moleculares. Estos grupos moleculares no solo los hacen hidrofílicos, sino que también les confieren funciones químicas y físicas de dispersión, floculación, regulación de la viscosidad, reducción de la resistencia, adhesión y formación de películas. Su función y eficacia dependen en gran medida de sus estructuras moleculares, es decir; peso molecular, tipo iónico, grupo sustituyente y estructura topológica. Los biopolímeros tienen un gran potencial en muchas aplicaciones, en especial en materiales basados en cemento, donde se emplean como agentes controladores de viscosidad, retardantes, inclusores de aire, cohesionantes, entre otras funciones. (Zonglin Xie et al., 2023)

La calorimetría semi-adiabática es una herramienta fundamental para estudiar dicho fenómeno, logrando caracterizar con precisión las reacciones de hidratación y comprender el comportamiento térmico de las pastas de cemento, particularmente cuando se introducen modificadores. De acuerdo con lo anterior, se genera un interés por conocer la evolución del calor de hidratación en pastas de cemento modificadas con polisacáridos, abordando su impacto en la formulación y comportamiento de estos materiales innovadores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

El cemento utilizado para las pastas de cemento fue CPO de la marca Holcim Apasco tipo V, cuya composición química de óxidos mayores se muestra en la Tabla 1. La densidad del cemento es de 3.201 g/cm³ (ASTM-C188), área de superficie específica permeable Blaine 4,053 cm²/g (ASTM-204), una cantidad de agua para la consistencia normal de 25.5 % base masa (ASTM C187-1) y tiempos de fraguado inicial y final de 2.5 y 3.9 h (ASTM-C191), respectivamente.

Los polisacáridos utilizados fueron mucílago de cactus extraído en nuestro laboratorio por maceración acuosa de la especie *Opuntia ficus-indica* y ultrafiltrado con malla de polisulfona con cortes moleculares de 10 y 500 kDa (OFI10 y OFI500), alginato de sodio (Central de Drogas S.A. DE C.V., México), hidroxipropil metilcelulosa (Meikai Chemical Technology Co., China), así



como gomas welan (Hainhang Industry Co., China) y xantana (Droguería Cosmopolita S.A. de C.V., México).

Tabla 1. Composición química y fases del cemento Portland Ordinario.

Óxidos mayores	% en peso
Na ₂ O	0.03
SiO ₂	20.20
Al ₂ O ₃	3.16
Fe ₂ O ₃	4.16
CaO	63.49
MgO	1.22
K ₂ O	0.31
MnO	0.25
TiO ₂	0.16
CaO libre	5.224
Pérdidas por ignición	4.1

2.2 Mezclado de las pastas de cemento

La relación agua/cemento (a/c) utilizada en las pastas de cemento fue de 0.45 en masa/masa. Los polisacáridos se utilizaron a dos niveles de concentración de cada uno de los biopolímeros en porcentajes en masa de 0.050 % y 0.35 % respecto a la masa de cemento. Para lograr una mezcla homogénea, se empleó un agitador de tipo hélice (RW20, IKA). El procedimiento de mezclado consistió en colocar el cemento en el fondo del vaso, posteriormente se agregó lentamente el agua de mezclado durante el primer minuto iniciando la velocidad de mezclado a 280 rpm, donde previamente fue dispersado el biopolímero (Figura 1). Pasado el primer minuto, la velocidad del agitador fue aumentada a 1500 rpm y mantenido el mezclado por 2 minutos. Después de este tiempo, se detuvo la agitación y el cemento pegado en las paredes del vaso fueron despegados con una espátula de goma en menos 1 minuto. Posteriormente fue reiniciado el mezclado a 1500 rpm por otros 2 minutos.



Figura 1. Proceso de mezclado de pasta de cemento

2.3 Calorimetría semi-adiabática

Se adaptó un calorímetro semi-adiabático basado en el calorímetro de Joule descrito en la norma ASTM-C186 para determinación del calor de hidratación de cemento. Esta modificación consistió en elaborar celdas de cobre tipo M ($\varnothing = 19$ mm, $h = 180$ mm) para contener la pasta de cemento, así como el uso de 800 g de agua destilada como fluido térmico con un valor de $C_p = 4.186$ J/g \cdot °C a 25 °C (Cengel, Y. A. 2007).

La medición de la temperatura de hidratación de la pasta de cemento se midió indirectamente en el seno del agua mediante un termopar tipo Pt100-CTH65 (Dostmann Electronic GmbH, Wetheim, Alemania) y un termómetro digital P795 (Dostmann Electronic GmbH, Wetheim, Alemania) con precisión de 1 milésima de grado Celsius. La evolución de la temperatura del agua fue monitorizada cada 60 s, por al menos 48 h después de introducir las celdas de cobre dentro del calorímetro. La temperatura externa del ambiente que rodeaba al calorímetro fue controlada por un sistema de aire acondicionado a 25 ± 0.5 °C.

La pérdida global del calorímetro fue estimada mediante un experimento donde el tubo de cobre limpio fue llenado con 100 g de agua destilada y calentado hasta los 60 °C, para posteriormente ser colocado dentro del Dewar que previamente tenía en su interior agua destilada a 25 °C. Se cerró y preparó el calorímetro con el tapón aislante, el termopar y el agitador mecánico; posteriormente se encendió el agitador mecánico. Se registró el cambio de temperatura del agua en el calorímetro con agitación a 317 rpm con un intervalo de tiempo entre mediciones de 60 s, durante 24 h.

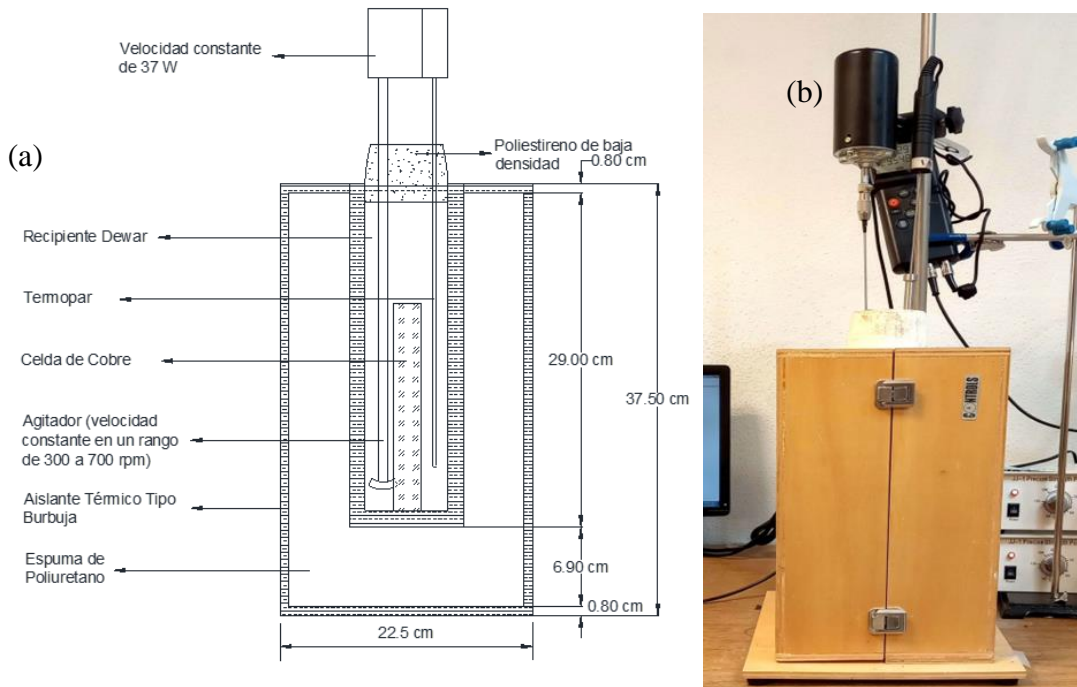


Figura 2. Dimensionamiento del calorímetro (a), y Calorímetro adaptado (b).

Se observó la evolución de la temperatura y con base en la norma ASTM-C186 se calculó la temperatura de equilibrio que se alcanzó en el agua destilada del Dewar después de llegar al equilibrio con el tubo caliente, para ello se consideró las temperaturas a 20 y 40 minutos. Una vez conocida la temperatura de equilibrio fue posible saber el tiempo al cuál se alcanzó esta temperatura, y a partir de este tiempo se consideró que el calorímetro empieza a transferir calor a sus alrededores (pérdidas globales). Se utilizaron los datos de temperatura desde este punto hasta las 24 h y se aplicó una regresión lineal al flujo de calor respecto al cambio de temperatura para calcular el coeficiente de pérdidas de calor por unidad de tiempo y temperatura, siendo el coeficiente de pérdidas de $0.0161 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$. Este factor se usó como factor de corrección en los datos experimentales obtenidos en las pastas de cemento.

La Figura 2a muestra las dimensiones con las que se construyó el calorímetro, todas las medidas fueron tomadas con base en la norma ASTM- C186, obteniendo como resultado la Figura 2b.

Hidratación de las pastas de cemento. Se realizó un seguimiento del calor de hidratación generado por las pastas de cemento en el calorímetro semi-adiabático, donde las pastas fueron introducidas en las celdas de cobre mientras que las lecturas que se registraron durante la prueba fue el incremento de temperatura que alcanzó el fluido térmico.

Calor máximo generado. Las fases del cemento obtenidas con las ecuaciones de Bogue se proporcionan en la Tabla 2. Con estos datos y conociendo el calor de hidratación de las fases del cemento (ΔH) que se presentan en la Tabla 3 tomadas de Kurdowski (Kurdowski, W. 2014), se determinó el calor máximo generado de acuerdo con las ecuaciones (1)-(3).

$$H_{fases} = C_3S \cdot \Delta H_{C_3S} + C_2S \cdot \Delta H_{C_2S} + C_3A \cdot \Delta H_{C_3A} + C_4AF \cdot \Delta H_{C_4AF} \quad (1)$$

$$H_{\text{óxidos}} = SO_3 \cdot \Delta H_{SO_3} + CaO_{\text{libre}} \cdot \Delta H_{CaO_{\text{libre}}} + MgO \cdot \Delta H_{MgO} \quad (2)$$

$$H_{\text{cemento}} = \frac{H_{\text{fases}} + H_{\text{óxidos}}}{100 \text{ g}} \quad (3)$$

Tabla 2. Composición de las fases de Bogue

Composición potencial de Bogue	%
C ₃ S	56.453
C ₂ S	15.337
C ₃ A	1.337
C ₄ AF	12.66

Tabla 3. Calor de hidratación de las fases del cemento

Fases	Calor (J/g)
C ₃ S	502
C ₂ S	260
C ₃ A	867
C ₄ AF	420
CaO	1168
MgO	850
CaSO ₄ · 0.5H ₂ O	193
CaSO ₄ soluble	142
C ₃ A · CS · 31H ₂ O	624
C ₃ A · CS · 12H ₂ O	783

Dando como resultado un calor de hidratación de $459.416 \frac{J}{g}$ cuando el cemento obtiene una hidratación total teórica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Curvas típicas de flujo de calor y calor acumulado

Los resultados del calor de hidratación de las distintas pastas se muestran en las Figuras 3 y 4. Según Peschard et al (2024), al estudiar por calorimetría isotérmica, termogravimetría y espectroscopia infrarroja el proceso de hidratación de pastas de cemento con polisacáridos, obtuvo que el retardo de la hidratación depende del incremento de las relaciones polisacárido/cemento en masa. Dicho comportamiento se puede observar en los flujos de calor de las muestras con mucílago de cactus OFI10 y OFI500, en la cuales la adición del 0.05 % presenta un desfase notable con respecto a la pasta sin aditivos. Sin embargo, las pastas con 0.35 % presentan un desfase mucho mayor en las curvas de flujo de calor. Según Chandra et al., (1998) este efecto se debe a la presencia



de azúcares en el mucílago de cactus.

Zonglin Xie et al. (2023), hicieron una revisión de polímeros solubles en agua en un rango de 0-1% y mostraron que no ejercían cambios en el perfil típico de la hidratación. Sin embargo, el flujo de calor y la liberación de calor acumulado de los materiales a base de cemento disminuyó. La curva de la pasta de cemento con HPMC que se visualiza en la Figura 3a siendo la concentración baja y la Figura 4a que corresponde a la concentración alta tienden a tener una liberación de calor menor con respecto a la pasta control (sin aditivo). Este polisacárido no es el único que posee este comportamiento, sino también las pastas con adición de gomas xantana y welan.

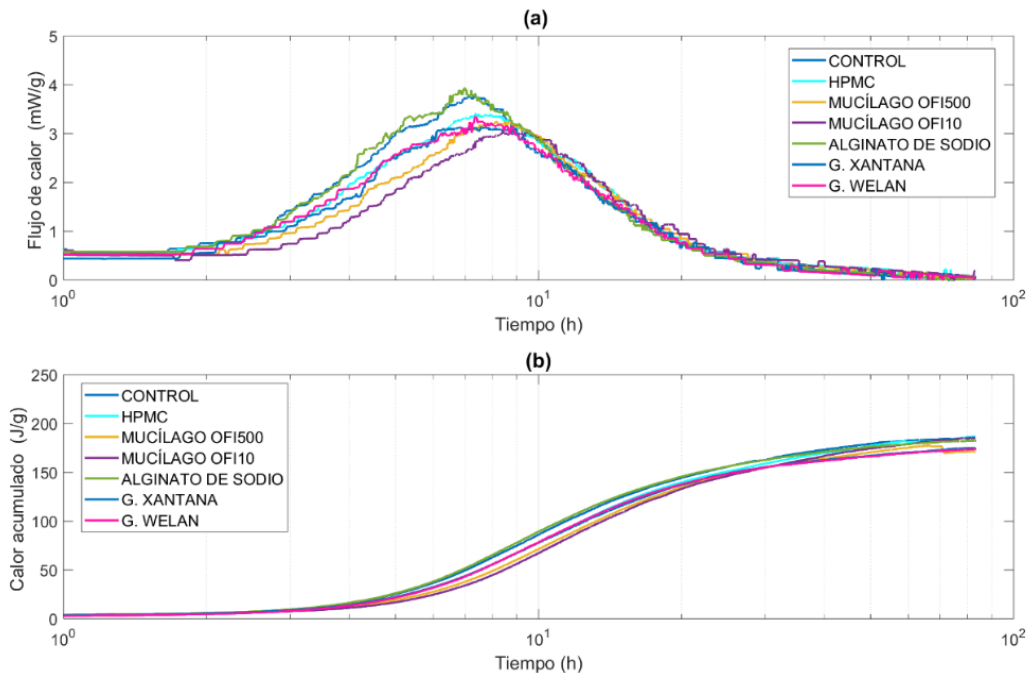


Figura 3. Curvas de calor acumulado (a) y flujo de calor (b) de pastas de cemento con polisacáridos al 0.050%.

Los resultados que obtuvo Alexander Engbert et al. (2020) mediante calorimetría (flujo de calor) con la adición de 0.1% en peso de alginatos de sodio redujo el tiempo de hidratación hasta la liberación máxima de calor. Este comportamiento se visualiza en la curva de flujo de calor de pasta de cemento con alginato de sodio al 0.05% el cual tiene un ligero desfase en el flujo de calor, lo que sugiere que el período de inactividad se reduce significativamente.

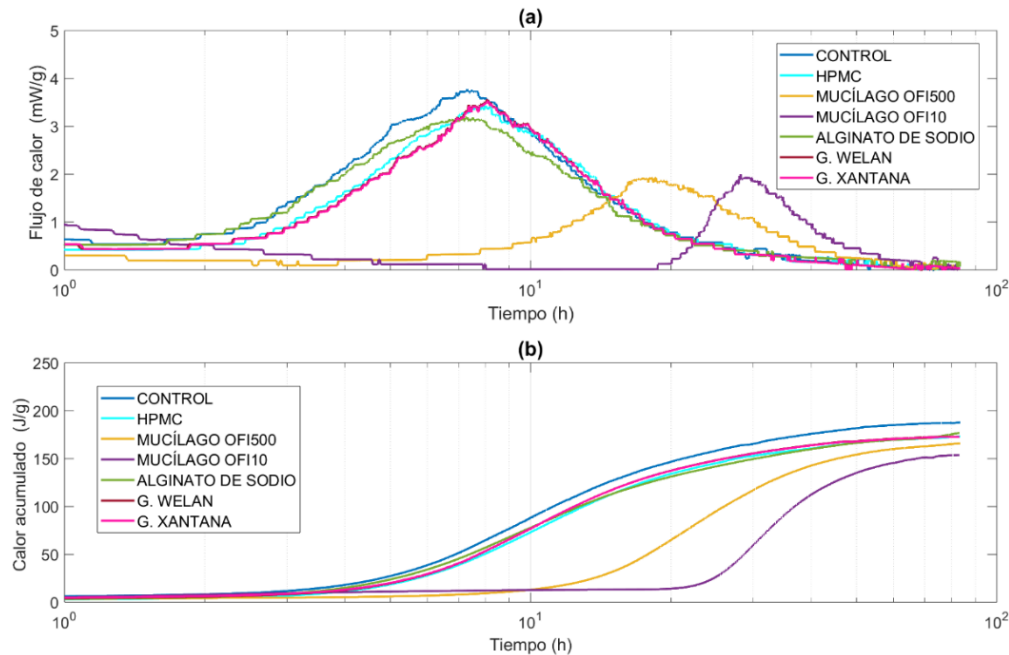


Figura 4. Curvas de calor acumulado (a) y flujo de calor (b) de pastas de cemento con polisacáridos al 0.35%.

3.2 Tiempos de fraguado

Los tiempos de fraguado representados en las Figuras 5 y 6 se obtuvieron de acuerdo con lo sugerido en la norma ASTM-C1753. Durante la prueba, se registró el aumento máximo de temperatura, a partir del cual se determinó el tiempo inicial de fraguado, correspondiente al 20% del valor total. Para el tiempo de fraguado final, se consideró el 50% de dicho valor.

El tiempo de fraguado está directamente relacionado con la evolución de la hidratación de las pastas de cemento y con la relación agua/cemento (a/c), por ello, las pastas con MK04P, y gomas welan y xantana no muestran un cambio notable en los tiempos de fraguado con respecto a la pasta control. Asimismo, en la Figura 4 se visualiza que el tiempo de fraguado de la pasta con alginato de sodio a baja concentración produjo una disminución apenas observable con respecto a la pasta control.

Ramírez-Arellanes et al. (2012) elaboraron pastas de cemento con relación a/c de 0.45 con la adición de mucílago de cactus y obtuvieron incrementos en los tiempos inicial y final de fraguado con respecto a la pasta control. Dicho efecto se observa en el desarrollo del flujo de calor de las pastas con mucílago OFI10 y OFI500 a concentración alta. Estos datos obtenidos concuerdan con lo mencionado por Chandra et al. (1998), quienes observaron que la incorporación de mucílago de nopal en morteros y concreto hidráulico incrementa los tiempos de fraguado.

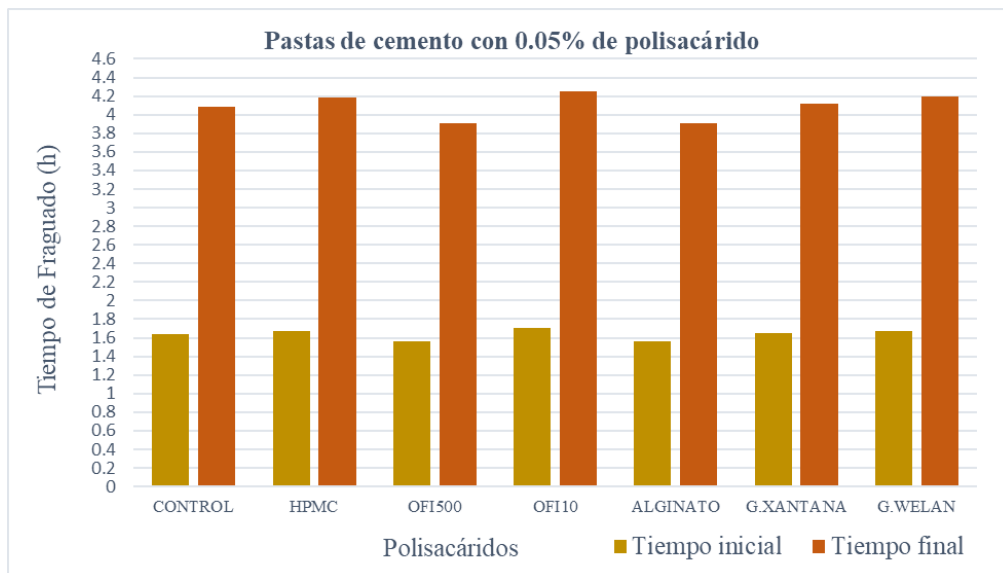


Figura 5. Tiempos de fraguado de pastas de cemento con concentración de polisacáridos del 0.05%

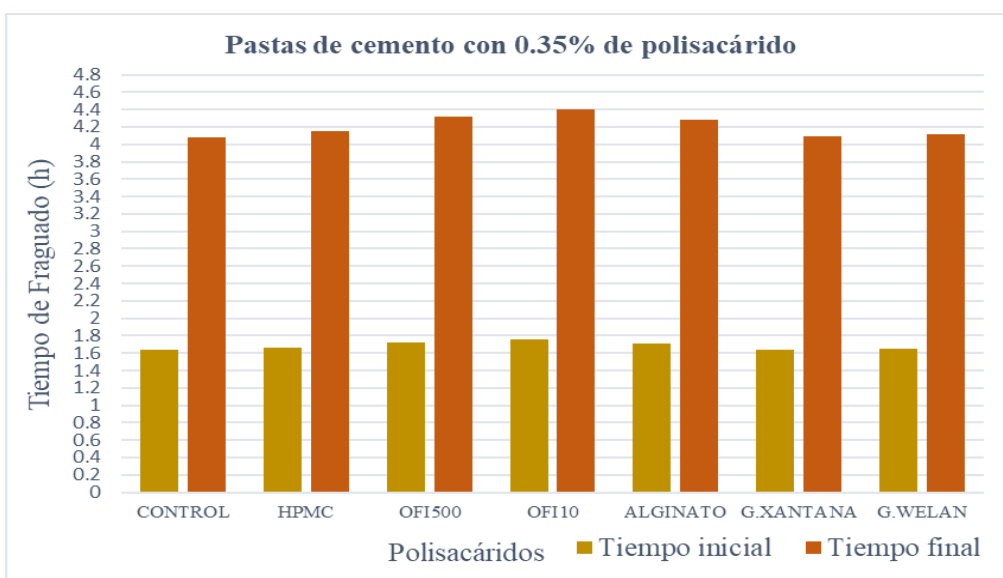


Figura 6. Tiempos de fraguado de pastas de cemento con concentración de polisacáridos del 0.35%

4. CONCLUSIONES

El estudio se basó en los efectos que genera la adición de polisacáridos sobre el calor de hidratación y los tiempos de fraguado de las pastas de cemento. Las conclusiones a las que se llegaron se muestran a continuación:

- El porcentaje de adición de polisacáridos ejerce una influencia directa en los resultados. En particular, se observó que, al incrementar el porcentaje de aditivo en las pastas de cemento, la generación de calor muestra cambios sustanciales.
- La adición de ciertos polisacáridos en concentraciones altas modifica notablemente el tiempo inicial y final de fraguado. Este retardo fue evidente para el mucílago de *Opuntia*

ficus-indica.

- La capacidad de los polisacáridos para actuar como retardantes o acelerantes del tiempo de fraguado ofrece una versatilidad valiosa, permitiendo adaptar las propiedades de las pastas de cemento según las necesidades específicas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional y a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN por el apoyo económico a los proyectos de investigación con número de registro 202402475 y 20230203. Jaquelinne Flores Mendoza agradece el apoyo del H. Gobierno del Estado de Oaxaca por el apoyo mediante el programa Mi Primera Chamba 2024.

6. REFERENCIAS

- Alexander Engbert, Stefanie Gruber, & Johann Plank. (2020). The effect of alginates on the hydration of calcium aluminate cement. 20 Febrero 2020, 236, 9 pp.
- ASTM-C186. Heat of Hydration of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA (2014), 7 pp.
- ASTM-C187. Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, ASTM International, West Conshohocken, PA (2011), 3 pp.
- ASTM-C188. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA (2009), 3 pp.
- ASTM-C191. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013), 8 pp.
- ASTM-C1753. Standard Practice for Evaluating Early Hydration of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Thermal Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA (2021), 19 pp.
- Chandra, S., Eklund, L., & Villarreal, R. R. (1998). Use of Cactus in Mortars and Concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(1), 41-51. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00254-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00254-8)
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Tercera Ed). McGraw-Hill.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Lura, P., Winnefeld, F., & Klemm, S. (2010). Simultaneous measurements of heat of hydration and chemical shrinkage on hardening cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 101(3), 925-932. <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0586-2>
- Peschard, A., Govin, A., Grosseau, P., Guilhot, B., & Guyonnet, R. (2004). Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2153-2158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.001>
- Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. F. D. J., Julián-Caballero, F., & Gómez-Yañez, C. (2012). Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. *Materiales de Construcción*, 62(307), 327-341. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.00211>
- Zonglin Xie, Hao Yao, Qiang Yuan, & Fuwen Zhong. (2023). The roles of water-soluble polymers in cement-based materials: A systematic review. 9 Mayo.





Mezcla asfáltica con adición de material reciclado, PET y caucho, para aumento de resistencia por fatiga

S. H. Silva Torres ^{1*}, H. L. Chávez García², W. Martínez Molina², E. M. Alonso Guzmán²,
M. A. Mondragón Ornelas³, J. A. Rodríguez Castro², F. A. Hernández Ferreyra¹

*Autor de Contacto Silva Torres: 0520521x@umich.mx

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

RESUMEN

El principal objetivo de la investigación es tener un aumento en la resistencia a la fatiga por el Método Marshall, en mezclas asfálticas en caliente, con la adición de material reciclado, en este caso fibras de PET y polvo de caucho, se realizó la caracterización de materiales pétreos y asfalto en laboratorio, material obtenido de dos bancos con nombre comercial: Joyitas y Tres Marías, de la ciudad de Morelia, Michoacán, se generó el corte manual de las fibras de PET de 2.5 cm x 2 mm, con botellas PET transparente, se efectúa con la adición de 1-4% respectivamente, el caucho se adiciona en polvo retenido en la malla 60, dicho método para consolidar un diseño apegado a norma N-CMT-4-05-003/16. Teniendo un resultado óptimo con el 1% de caucho y el 2% de PET, arrojando un flujo de 3.2 mm, una estabilidad de 537.9 kg y por último un 3.64 % de vacíos, teniendo un incremento en la resistencia por fatiga, tomando en cuenta las limitaciones de dicha investigación fueron el escaso tiempo, las temperaturas altas, se sigue trabajando para tener mejoras en el diseño, cabe destacar que los beneficios de la adición de materiales reciclados nos reducen un costo de producción y genera un bienestar para el medio ambiente.

Palabras clave: Palabra Asfalto adicionado; Fibras de PET; Caucho; Fatiga; Resistencia.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día podemos darnos a la tarea de dar mejoras a las edificaciones con el aporte de materiales nuevos e innovadores, así como la implementación de material reciclado, en un porcentaje que no altere más allá de lo necesario nuestras mezclas, es necesario considerar la investigación previa de los científicos, así como de los trabajadores de la ciencia, así como el campo de la ingeniería ambiental que hoy en día es de suma importancia, tomando en cuenta los niveles de calor que generan estos al realizar las obras de construcción y mitigar el impacto ambiental que conlleva cada una de las obras realizadas en la zona urbana.

Podemos decir que nuestra problemática a diario son el consumo excesivo de polietileno (comúnmente conocido como PET), ya que tenemos un consumo anual que se calcula que cada habitante desecha ocho kg aproximadamente, lo que significa que tira 195 botellas, un incremento del 10% a nivel nacional en la producción, consumo y recolección de pet (González, 2011) esto a sido en aumento por su practicidad y acceso rápido a ellos, ya que es un producto que se maneja con distintas marcas y denominaciones de cantidad de líquido, algunas de sus empresas productoras recaudan anualmente los productos, más sin embargo estos aun no llegan al 100% de su producción para el reciclaje.

Aunado a ello en cuanto a la manufactura de neumáticos, en México se tienen 8 plantas de fabricación y 3 centros de distribución, el consumo de los neumáticos en México es alrededor de 4-6 por persona (con vehículo), en empresas por cada camión, tracto camión, Autobús, se genera 10 neumáticos anuales. (De Diputados et al., n.d.)actualmente ECOCE es una de las recicladoras de PET con mayor fluencia en el mercado, recauda alrededor del 70% de estos productos en sus 32 plantas y produce una disminución del impacto ambiental al reciclar los embaces y enviarlos de vuelta al mercado.

Previamente se consideran los parámetros de artículos e investigaciones realizadas en el tema de las mezclas asfálticas donde estos son sustituidos por los materiales reciclados, en un porcentaje del 1-10 de los pétreos, inicialmente se presenta la sustitución en las arenas, por sus cualidades de material en grano, grumo y polvo que pueden cubrir las mallas 10-200.

El enfoque adoptado para esta investigación es la adición del material en conjunto con los pétreos, considerando su manejo de manera propia, ya que ambos son inflamables, se consideraron medidas de seguridad como son indicadas en laboratorio.

2. ANTECEDENTES

En los estudios realizados por Friki, se observa que dichos autores adicionan el PET en diferentes porcentajes de 0%, 3%, 6%, 9% y 12% pero mezclados con el asfalto. Se incrementó en un 33% el valor de la estabilidad en el asfalto modificado con PET al 9% en comparación al asfalto sin ninguna adición, en el flujo todos los asfaltos con adiciones sufrieron mejoras en relación con el asfalto sin ninguna adición, pero llegando casi al límite permitido. Para la evaluación se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de PET agregado a la mezcla asfáltica, todas con la misma cantidad optima de asfalto para que las condiciones de los materiales se mantengan homogéneas en todas las mezclas (Friki et al., 2020).

Como siguiente antecedente en la investigación realizada por Movilla-Quesada. Los autores empezaron realizando un análisis granulométrico a los agregados que serán utilizados dentro de la mezcla, para luego proceder a usar el tereftalato de polietileno como aditivo dentro del ligante

asfáltico, este será incorporado dentro de la mezcla en partículas como máximo de 2.36mm. Se incorporó el PET en diferentes porcentajes de 6%, 10%, 14%, 18% y 22% pero todos con los componentes similares. Con la adición de los polímeros a la mezcla se ve una pérdida en la estabilidad, el flujo de esta aumenta, pero se debe tener cuidado ya que el flujo excesivo es perjudicial desempeño del pavimento. Se determinó que con la incorporación de los aditivos plásticos se produjo una mezcla más flexible que a bajas temperaturas aumentan su rigidez haciéndolo susceptible al agrietamiento (Movilla-Quesada et al., 2019).

En las investigaciones realizadas por Choudkary se tuvo como objetivo evaluar el efecto del proceso de adición PET, tamaño y el contenido de PET sobre las propiedades de las mezclas asfálticas modificadas. Uno de los parámetros más importantes que influyen dentro de la mezcla de asfalto es el tamaño del PET, ya que por la trituración de botellas suele tener una forma escamosa, la cual no se recomienda para reemplazar los agregados de la mezcla, se tuvo que triturar en tamaños más pequeños, los cuales fueron pasados por diferentes tamices para que queden partículas homogéneas (Choudkary, 2018).

El presente análisis a partir de una visión medioambiental los procesos que conducen a la conversión de residuos plásticos en gránulos de plástico reciclado para su uso como aditivo o como reemplazo de añadido natural en la producción de mezclas asfálticas. Los datos de las instalaciones de reciclaje en Victoria, Australia, se recopilaron y usaron como base para un análisis de evaluación comparativa del periodo de vida (LCA). Los estudios se han realizado tomando en cuenta algunas proporciones de reemplazo de material virgen por su contraparte reciclada en el denominado procedimiento húmedo y seco. Se evaluó un análisis de caso que estima la producción de asfalto de plástico reciclado para ser aplicado en la obra de una capa superficial clásica de una carretera, los resultados presentan que el reciclaje de plásticos como polímero para el asfalto modificado y como reemplazo de añadido sintético en mezclas de asfalto tiene el potencial de ser ambientalmente ventajoso. Además, la utilización de plástico en mezcla húmeda tiene mejores propiedades en comparación del uso de plástico en mezcla seca (Santos, 2021).

El artículo nos indica el proceso y las mejoras que se encontraron utilizando Pet, han encontrado que la utilización eficaz del plástico en el betún optimiza sus características originales. El plástico que se añade de 2 modalidades primero es el proceso en seco y otro es el proceso húmedo (Ponnada & Vamsi, 2020). La mayoría de la averiguación se hizo en proceso seco. Al llegar al proceso húmedo, ciertos trabajos de indagación continuaron añadiendo bolsas de plástico de desecho al betún y resultaron satisfactorios. El presente análisis fue en añadir las botellas de agua de plástico de desecho trituradas al betún para mejorar sus características reológicas. En el presente análisis, el plástico se calienta hasta su punto de fusión, después se añade betún al plástico líquido y se mezcla enteramente gracias a un agitador mecánico. En el material compuesto preparado se han realizado pruebas de laboratorio como punto de ablandamiento, ductilidad, recuperación flexible, penetración, gravedad específica, destello y punto de incendio. Luego, se hace la prueba de seguridad Marshall en las mismas muestras con plástico para finalizar el porcentaje de plástico que se añadirá. Al final, comparación elaborada entre la muestra modificada con plástico con la muestra original. El análisis concluyó que la sustitución del asfalto con un 5% y un 7.5% de plástico Pet optimizaron las características reológicas de la mezcla. Desarrollando el ensayo Marshall se obtuvo que la cantidad de 7.5 % es la cantidad óptima para trabajar en pavimentos flexibles.

3. OBJETIVO

Determinar el comportamiento del concreto asfáltico en su estado endurecido utilizando fibras de PET y polvo de caucho en distintas proporciones como adición, partiendo del uno por ciento.

3.1 Objetivos específicos

Para la investigación de este trabajo estaremos tomando en cuenta los objetivos de manera específica para llegar a resultados más concretos y óptimos dentro del tiempo de investigación, análisis y pruebas, siendo estos los siguientes:

- Diseñar una mezcla de concreto asfáltico, la cual servirá como forma de comparación para los concretos donde se emplee agregado de PET y caucho en sustitución parcial de agregado.
- Revisar los porcentajes óptimos a usar del agregado de concreto asfáltico para una resistencia baja a media y tener la información de características mecánicas del concreto asfáltico.
- Diseñar mezclas de concreto asfáltico, considerando la combinación de grava, arena, PET y caucho en distintas proporciones; manteniendo fijo el tipo de cemento, cantidad de cemento, relación agua/cemento asfáltico y el agregado grueso o fino, según sea el caso.
- Analizar las mezclas asfálticas modificadas con PET y caucho.

4. METODOLOGÍA

El desempeño fue analizado mediante sus propiedades físico-mecánicas, principalmente con el método de ensayos, de durabilidad, tiempo de vida útil, resistencia, ductilidad, dichos datos se utilizaron para la comparación de los ensayos.

La ponderación de cada uno de estos aspectos se realizó conforme a las especificaciones de las normativas correspondientes. La valorización del concreto asfáltico modificado con los criterios de evaluación propuesta su desempeño en los tres aspectos antes mencionados iguala o supera al concreto convencional. Por tal razón, el objetivo principal de estudio de esta investigación estará ligado a la determinación de la cantidad de fibras de PET y el polvo de caucho que puede adicionar la mezcla, definiendo así, el comportamiento en estado endurecido con los especímenes.

Se utilizó el Método Marshall: Método de diseño de mezclas asfálticas desarrollado durante la segunda guerra mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los ensayos compactados, de dichos resultados se concluye si la resistencia a la fatiga es aceptable o no bajo los parámetros de norma. Efectuándose 164 ensayos de los cuales 27 fueron convencionales, se realizó el barrido de 4-6.5% donde se diseñó la mezcla convencional que fue utilizada para la comparación con los ensayos que se adicionan el PET y el polvo de caucho, se concluyó a que el mejor resultado fue 5.5, para ello se realizaron 18 ensayos con una variación del 0.5% de asfalto iniciando en 4% para tres especímenes, posterior a ello se planteó el análisis con 5.5, 5.75 y 6% de asfalto para verificar su comportamiento, ya que fueron los de mejor resultado y para ello se empleó en tres especímenes por cada 0.25% de asfalto agregado a la mezcla, siendo estos los que se utilizaron para la investigación ya que fueron los de mejor respuesta, a todos ellos se les realiza



caracterización, pruebas no destructivas: volumetría, caracterización de materiales, algunos se sometieron a la prueba de velocidad de pulso, antes de su utilización en el método Marshall.

Para la obtención del material PET se clasificaron las botellas de un litro de leche LALA de polietileno, se juntó la cantidad de 7.5 kg de ellas, donde se lavaron con agua y jabón, dejándose secar por 24 horas al aire libre, se cortaron en tiras de 2 mm y se ranuraron con ayuda de lijas del número 200, posterior a ello se seccionaron dichas tiras en secciones de 2.5 cm, dichas medidas son consideradas ya que en la literatura de antecedentes se verifica que utilizaron 10cm y 5 cm basándonos en las medidas de los moldes para los ensayos de una dimensión de 10.2 cm por lo que se consideró $\frac{1}{4}$ para la sección de las fibras, respecto al polvo de caucho se compró a una recicladora en la ciudad de Morelia, donde se pide por medidas o kilos, de los cuales se obtuvo en polvo y se cribó por las mallas teniendo el material retenido en la malla 60 de la cual se consideró porque la granulometría de los pétreos es donde tenemos muy justo a la norma con el límite inferior y para ello se complementa con el polvo de caucho siendo una mejora.

Tenemos finalmente las gráficas y se consideran los parámetros de la norma N-CMT-4-05-003/16 para granulometría densa. Ya que nuestro material esta con $\frac{3}{8}$ “de agregado grueso. Considerando graba, sello y arena para su caracterización, materiales que fueron obtenidos de los bancos de Materiales TRES MARIAS y JOYITAS, de la ciudad de Morelia, Michoacán, el asfalto es de Grado GP 64-22, donado por la empresa Mega asfaltos de Salamanca.

Se considera por el método Marshall que al menos se deben de realizar tres ensayos por cada porcentaje de asfalto para poder tener un rango de comparación, la cantidad de ensayos realizados son la suma de los convencionales, los de adición de PET y por ultimo los de adición de polvo de caucho. Por lo que no se requiere un método estadístico para evaluar el comportamiento de los ensayos, si no que se utilizan los parámetros de la normativa.

5. RESULTADOS

De los 168 especímenes efectuados en esta investigación, 27 de ellos fueron convencionales con un mínimo de asfalto para su barrido de 4%, de este se considera tres especímenes de cada uno para su comparación y es a cada 0.5 % hasta llegar a 6.5% de contenido de asfalto, de estos 27 solo 9 se seccionaron a cada 0.25% de asfalto iniciando con 5.5%, 5.75% y 6%, en secciones de 2.5 cm x 2 mm se consideran las fibras de PET con ralladuras de lija del número 200 para madera, esto con el beneficio de generar una rugosidad en las fibras y tener una mayor adherencia del asfalto en las partículas, se toman los porcentajes de PET para un sistema de 45 especímenes aceptables con cantidades del 1 – 4 % respecto al peso de la muestra convencional de los 940 gr, para cada uno de los porcentajes se realizaron 9 ensayos de los cuales se muestran los resultados en la parte de la Tabla # 1.

Tabla 1. Comparación de flujo para mezcla convencional vs PET y caucho

% asfalto	TABLA DE FLUJOS						
	1%	2%	3%	4%	convencional	Límite superior	Límite inferior
5.5	3.44	3.03	3.48	3.03	2.63	4.00	2.00
5.75	4.01	3.14	4.29	2.91	3.05	4.00	2.00
6	3.40	3.44	4.45	2.48	2.53	4.00	2.00



Tenemos como resultado para el 2 % de las fibras de PET un flujo con 3.14 milímetros, en un 5.75% de asfalto por prueba, teniendo la mejor respuesta a la prueba Marshall, se verifico dos veces el barrido para concluir, dichos resultados que se muestra en la tabla 1. Respecto a los especímenes realizados con el polvo de caucho se considera el barrido del 1-4 % teniendo un total de 52 especímenes de los cuales solo se consideran 45 ya que algunos de ellos no logran cubrir las características para su uso en el proceso Marshall y se disgregan por falla, en el proceso de la prueba, de igual manera fueron descartados con el 5% de caucho ya que la mezcla al ser compactada en maquina su textura era muy suave y esto causo que su reacción fuera fracturada, sin considerarse que al ser sometidos a baño maría estos tienden a ser de mayor absorción con el agua caliente y conlleva a una falla más rápida en la prueba.

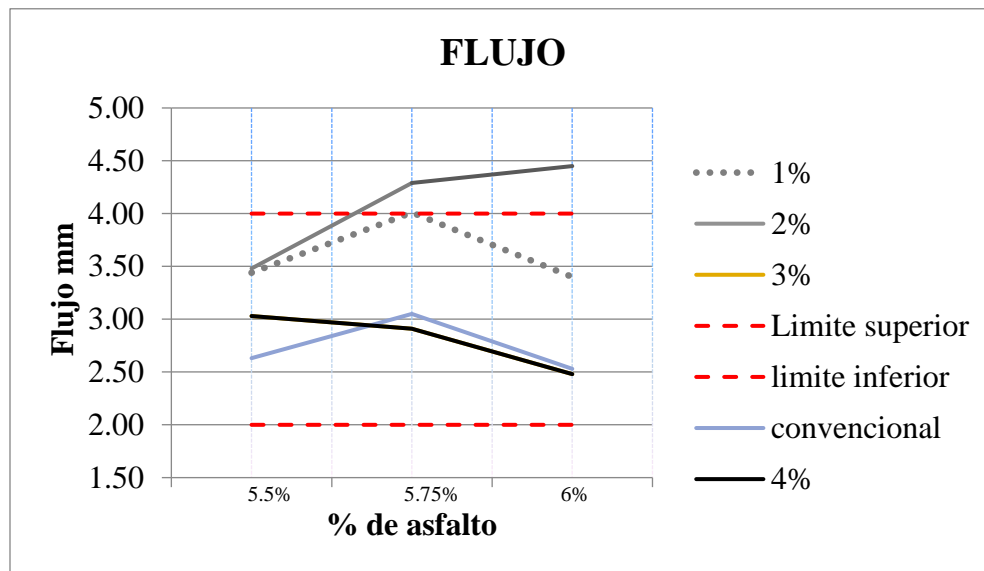


Figura 1. Gráfico del flujo convencional, con adición en mezcla caliente de PET y polvo de caucho, para el flujo.

Como se observa en la Figura 1 tenemos que el 2% es el que mejor interactúa ya que va de manera creciente y es más estable, comparado con el convencional ya que este va de manera creciente también pero sale de los límites, el 4% siendo un múltiplo del anterior nos da un resultado declinado, por lo que se puede interpretar que la adición de los residuos del polvo de caucho y las fibras de PET mejoran la resistencia y dan una mejora a las propiedades mecánicas de la mezcla en caliente.

Tabla 2. Comparación del porcentaje de vacíos para mezcla convencional en caliente vs PET y polvo de caucho

% asfalto	% de vacíos					límite inferior	límite superior
	1%	2%	3%	4%	convencional		
5.5	7.64	2.84	6.55	12.85	3.34	3.00	5.00
5.75	6.56	3.37	7.51	12.37	5.39	3.00	5.00
6	6.10	3.86	7.38	11.13	3.17	3.00	5.00

En la tabla 2 podemos observar la manera en que juegan los niveles del porcentaje de vacíos en su mayoría son excedentes del valor que se refiere a la Norma N-CTM-4-05-003/16 ya que estos son descartados y se consideró el de mejor porcentaje nuevamente el 5.75 % de asfalto para el 2% de material reciclado, se empleó la aplicación de pruebas no destructivas antes de realizar el método Marshall a todos los especímenes, en la parte de abajo en la Figura 2 se muestra el comportamiento de cada uno de los barridos que se realizó para someterlos a la prueba Marshall.

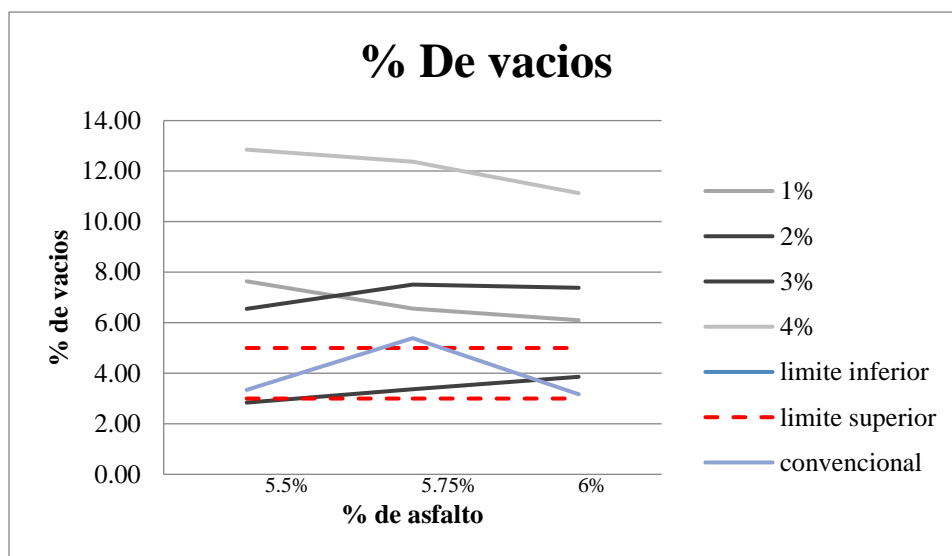


Figura 2. Gráfico del porcentaje de vacíos en la mezcla convencional, con adición en mezcla caliente de fibras de PET y polvo de caucho, para el flujo.

Tenemos en consideración el asfalto de grado PG 64-22 y en relación con los agregados este nos dio dentro de norma, se adicione el material de las fibras de PET y el polvo de caucho a la mezcla y nos arroja un aumento de resistencia por fatiga, demostrando que el uso de dichos materiales en la mezcla es de beneficio para la misma, se presentan las conclusiones.

6. CONCLUSIONES

- Se establece las condiciones y uso de PET para manejo fácil en fibras de 2 mm, así como del caucho en polvo en la mezcla asfáltica en caliente, para un flujo vehicular de un millón de ejes equivalentes, con granulometría densa.
- Los mejores resultados en mezcla convencional son de 5.5 – 5.75 % de asfalto, de dicho porcentaje se realizaron corridas del 1 – 4% de fibras de PET, teniendo el nivel de estabilidad para el 1% con valor promedio de 473 kg, el 2% para el flujo con valor de 3.2, en vacíos para el 2% con un valor de 3.64.
- Respecto a los resultados de la mezcla con adición de caucho son de 5.5 – 5.75 % de asfalto, con corridas del 1 – 4% adicionado de polvo de caucho que se retiene en la malla número 100, teniendo una estabilidad para el 3 % con valor de 537.92 kg, con un 2 % para el flujo con un valor de 3.42, por último, en porcentaje de vacíos el 7.21 con el 3% de caucho.

- Se genera una mejora en la mezcla para un equivalente menor a un millón de ejes, por lo que respecta es buena la adición de la mezcla y se proporciona en el 1% de polvo de caucho y el 2% de fibras de PET, cubriendo con los parámetros de la Norma se indica una mejora favorable para dicho ensaye.

7. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de mis asesores, co-asesora y colegas, que formaron parte de mi equipo de trabajo. Por esto agradezco a la facultad de Ingeniería Civil que me brindo su apoyo, al Laboratorio de Materiales Ing. Luis Ronaldo Silva por permitirme efectuar las pruebas y poner a personal capacitado para recurrir a él en ciertos momentos de mi investigación, a la Maestría de Ingeniería Ambiental y sobre todo a CONACYT por brindarme el conocimiento en conjunto de los maestros en aula, a los compañeros del servicio social que me ayudaron arduamente.

8. REFERENCIAS

González, L. (2011). Deja 3,000 mdd anuales la industria del reciclado del pet. El Economista. Recuperado el 1 de abril de 2017, de: <http://eleconomista.com.mx/industrias/2011/04/19/deja-3000-mdd-anuales-industriareciclado-pet>

Abu, A., Ahmad, M., & Jung, S. (2019). Investigación de pavimentos flexibles de refuerzo con fibras plásticas de desecho en Ras Al Khaimah, Emiratos Árabes Unidos. Taylor&Francis.

SCT N-CMT-4-04/08 2008. (s.f.). Obtenido de de Normativa para la Infraestructura del Transporte: Materiales Pétreos para Mezclas Asfáltica: <http://normas.imt.mx/>

SCT. (s.f.). Normativa para la infraestructura del transporte. Recuperado el 27 de marzo del 2023, de Normativa para la infraestructura del transporte:<http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#004>

[¿QUIENES SOMOS ? \(cnih.org.mx\)](https://hdl.handle.net/20.500.12848/2668) 05 de julio 2024, 12:40. Cámara de la industria hulera <https://hdl.handle.net/20.500.12848/2668> 18 de agosto 2023.

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/88856> 25 de enero 2024.





Una propuesta para considerar el cambio climático en el diseño de la subrasante en los pavimentos carreteros

J. F. Mendoza^{1*}, E. M. Alonso², W. Martínez², H. L. Chávez², R. Soto², H. Delgado¹

*Autor de Contacto: fernando.mendoza@imt.mx

¹ Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

RESUMEN

El clima y el cambio climático influye en la vida útil de diseño de un pavimento por lo que es importante considerarlo en su diseño. En la presente investigación se realiza una propuesta para incorporarlo en los métodos de diseño de pavimentos flexibles empíricos y mecánico-empíricos que actualmente se utilizan. Se identificó que la temperatura y la precipitación son las variables climáticas que más influyen en el desempeño físico y mecánico de las diferentes capas del pavimento. Para el caso de los materiales sueltos (agregados en capas de base y sub-base, y suelos en la capa de subrasante o suelo de cimentación) la propiedad más representativa es el módulo de resiliencia, cuyos cambios en el comportamiento están asociadas a la humedad (debido a la precipitación). La propuesta se base en el uso del Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), el cual permite considerar la temperatura y la precipitación actual y futura, donde se utiliza para estimar un factor ambiental el cual influye en el módulo de resiliencia óptimo, cuya combinación permite obtener un módulo de resiliencia en equilibrio. La aplicación puede incorporarse en casi cualquier método de diseño de pavimentos, para cualquier sitio si se tienen registros meteorológicos y escenarios del cambio climático. La aproximación para incorporar el clima y el cambio climático presentada en este artículo puede convertirse en una herramienta práctica de amplia utilidad para aumentar la resiliencia en los pavimentos.

Palabras clave: Cambio climático; Pavimentos; Subrasante; Diseño.

1. INTRODUCCIÓN

Los ingenieros y profesionales responsables del diseño de los pavimentos deben tener un especial cuidado en el análisis del comportamiento del suelo de cimentación y de la subrasante, ya que las propiedades mecánicas del mismo están sujetas a la presencia de humedad y su variación estacional, influyendo de manera significativa en su desempeño.

Existe una serie de investigaciones que destacan la importancia de considerar el clima (temperatura y precipitación) de manera adecuada en los métodos de diseño de pavimentos, y es que las condiciones ambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de pavimentos, y afectan el comportamiento de las diferentes capas de este, además influyen en las propiedades de los materiales que conforman el pavimento, modificando su comportamiento y desempeño.

Las capas de materiales granulares (base, subbase, subrasante o suelo de cimentación) están determinadas por el módulo de resiliencia, el cual es un parámetro importante que además de representar propiedades mecánicas, permite considerar variaciones climáticas por los cambios en el contenido de agua y la succión del suelo.

El módulo de resiliencia (M_R) es una propiedad de los materiales significativa y racional que debe ser incluida en el proceso de diseño de un pavimento. El módulo de resiliencia proporciona una medida del comportamiento de la carga-esfuerzo la cual induce una deformación del suelo y de las capas granulares, influyendo en el comportamiento del sistema estructural del pavimento. El factor que más influye en el diseño es debido al tránsito y a las condiciones ambientales de suelo de la subrasante (Edil and Motan, 1979).

Históricamente, la deformación resiliente ha sido estudiada por diversos autores para un adecuado diseño de pavimentos. Sin embargo, en los últimos años ha aumentado el interés para determinar la influencia de las variaciones de humedad en el módulo de resiliencia de los suelos de subrasante en los pavimentos (suelo de cimentación para un pavimento).

Perera (2003), explica que los cambios en el contenido de humedad que se producen después de la construcción de la sección del pavimento se clasifican en una de las tres categorías siguientes:

- Aumento o disminución de la condición inicial (típicamente cercana a la óptima) a la condición de equilibrio o condición "media".
- Fluctuación estacional en torno a la condición de humedad media o normal debido a la infiltración de las precipitaciones a través de las grietas de la(s) capa(s) ligada(s) y debido a las fluctuaciones en el nivel freático en ausencia de congelación/descongelación, y
- Variaciones en el contenido de humedad debido a la congelación/descongelación.

Esta variación climática y como ha sido estudiada e incorporada en el módulo de resiliencia, en los métodos de diseño empíricos y mecánico-empíricos fue analizada para que, con base en los hallazgos identificados, proponer una manera práctica para considerar el cambio climático en estos métodos.

La propuesta busca predecir los cambios futuros en variables como la temperatura media y la precipitación mensual, con base en escenarios futuros del cambio climático, a través del Índice de Humedad Thornthwaite (TMI), el cual se obtiene con base en datos históricos de precipitación y temperatura.



2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL CLIMA EN LOS PAVIMENTOS

El clima sirve como un insumo esencial en el diseño del pavimento y, dependiendo de su variabilidad, puede tener un impacto significativo en el desempeño del pavimento (Li et al, 2011). Por eso es importante que los métodos de diseño de pavimentos consideren el clima, pero también consideren el cambio climático.

Sirin et al, 2019, identificaron 29 factores que afectan el desempeño del pavimento, de los cuales 3 de ellos están asociados a factores medioambientales (condiciones climáticas extremas, precipitación intensa y los ciclos de congelamiento-descongelamiento). Estos factores dan complejidad al diseño de pavimentos, ya que estos influyen en la tasa de deterioro y la pérdida de serviciabilidad ilustrada en la Figura 1.

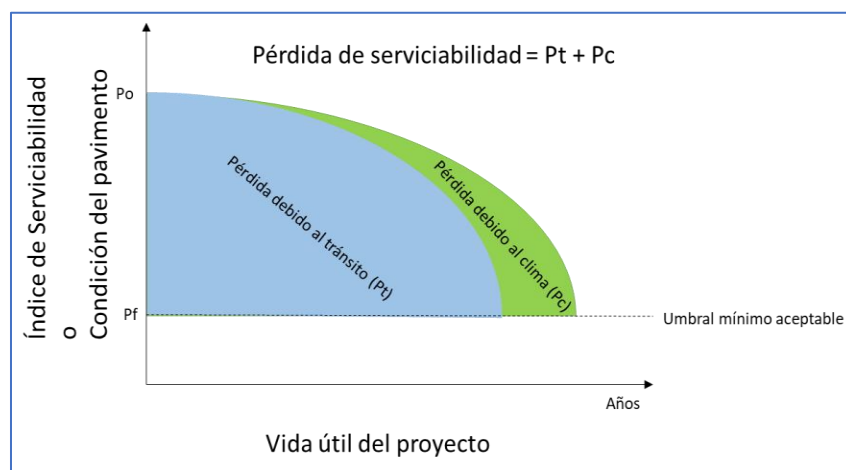


Figura 1. Pérdida de serviciabilidad debido a dos principales factores (tránsito y clima) (Mendoza et al, 2022, basada en Haas, 2001)

Las primeras investigaciones para evaluar el efecto del clima en los pavimentos, fue llevada a cabo por Ali and Lopez (1996), donde evaluaron las correlaciones entre las propiedades estructurales del pavimento (representadas por los módulos elásticos de las capas), los factores climáticos (representados por las condiciones de temperatura y humedad del pavimento) y el comportamiento de las propiedades de los materiales.

La temperatura tiene una influencia mayor en el desempeño de las carpetas asfálticas en pavimentos flexibles, de tal manera que las tensiones inducidas por el tránsito y la temperatura son la causa de las fallas en los pavimentos.

Las inundaciones y su impacto en los pavimentos también han sido estudiadas en diferentes investigaciones, ya que un pavimento al estar sometido a condiciones de inundación impacta en la durabilidad del pavimento y en calidad superficial, de manera particular el nivel de profundidad y la duración de la inundación.

El análisis de la influencia del clima en los pavimentos permite demostrar la importancia de considerar el clima de una manera más adecuada en el diseño de pavimentos, ya sea por métodos empíricos o mecanicistas.

3. INCORPORACIÓN DEL CLIMA EN LOS METODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

El clima es considerado en varios casos de manera implícita dentro de las propiedades de los materiales, y solo en los métodos más recientes de manera explícita.

La Comisión de Carreteras del Estado de Kansas (1947), mediante la fórmula para determinar el espesor de pavimento requerido, consideró el coeficiente de saturación del suelo en función de la precipitación promedio anual.

El método AASHTO (1961) consideró un factor de ajuste regional debido al clima, ya que se había detectado que las condiciones climáticas y del suelo de cimentación de las pruebas realizadas correspondían a un solo sitio, y por lo tanto los resultados solo eran válidos para ese lugar.

La actualización del método AASHTO (1986), consideró que el medioambiente puede afectar el desempeño del pavimento en diferentes maneras. La guía introdujo el “Módulo de Resiliencia Efectivo” del suelo de cimentación o de la subrasante, cuyo propósito de identificar los módulos estacionales es cuantificar el daño relativo al que está sometido un pavimento durante cada estación del año. La guía AASHTO considera también un “Coeficiente de Drenaje”.

En el MS-01 (1970) del Instituto del Asfalto consideró que las condiciones medioambientales afectan de manera adversa las propiedades de soporte de los materiales de la subrasante. Los tres principales parámetros críticos son la humedad, la expansión del suelo, y el congelamiento. Estos pueden ser representados por el valor de soporte (CBR) y el valor de resistencia (R-Value). Las actualizaciones del método del Instituto del Asfalto consideraron el módulo de resiliencia en sustitución del CBR, y la incorporación de la temperatura para la determinación del espesor de capa de concreto asfáltico.

El método UNAM utilizado en México (Corro and Prado, 1974), establece que las condiciones meteorológicas influyen en la capacidad de soporte del suelo (VRS), por lo que el valor relativo de soporte crítico para diseño considera un coeficiente de variación que incluye la incertidumbre debido al clima.

El método Shell (1978) considera la variación de la temperatura, la cual no tiene un efecto significativo sobre el módulo de resiliencia de los materiales granulares, pero si tiene una fuerte influencia en las propiedades del asfalto. Para incorporar la temperatura se introduce un parámetro que pondera la temperatura media anual del aire (w-MAAT). El valor de w-MAAT es utilizada para los gráficos para determinar los espesores de la carpeta asfáltica, en función del espesor de la base y el módulo de la subrasante.

La Guía para el Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) de AASHTO (2008) establece un análisis climático/medioambiental, dentro del cual se incluye a la temperatura y la humedad como variables ambientales. La forma de incorporar la información climática al diseño MEPDG, es mediante el Modelo Climático Integrado (ICM). Este programa fue reconocido como el modelo más completo que aborda los efectos del clima en los pavimentos. La versión original fue analizada y adaptada y denominada “Modelo Climático Integrado Mejorado” (EICM).

El EICM en conjunto permite predecir o simular patrones de comportamiento de las características del pavimento y de los materiales junto con condiciones ambientales de diversas variables meteorológicas que se utilizan en el método de diseño MEPDG. Para estimar el módulo de resiliencia en equilibrio de suelo de cimentación o de la subrasante se realiza mediante un factor ambiental que es obtenido mediante el EICM como se muestra en la Figura 2, y multiplicarlo por el módulo de resiliencia óptimo.

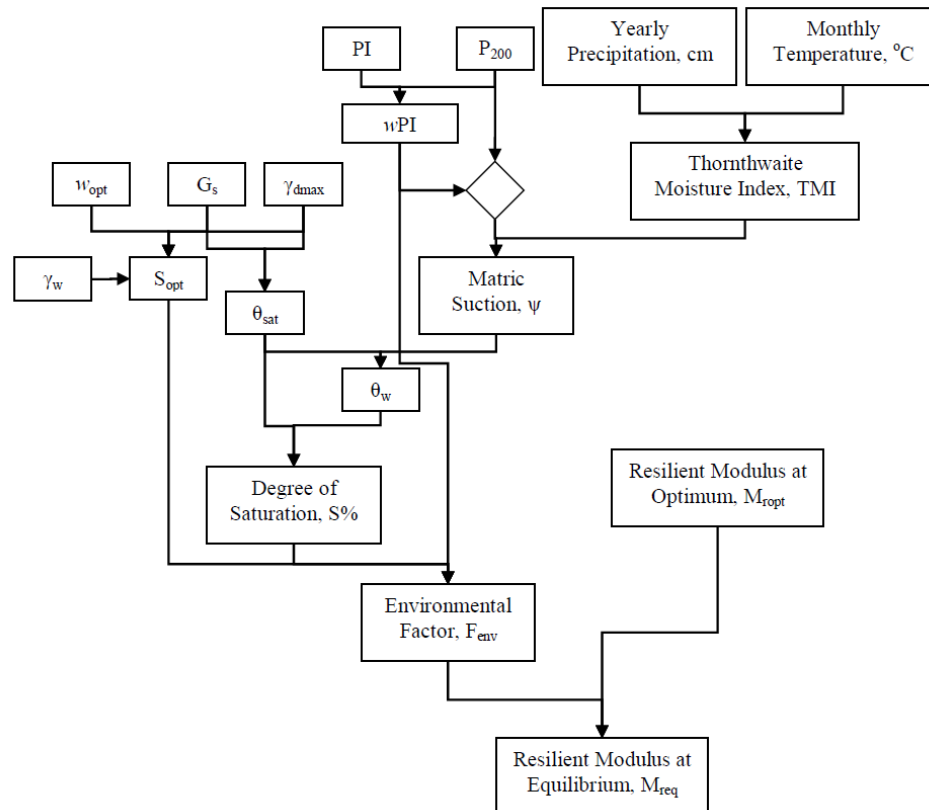


Figura 2. Diagrama de flujo del EICM (Rosenbalm, 2011)

El enfoque actual para el diseño Mecánico-Empírico está planteado sobre la base de patrones climáticos históricos típicos que reflejan el clima local, por lo que no considera el cambio climático, el cual tiene efectos significativos en el desempeño de un pavimento. De esta manera resulta insuficiente considerar únicamente la información sobre los datos climáticos que son utilizados en los modelos de deterioro que utilizan los métodos mecánico-empíricos, sino que se debe simular el desempeño y deterioro de los pavimentos en función del cambio climático.

El riesgo potencial del cambio climático ha despertado especial interés en evaluar cómo puede afectar las tasas de deterioro de los pavimentos flexibles y cómo se alteraría la vida útil del pavimento como consecuencia (Qiao et al, 2013).

De acuerdo con algunas investigaciones, los cambios en temperatura y precipitación se han incorporado en el MEPDG de AASHTO incluyendo primero las temperaturas y la precipitación estimada para el sitio conforme los datos históricos de la estación meteorológica y con apoyo del AASHTOWare, y posteriormente adicionar las temperaturas y la precipitación proyectada conforme a los escenarios climáticos utilizados en las investigaciones (Gudipudi, et al, 2017; Mallick, et al, 2014; Mohd, et al, 2016). Sin embargo, no se propuso un procedimiento para incorporar el cambio climático de manera estandarizada, ya que solo fueron estudios exploratorios para identificar el impacto del cambio climático en los pavimentos, ya sea en la durabilidad o en los costos de conservación.

4. UNA APROXIMACIÓN PARA CONSIDERAR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Para responder adecuadamente al cambio climático es necesario adaptarlos, para ello se han considerado diversas opciones que permitirán aumentar la resiliencia de los pavimentos, tales como: adaptar los materiales, adaptar la estructura, adaptar el drenaje, adaptar el mantenimiento, y adaptar normativas (Dawson, 2014). Esto implicará que las normativas de diseño deben actualizarse para considerar el cambio climático como parte de su dimensionamiento y para la selección de los materiales.

La propuesta se centra el uso del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés de Enhanced Integrated Climatic Model), del enfoque para el diseño de pavimentos, denominado mecanicista-empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés de Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide), adaptado para que pueda ser utilizado en México.

La aplicación del EICM del MEPDG puede continuar siendo una excelente herramienta de entrada para incorporar el clima en los métodos de diseño, sin embargo, se debe considerar la variación climática futura esperada conforme algún escenario climático seleccionado para la región del proyecto.

Este estudio sugiere incorporar las variables climáticas de temperatura y precipitación con base en datos históricos obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas al sitio del proyecto y los cambios proyectados obtenidos a través de modelos de circulación general con base en los posibles escenarios climáticos definidos en el último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021).

Russam and Coleman (1961), examinaron la relación entre las condiciones de humedad de la subrasante y el balance hídrico climático, presentando evidencias de una relación entre la succión de la humedad del suelo en la subrasante y el Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI).

La información climática histórica y su variación futura puede ser incorporada en el EICM a través del Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), introducido en 1948, el cual permite calcular la matriz de succión y con el grado de saturación obtenido de la caracterización del suelo del sitio de proyecto se puede determinar el Factor Ambiental (F_{env}) (Zapata et al, 2007). Este factor ambiental incorpora la variación climática estacional con base en datos históricos de precipitación y temperatura, pero también puede incorporar la variación futura esperada de las variables climáticas, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.

Finalmente, el factor ambiental se multiplica por el módulo de resiliencia óptimo, y se obtiene un módulo de resiliencia en equilibrio.



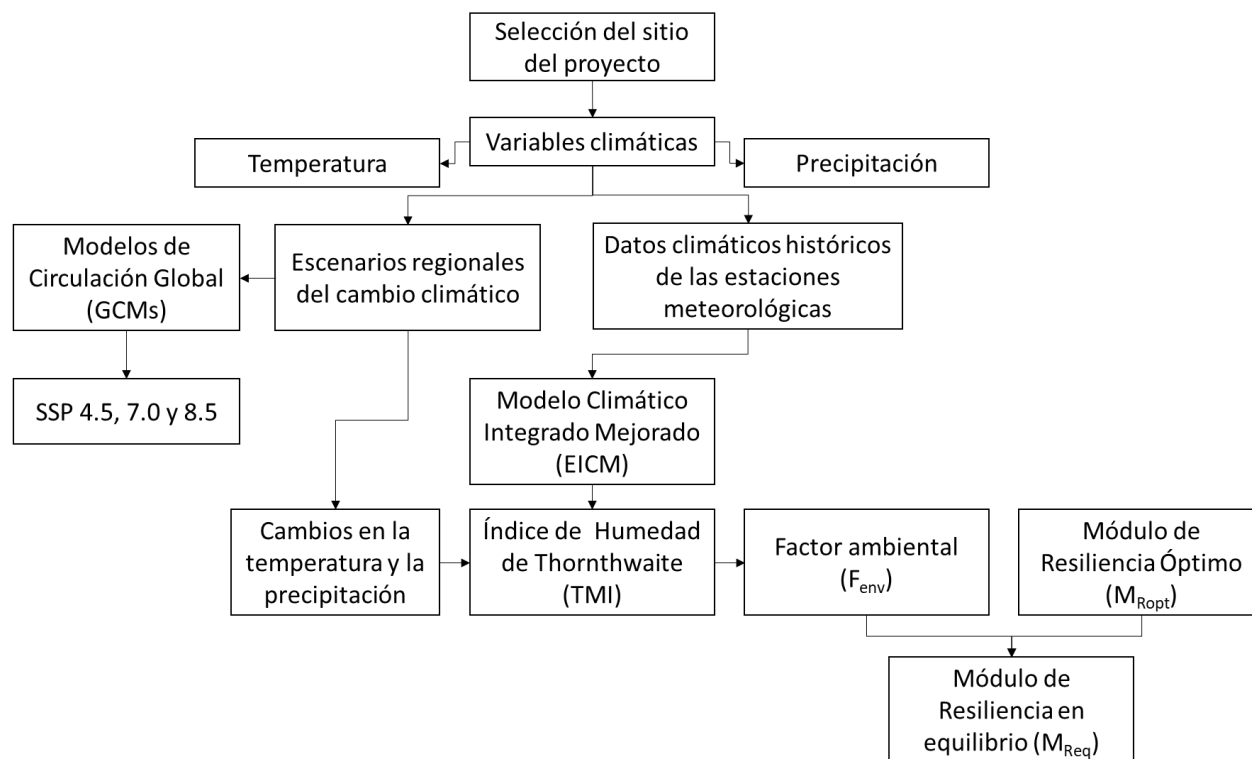


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Nota: Los escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP) 7 y 8.5 representan escenarios con altas y muy altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y el 4.5 representa un escenario intermedio de emisiones de GEI.

4.1 Cálculo del Índice de Humedad de Thornthwaite

El índice de humedad de Thornthwaite, TMI, es un parámetro que se obtiene a partir de datos climáticos, normalmente recogidos en estaciones meteorológicas.

Con el fin de utilizar el concepto de TMI no sólo para los sitios ubicados en los EE. UU., sino también para los sitios ubicados fuera de los EE. UU., Witzak et al (2006) desarrollaron la siguiente ecuación:

$$TMI = 75 \left(\frac{P}{PET} - 1 \right) + 10 \quad (1)$$

Donde:

P= Precipitación mensual (cm)

PET= Potencial de Evapotranspiración

Para determinar el TMI anual, se requiere el calcular para cada mes el potencial de evapotranspiración (PET), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$PET = f_1 f_2 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (2)$$

Donde:

f_1 = fracción del número de días en el mes dividida por el número medio de días en el mes que es de 30 días

f_2 = fracción del número de horas en un día dividida por la base de 12 hora diarias de sol en un día

t = temperatura media mensual en grados Celsius

I = índice de calor anual

a = coeficiente

Para determinar el índice de calor anual (I) se utiliza la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

Donde:

t_i = temperatura media mensual en grados Celsius para el mes “ i ”

Para obtener el coeficiente “ a ” es a través de la siguiente expresión:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^3 - 1.792 \times 10^{-2} I^3 + 0.49239 \quad (4)$$

El valor del PET puede ser ajustado dependiendo de la latitud y el mes del año, a través de la ecuación siguiente:

$$PET' = PET_i \frac{D_i N_i}{30} \quad (5)$$

Donde:

PET' = Potencial de Evapotranspiración Ajustado

D_i = Factor de corrección para la duración del día de acuerdo con la latitud

N_i = Número de días del mes

4.2 Considerando el cambio climático en el TMI

La información climática histórica y su variación futura puede ser incorporada en el EICM a través del Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI) el cual permite calcular la matriz de succión y con el grado de saturación.

De los escenarios climático se puede obtener los cambios futuros esperados de temperatura y precipitación para el sitio en donde se pretenda diseñar un pavimento y obtener el módulo de resiliencia del suelo.

Para facilitar la obtención de las estimaciones futuras, se cuentan con los mapas de proyecciones futuras desarrollados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quien es responsable de las políticas de cambio climático en México. Para ello se puede apoyar con la plataforma SICliC (Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras) desarrollado por Mendoza et al (2021).

Esta información permitirá al diseñador a través de SICliC elegir la variable climática de interés, luego determinar el escenario climático SSP (RCP) y el mes. Una vez realizado esto se desplegará el mapa del cambio climático de la variable seleccionada para todo el país, en donde se deberá

ubicar el área de proyección en donde se ubica el proyecto. Una vez seleccionado el cuadro, se desplegará en el menú lateral derecho las proyecciones de la variable climática de los cambios futuros esperados por mes o promedio del año, para que el diseñador elija el más apropiado para su análisis (Véase la Figura 4).

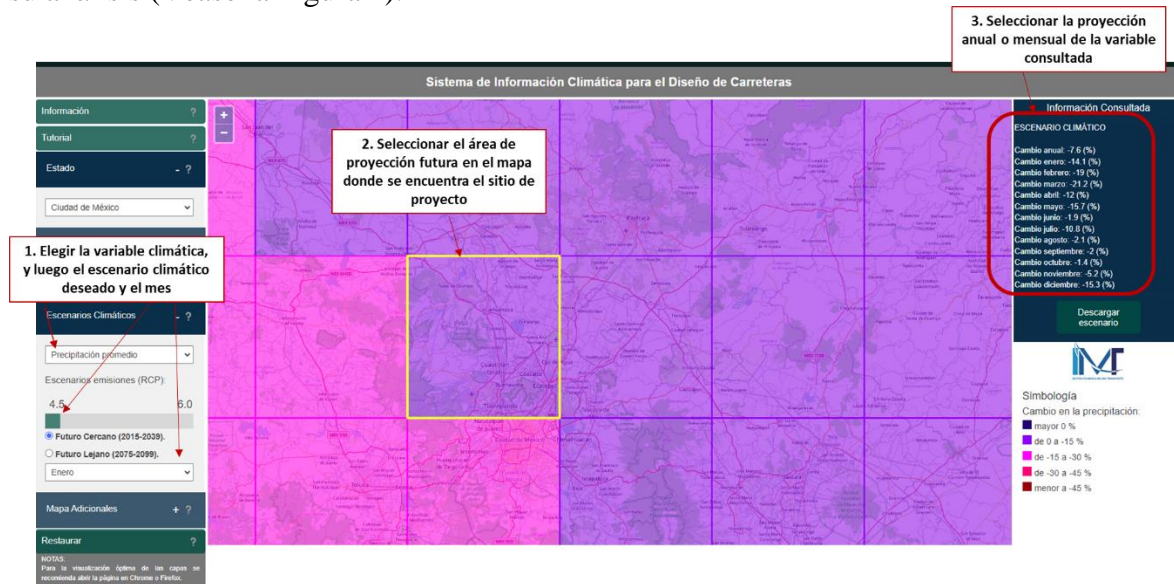


Figura 4 Selección de escenarios del cambio climático.
Fuente: <http://siclic.imt.mx/SICLIC/> (Consulta el 2 de enero del 2024).

Del SICLiC se obtendrá de acuerdo con el escenario climático seleccionado el cambio en la precipitación y la temperatura, el cual podrá sumarse o restarse a los datos históricos, y con ello evaluar el impacto en las propiedades de los suelos en función del cambio climático.

4.3 Uso del TMI en la predicción del módulo de resiliencia

El EICM automáticamente calcula los parámetros de las curvas SWCC. El modelo hace referencia a una serie de correlaciones usadas para calcular el contenido de humedad en equilibrio basada en la succión del suelo y los límites de Atterberg del suelo tales como el Índice de Plasticidad (PI), el porcentaje que pasa la malla #200 (P_{200}) y el diámetro (mm) del 60% del material (D_{60}).

El contenido volumétrico de agua también puede obtenerse por el modelo propuesto por Houston et al (2006), utilizando el Índice de Plasticidad (PI) y el porcentaje que pasa la malla #200 (P_{200}).

El modelo propone las siguientes dos ecuaciones:

$$\theta_w = 4 + 1.5P_{200}^{0.6994} + 0.03(TMI) \quad (6)$$

$$\theta_w = 40 + 0.11(P_{200} - 53) \quad (7)$$

Hay tres restricciones asociadas con esta variable:

- 1) si el P_{200} es menos del dos por ciento, use dos por ciento.
- 2) si el θ_w de la Ecuación (6) es mayor que 40 por ciento, utilice Ecuación (7).
- 3) Si θ_w es mayor que θ_{sat} entonces θ_w será igual a θ_{sat} .

Como se puede observar la ecuación 6 esta relacionada con el TMI, por lo que permite ajustar el contenido volumétrico del sitio, y con ello estimar el grado de saturación como se indica el diagrama de flujo de la Figura 2, y posteriormente estimar el factor ambiental.

El modelo universal para estimar el factor ambiental dentro del EICM (Rosenbalm, 2011), mediante la siguiente ecuación:

$$F_{env} = 10 \left[a^{-1} + \frac{\beta - a^{-1}}{1 + e^{\ln\left(\frac{-\beta}{a^{-1}}\right) + \gamma\left(\frac{S - S_{opt}}{100}\right)}} \right] \quad (8)$$

Donde:

$$\alpha = (-0.6) + (-1.87194)e^{-wPI}$$

$$\beta = 0.8 + 0.08(wPI)^{0.5}$$

$$\gamma = (11.96518 + (-10.19111) e^{-wPI})^{0.5}$$

El MEPDG utiliza la variación temporal de la humedad y la temperatura en todos los niveles de análisis, a través del factor ambiental (F_{env}).

El EICM trabaja con los factores ambientales de temperatura y precipitación, y predice la humedad y la succión del suelo en función del tiempo, para cualquier localización para materiales de capas granulares.

El módulo de resiliencia (M_{R-eq}) para cualquier localización y temporada puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$M_{R-eq} = F_{env} * M_{R-opt} \quad (9)$$

El factor F_{env} es el factor de ajuste ambiental y el M_{R-opt} es el módulo resiliente en condiciones óptimas y en cualquier estado de tensión.

5. CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales (temperatura y precipitación) tienen un efecto significativo en el desempeño de pavimentos, y afectan el comportamiento de las diferentes capas de este, además influyen en las propiedades de los materiales que conforman el pavimento, modificando su comportamiento y desempeño.

Los métodos de diseño actuales con base empírica no consideran de manera directa el clima, y no consideran de manera específica el clima del sitio en donde se pretenda diseñar el pavimento, i su variación futura por el cambio climático. Esta necesidad llevó al desarrollo de una propuesta práctica para considerar el clima (temperatura y precipitación) del sitio del proyecto en México, para que a través del Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) se pudiera caracterizar el clima del sitio y también considerar su variación futura (cambio climático).

La herramienta práctica está basada en el Sistema de Información Climática para Carreteras (SICliC) y el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM) del MEPDG de AASHTO, mediante el cual se puede estimar el Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) con base en datos históricos de precipitación y temperatura, y utilizando escenarios del cambio climático para México.

La herramienta propuesta permite determinar predecir el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio, el cual es utilizado para el diseño de las capas que conforman la estructura de un pavimento.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades para realizar la colaboración interinstitucional para el desarrollo de investigaciones entre el Instituto Mexicano del Transporte y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Adicionalmente se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología de México, quien ha otorgado financiamiento a través de becas para la realización de este proyecto.

7. REFERENCIAS

- Ali, Hesham A.; Lopez, Aramis. (1996). *Statistical Analyses of Temperature and Moisture Effects on Pavement Structural Properties Based on Seasonal Monitoring Data*. Transportation Research Record. Journal of Transportation Research Board. <https://doi.org/10.1177/0361198196154000107>
- American Association of State Highway Officials. (1961). *AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1986). *Guide for design of pavement structures*. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide for design of pavement structures*. ISBN 1-56051-055-2. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice*. ISBN 978-1-56051-423-7. Washington, DC.
- Asphalt Institute. (1970). *Thickness design – Full depth asphalt pavement structures for highways and streets*. Manual Series No.1 (MS-1). Revised eight edition
- Corro Caballero, Santiago; Prado Ollervide, Guillermo. (1974). *Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible*. Series del Instituto de Ingeniería No. 325. UNAM. México, DF.
- Dawson A. (2014) *Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes*. In: Gopalakrishnan K., Steyn W., Harvey J. (eds) *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_4
- Edil, T. y Motan, S. (1979). *Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils*. 58th. Annual Meeting of the Transportation Research Board, 705, 54-63.
- Gudipudi, Padmini P.; Underwood, B. Shane; Zalgout, Ali. (2017). *Impact of climate change on pavement structural performance in the United States*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 57, December 2017, Pages 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.022>



- Haas, Ralph. (2001). *Reinventing the (pavement management) wheel. Distinguished lecture*, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, WA, August 11-14, 2001.
- Houston, W., Mirza, M. y Zapata, C. (2006). *NCHRP Projeet No. 9.-23 Environmental effects in pavement mix and structural design systems: Calibration and validation of the ICM Version 2.6*, Final Report
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Larson, Gregg; Dempsey, Barry J. (1997). *Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0*. Minnesota Department of Transportation Road Research Project. Final Report DTFA MN/DOT 72114. University of Illinois. USA
- Li, Q.; Mills, L.; McNeil, S. (2011). *The Implications of climate change on pavement performance and design*. University of Delaware University Transportation Center (UD-UTC). Delaware, USA.
- Lytton, R.L.; Pufahl, D.E.; Michalak, C.H.; Liang, H.S.; Dempsey, B.J. (1989). *An integrated model of the climatic effects on pavements*. Final report. Texas Transportation Institute. Texas A&M University. Report: FHWA-RD-90-033. Federal Highway Administration. USA.
- Mallick, Rajib B.; Radzicki, Michael J.; Daniel, Jo Sias; Jacobs, Jennifer M. (2014). *Use of System Dynamics to Understand Long-Term Impact of Climate Change on Pavement Performance and Maintenance Cost*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2455, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2014, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3141/2455-01>
- Mendoza, J.; Adame, E.; Gradilla, L.; Alonso, E.; Marcos, O. (2021). *Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera*. [Publicación Técnica No. 636]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt636.pdf>
- Mendoza, J.; Alonso, E.M.; Martinez, W. (2022). *Análisis de la influencia del clima y su variabilidad en la vida útil de un pavimento*. Memorias del X Congreso Nacional de Alconpat México. <https://doi.org/10.21041/memoriasdecongresoXCNAM2022-Publicadoen2023>
- Mohd Hasan, Mohd Rosli; Hiller, Jacob E.; You, Zhanping. (2016). *Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design*. International Journal of Pavement Engineering, Volume 17, 2016 - Issue 7, Pages 647-658. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019504>
- Perera, Y. (2003). *Moisture equilibria beneath paved areas*. PhD Dissertation, Arizona State University, Arizona, USA.
- Qiao, Yaning; Flintsch, Gerardo W.; Dawson, Andrew R.; Parry, Tony. (2013) *Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2349, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 100–107. <https://doi.org/10.3141/2349-12>
- Rosenbalm, D. (2011). *Reliability associated with the estimation of soil resilient modulus at different hierarchical levels of pavement design*. Master's thesis. Arizona State University.
- Russam, K.; Coleman, J. (1961). *The Effect of Climatic Factors on Subgrade Moisture Conditions*. Géotechnique, 11(1), 22-28. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.1.22>

Shell International Petroleum Company, Ltd. (1978). *Shell pavement design manual: Asphalt pavements and overlays for road traffic*. London, England.

Sirin, O.; Gunduz, M.; Shamiyeh, M.E. (2019). Assessment of pavement performance management indicators through analytic network process. *IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2952153>

State Highway Commission of Kansas (1947). *Design of flexible pavement using the triaxial compression test*. Highway Research Board. Bulletin No. 8. Washington, D.C.

Thorntwaite, C. (1948). *An Approach toward a Rational Classification of Climate*. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>

Witczak, M., Zapata, C. y Houston, W. (2006). *Models incorporated into the current enhanced integrated climatic model: NCHRP 9-23 Project findings and additional changes after version 0.7 - Final report*, Project NCHRP 1-40D. AASTHO & FHWA, Washington, DC

Zapata, C., Andrei, D., Witczak, M. y Houston, W. (2007). *Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design*. Taylor & Francis. *Road Materials and Pavement Design*, 8(4), 667-693. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690094>



Estudio del efecto del color del vidrio residual pulverizado, como material puzolánico, en las propiedades de pastas de cemento portland

L. Hernández Zárate¹, V. G. Jiménez Quero^{2*}, J. Guerreo Paz³

*Autor de Contacto: vjimenezq@ipn.mx

¹ Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, Oaxaca, México.

² Grupo de Materiales y Construcción, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, Oaxaca, México

³ Laboratorio de Cerámicos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Hidalgo, México.

RESUMEN

Se estudió el efecto del color del vidrio residual pulverizado (VRP), como material puzolánico, en las propiedades de pastas de cemento portland (CP). Se elaboraron pastas empleando 0, 5, 10 y 15% de VRP de color verde (VRPv) y ámbar (VRPa) como sustitutos de CP. De ellas se evaluaron los tiempos de fraguado (TF), los tiempos de flujo (Tf) y la extensibilidad. La resistencia a compresión (f_c) se evaluó en probetas cúbicas a 7, 14 y 28 días de edad. Los resultados indican que los TF de todas las pastas, independientemente del tipo y cantidad de VRP empleado, resultaron menores que los (TF) de la pasta control (P0). Las pastas elaboradas con VRPv presentaron Tf menores al Tf de la P0, y con el incremento del contenido del VRPv los Tf disminuyeron. En las pastas con VRPa sucedió lo opuesto. Las pastas con VRPv presentaron mayores extensibilidades que la P0. La pasta con 15% de VRPa presentó la menor extensibilidad. A los 7 días las f_c , independientemente del color y cantidad de VRP empleado resultaron menores que la f_c de la P0. Sin embargo, a 14 y a 28 días de edad el efecto de la incorporación del color de VRP contribuyó a mejorar su desempeño.

Palabras clave: Material puzolánico; Tiempos de fraguado; Tiempos de flujo; Resistencia a compresión.

1. INTRODUCCIÓN

Los envases de vidrio representaron la tasa de reciclaje más alta entre el vidrio, con alrededor del 32% de los residuos reciclados. Sin embargo, esta estadística todavía muestra hoy que la cantidad de vidrio residual disponible es muy importante y su acumulación en vertederos se está incrementando, generando cada vez mayores costos ambientales y financieros (Ali-Boucetta et al., 2021).

Estudios de Afshinnia y Rao (2015) indican que un impedimento para reciclar vidrio es que la pedacería de vidrio está integrada por vidrio de diferentes colores. El vidrio mezclado (es decir, los envases de vidrio con diferentes colores) no puede procesarse colectivamente debido a los problemas que surgen de las diferencias en las temperaturas de fusión de cada tipo de vidrio y las incompatibilidades en la composición de los vidrios con diferentes colores (Jiang et al., 2019).

Se han publicado trabajos de investigación que muestran algunas ventajas y efectos secundarios en la utilización de VRP como reemplazo parcial del CP (Jiang et al., 2019); pero en lo que refiere al efecto de color, se ha reportado que el vidrio de color verde tiene una mayor reactividad puzolánica (Hongjian-Kiang Hwee, 2013; Pereira-de-Oliveira, 2012), y se atribuye principalmente a los elementos de coloración que participaron en la reacción y a las diferencias estructurales entre los vidrios (Karamberi-Moutsatsou, 2005). Sin embargo, también se han reportado resultados contradictorios que demuestran que la influencia del color no es significativa (Özkan-Yüksel, 2008).

Por lo tanto, en un artículo de revisión, Yi Jiang et al. (2019), sugieren la verificación del efecto de los colores y los mecanismos críticos involucrados en las propiedades de materiales basados en cemento, resultando necesario ampliar este conocimiento respecto al efecto que el color del vidrio puede influir en las características y propiedades finales del producto donde se emplee.

Es por lo anterior que la finalidad de este proyecto fue investigar la influencia del remplazo de CP con diferentes porcentajes de VRP de color verde y ámbar, en las propiedades en estado fresco y endurecido de pastas de CP. Los resultados obtenidos sentarán las bases para futuras investigaciones en morteros y concretos empleando VRP como sustituto parcial de cemento portland.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la elaboración de las pastas se utilizaron los siguientes materiales

Aglutinante:

-Cemento portland compuesto (CPC) la marca Holcim Apasco®

Materiales puzolánicos:

-Polvo de Vidrio (PVv) (obtenido de vidrio residual color verde)

-Polvo de Vidrio (PVa) (obtenido de vidrio residual color ámbar)

-Agua bidestilada

Aditivo:

-Reductor de agua de alto rango Plastol precast plus de la marca EUCO®

La composición química de los materiales en polvo se presenta en la Tabla 1; la distribución del tamaño de sus partículas se presenta en la Figura 1.



Tabla 1. Composición química de los materiales

Elemento/Compuesto	CPC	VRPv	VRPa	Vidrio Tipo GS (ASTM C 1866)
SiO ₂	23.86	70.13	68.85	60
Al ₂ O ₃	5.77	1.72	1.9	5
Fe ₂ O ₃	2.19	0.9	1.22	1
CaO	50.76	10.77	10.48	15
MgO	1.36	1.02	0.56	
Na ₂ O	0.91	12.44	12.88	15
K ₂ O	0.92	0.68	0.63	
TiO ₂	0.25			
MnO	0.06			
SO ₃	0			1
PXC		0.74	1.61	5

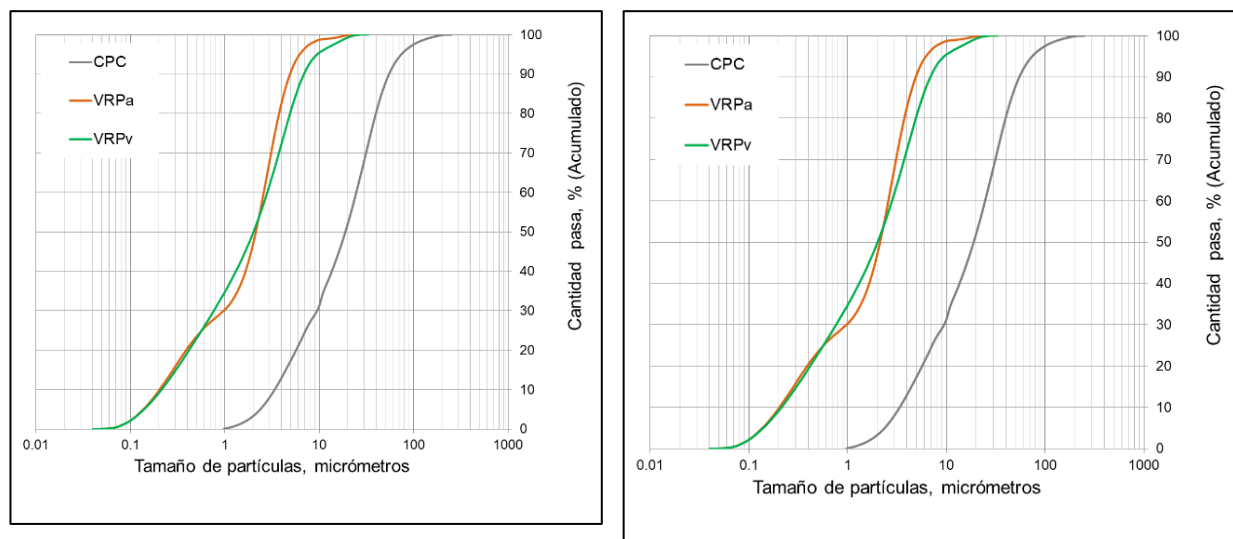


Figura 1. Distribución del tamaño de partículas del CPC y de los VRP

2.2 Diseño de pastas

Para el diseño de las pastas en este proyecto se consideraron dos factores: el Polvo de Vidrio verde (PVv) y el Polvo de Vidrio ámbar (VPa), para cada factor se consideraron cuatro niveles: 0, 5, 10 y 15%. Se consideraron como respuestas en estado fresco: Los tiempos de fraguado, el área relativa de flujo y los tiempos de fluidez; mientras que en estado endurecido fue: la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días de edad, lo anterior se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de pastas de cemento-polvo de vidrio.

Vidrio residual	Cantidad (%)	Variables respuesta
Pulverizado color verde (PVv)	0, 5, 10, 15	Estado fresco: Tiempo de fraguado (min.) Índice de deformabilidad (Extensibilidad mm ²) Índice de viscosidad (Tiempo de flujo s)
Pulverizado color ámbar (PVa)	0, 5, 10, 15	Estado endurecido: Resistencia a la compresión (MPa)

2.3 Elaboración de pastas

Para la elaboración de las pastas de cemento, se empleó una mezcladora marca Hamilton Beach® de 4.5 litros de capacidad y se siguió el procedimiento descrito en la Norma ASTM C 305.

2.4 Métodos

A las pastas en estado fresco se les realizaron las pruebas de: Consistencia (ASTM C-187), Tiempos de fraguado (ASTM C 191), Tiempos de fluidez (ASTM C 939) y extensibilidad (Kantro, 1980). Para evaluar las pastas en estado endurecido se colaron probetas cúbicas de 50mm y se ensayaron a compresión (ASTM C 109) a edades de 7, 14 y 28 días.

3. RESULTADOS

3.1 Consistencia

Después de ensayar pastas con diferentes cantidades de agua, la cantidad adicionada de agua, con la cual la aguja penetró 10 mm en la pasta, fue de 227.5 g, por lo tanto, la consistencia normal de la pasta se obtuvo con una relación agua/cemento de 0.35.

3.2 Tiempos de Fraguado

Los resultados revelan que los tiempos de fraguado inicial (TFI) y final (TFF) de todas las pastas, independientemente del tipo y cantidad de PV empleado, resultaron menores que los tiempos de la pasta control, Figura 2. La pasta PVv-15 presentó los menores tiempos de fraguado, sus tiempos de TFI y TFF tuvieron un retraso del 10.87% y 12.89% respectivamente con respecto a los de la pasta control. Esto puede ser causado por la cantidad y tamaño de partículas de este PV que redujeron la cantidad de agua disponible promoviendo la hidrólisis inicial y una reducción de la relación efectiva agua-cemento (Lu et al., 2017). Como se sabe, las pastas de cemento con relaciones a/c altas tardan más en que los productos de hidratación del cemento formen una estructura rígida (Bye, 1999), por lo que sus tiempos de fraguado inicial y final resultan mayores.

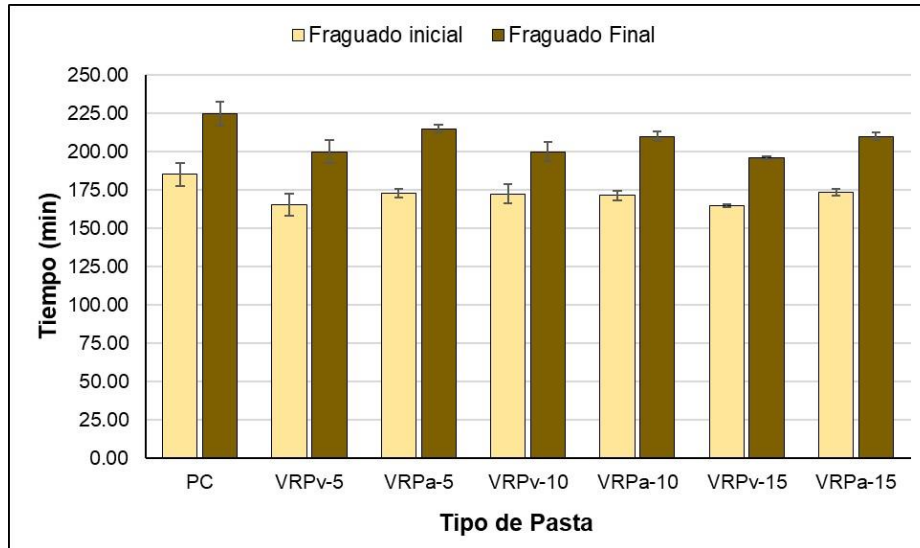


Figura 2.- Tiempos de Fraguado.

La composición química del cemento influye también en los tiempos de endurecimiento de las pastas, y cuando se combina cemento con materiales cementantes o puzolánicos, para la elaboración de pastas, la influencia puede ser mayor (Xie, et al., 2021; Ramanathan et al., 2022). Según Bernard et al. (2003) y Haecker et al. (2005) en el cemento Portland ordinario la hidratación conduce a compuestos C-S-H y portlandita, mientras que en el cemento con aditivos puzolánicos el contenido de óxido de silicio amorfo reacciona con la portlandita producida. En consecuencia, la hidratación y la composición de las pastas influyen en los tiempos de fraguado.

3.3 Tiempos de fluidez

En la Figura 3, se presentan los resultados de los tiempos de fluidez (TF) de las pastas elaboradas con CP y PV.

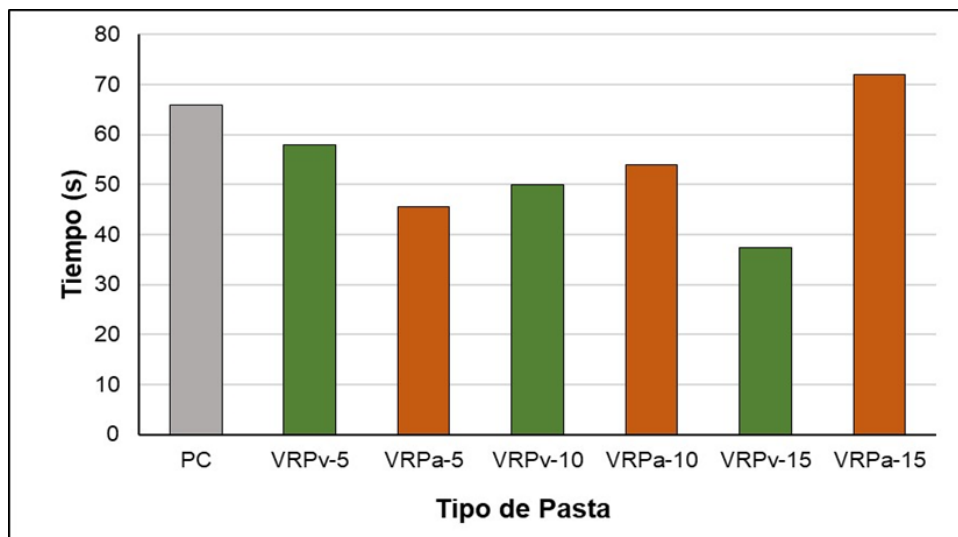


Figura 3.- Tiempos de Fluidez

Se observa que las tres pastas elaboradas con PVv presentaron TF menores al TF de la pasta control y también que con el incremento del contenido del PVv los TF disminuyeron. Este comportamiento puede atribuirse al tamaño y geometría de las partículas del polvo de vidrio verde.

Una hipótesis popular propuesta para explicar la mejora de la trabajabilidad/fluidez debido al uso de ciertas adiciones minerales finas, como los polvos de vidrio, es que el tamaño de sus partículas y su forma cuasi-esférica ruedan fácilmente unas sobre otras, reduciendo la fricción entre partículas (Ramachandran, 1995).

3.4 Extensibilidad

Se observa, en la Figura 4, que las pastas con PVv presentaron mayores áreas relativas de flujo que la pasta control, además se observa que las pastas aumentaron su extensibilidad con el aumento en el contenido del PVv. Lo anterior puede atribuirse a que las partículas de vidrio se caracterizan por ser partículas no porosas ni absorbentes, con baja proporción de expansión y conductividad térmica (Bauer, 2008). Además, se ha reportado en la literatura que el uso de algunas adiciones minerales finas, con ciertas características, puede reducir la demanda de agua o aumentar el revenimiento (Lange et al., 1997).

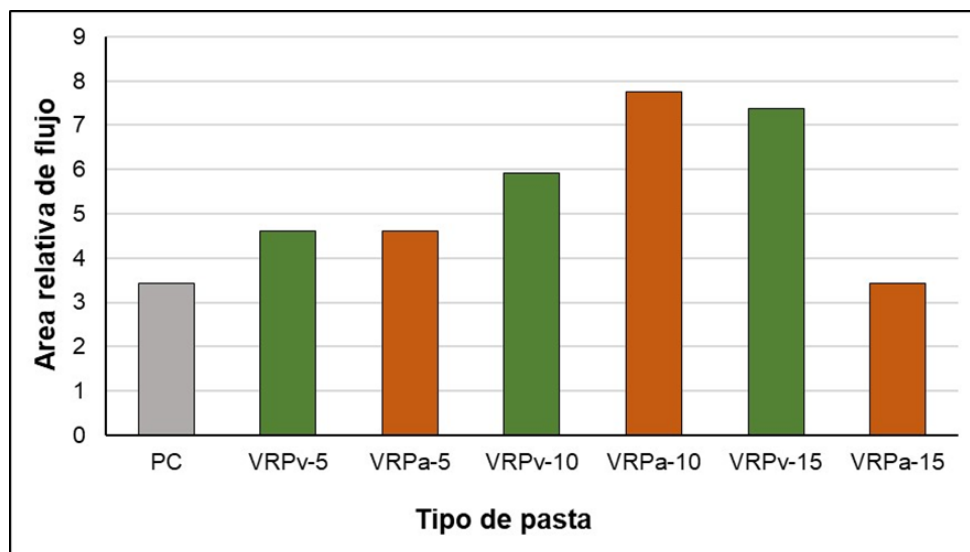


Figura 4.- Resultado de extensibilidad (Áreas relativas de flujo)

Las partículas del PVv tienen una superficie lisa, es decir no son porosas y presentan una geometría cuasi-esférica por lo que pudieron producir el efecto “Ball Bearing” y reducir la fricción entre partículas de cemento (Termkhajornkit et al., 2001).

Las pastas con contenidos de PVa de 5 y 10% el comportamiento fue similar a las pastas con PVv, sin embargo, la pasta con 15 de PVa, presentó la menor área relativa de flujo. Lo anterior puede atribuirse a la distribución de tamaño de sus partículas, las cuales probablemente no lograron un buen empaquetamiento y una parte del agua de mezclado quedó atrapada en ellas (Sakai, 1997).

3.5 Resistencia a compresión

En la Figura 5 se presentan los resultados de las pruebas de resistencia a compresión de las pastas en estado endurecido a diferentes edades.

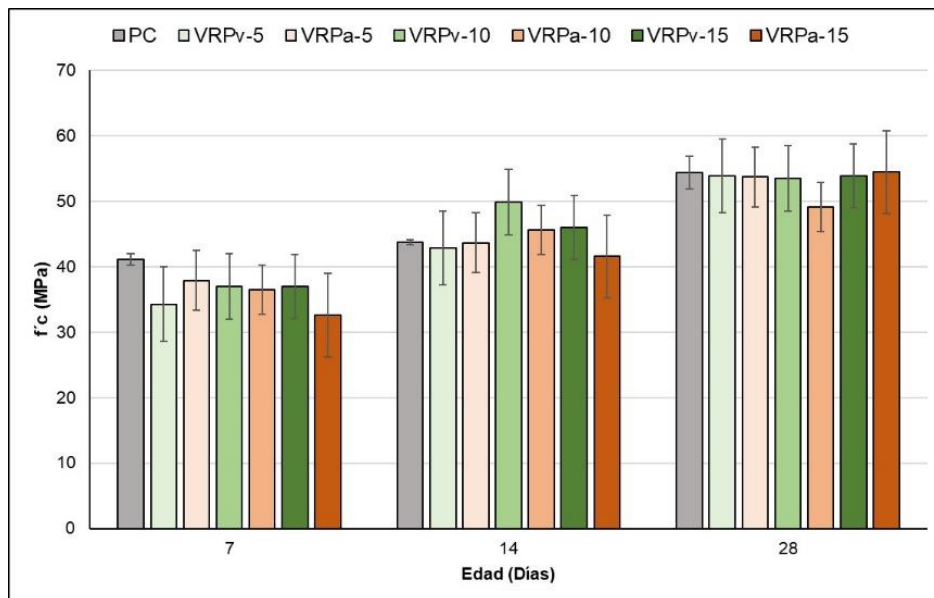


Figura 5.- Resistencia a Compresión de pastas de Cemento-PV.

Se observa que, a los 7 días de edad, las $f'c$ de las pastas, independientemente del tipo y cantidad de PV empleado resultaron menores que la $f'c$ de la pasta control. Sin embargo, a 14 y a 28 días de edad el efecto de la incorporación del tipo de PV contribuyó a mejorar su desempeño.

A 14 días se puede observar que el incremento de 5% a 10% de PV de ambos colores resulta benéfico, pues sus $f'c$ superan ligeramente la $f'c$ de la pasta control. Lo anterior puede ser consecuencia que con esta cantidad de PV produjo una estructura empaquetada y un sistema denso del cemento+PV repercutiendo en el aumento de la resistencia a la compresión (Lu et al.,2017). Sin embargo, un incremento de 10% a 15% ocasionó una reducción de cemento y su consecuente hidratación afectando la $f'c$ final de las pastas.

A 28 días de edad las $f'c$ de las pastas (excepto la mezcla PVa-10) fueron muy similares a la $f'c$ de la pasta control. Tomando a detalle los resultados del ensayo de compresión de las pastas de cemento, se puede corroborar que la $f'c$ de la pasta PVa-15, a 28 días de edad, fue igual a la $f'c$ de la pasta control.

4. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos en este proyecto se puede concluir que el uso del PVv, mejora las propiedades de las pastas en estado fresco, y en estado endurecido, la sustitución de cemento por 10% de PV (independientemente del color), produce resistencias a compresión similares a la resistencia de la pasta control a 28 días.

Pronosticar las cualidades de las pastas de cemento endurecidas en función de sus propiedades en estado fresco es un tema complejo que exige una comprensión detallada del comportamiento de la pasta de cemento por las características de los materiales en polvo empleados.

En el presente estudio se ha encontrado que un menor tiempo de fraguado final en una pasta de cemento con polvo de vidrio, no asegura una mayor resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México (Proyectos SIP 20240133 y 20242799) el apoyo financiero brindado para esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Afshinnia, K., Rao Rangaraju, P. (2015), *Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars*. Construction and Building Materials. 81:257-267.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., Laifa, W. (2021). *Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag*. Construction and Building Materials. 270: 2-14.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133>
- Bauer, L.A.F. (2008), “*Materiais De Construcao*” - Volume 2 - Bauer - 5a Edicao.Pdf, 5th ed., LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- [20] Bernard, O., Ulm, F.J., Lemarchand, E. (2003), *A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials*. Cement and Concrete Research. 33 (9):1293-1309.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00039-5)
- Bye, G. C. (1999), “*Portland cement: composition, production and properties*”. Thomas Telford. London.
- Haecker, C.J., Garboczi, E.J., Bullard, J.W., Bohn, R.B., Sun, Z., Shah, S.P., Voigt, T. (2005), *Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste*. Cement and Concrete Research. 35 (10):1948-1960.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.001>
- Hongjian, D., Kiang Hwee, T. (2013), *Use of waste glass as sand in mortar: Part II- Alkali-silica reaction and mitigation methods*. Cement and Concrete Composites. 35 (1):118-126.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.029>
- Jiang, Y., Tung-Chai, L., Kim Hung, M., Caijun, S. (2019), *A critical review of waste glass powder Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products*. Journal of Environmental Management. 242: 440-449.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
- Kantro, D. (1980). *Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test Cement*. Concrete and Aggregates CCAGDP, 2(2): 95-102.
- Karamberi, A., Moutsatsou, A. (2005), *Participation of coloured glass cullet in cementitious materials*. Cement and Concrete Composites. 27 (2): 319-327.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.021>
- Lange, F., Mörtel, H., Rudert, V. (1997), *Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties*. Cement and Concrete Research. 27 (10):1481-1488.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00189-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00189-0)
- Lu, J.X., Duan, Z.H., Poon, C.S. (2017). *Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar*. Cement and Concrete Composites. 82: 34-44.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.01>



Özkan, Ö., Yüksel, İ. (2008), *Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products*. Construction and Building Materials. 22 (6): 1288-1298.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.015>

Pereira-de-Oliveira, L.A., Castro-Gomes, J.P., Santos, P.M.S. (2012), *The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components*. Construction and Building Materials. 31:197-203.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>

Ramachandran, V.S. (1995), *Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology*. Noyes Publications, Park Ridge, NJ.

Ramanathan, S., Pestana, L.R., Suraneni, P. (2022), *Reaction kinetics of supplementary cementitious materials in reactivity tests*, Cement. 8: 100022.

<https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100022>

Sakai, E., Hoshimo, S., Ohba, Y., Daimon, M. (1997). "The fluidity of cement paste with various types of inorganic powders", Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Sweden, pp. 8.

Termkhajornkit, P., Nawa, T., Ohnuma, H. (2001), *Effects of properties of fly ash on fluidity of paste*. Cement Science and Concrete Technology. 55:163-169.

Xie, T., M.S. Ali, Elchalakani, M., Visintin, P. (2021), *Modelling fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing supplementary cementitious materials using reactive moduli*. Construction and Building Materials. 272: 121954.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121954>



Evaluación puzolánica de vidrio molido reciclado como sustituto parcial del cemento

E. I. Martínez-Martínez¹, L. F. Marín-Cruz¹, S. Ramírez-Arellanes¹, V. A. Franco-Luján^{1*}

*Autor de Contacto: victor.fl@itvalletla.edu.mx

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de ETLA, Oaxaca, México.

RESUMEN

La demanda de cemento Portland crece constantemente; sin embargo, esta industria enfrenta muchos desafíos debido a la extracción excesiva de materia prima, la demanda de agua y las altas emisiones de gases contaminantes. Para mitigar estos desafíos, el cemento se puede sustituir parcialmente por materiales reciclados como vidrio molido con propiedades puzolánicas, con el fin de obtener materiales basados en cemento más ecológicos y con rendimiento similar o mejor que los fabricados únicamente con cemento. En este contexto, el siguiente trabajo presenta los resultados de la evaluación puzolánica de vidrio molido para ser empleado como sustituto parcial de cemento. Los resultados mostraron que el proceso de molienda es capaz de obtener partículas de vidrio con una distribución y tamaño de partícula similares a las del cemento. Además, estas partículas están compuestas principalmente por óxido de silicio el cual se encuentra en estado amorfo. Por último, las pruebas de índice de actividad resistente mostraron que los morteros preparados con 20% de vidrio molido fueron capaces de obtener un índice superior al 75% que establece la normativa para que un material pueda ser empleado como sustituto parcial del cemento. Con lo anterior, se puede afirmar que con el uso de este residuo sólido se podrán obtener materiales basados en cemento con un menor impacto ambiental.

Palabras clave: Actividad puzolánica; Material cementante suplementario; Índice de Actividad Resistente.

1. INTRODUCCIÓN

La elaboración de cemento Portland (CP) es uno de los procesos industriales más importantes a nivel mundial, ya que el CP es el material más ampliamente utilizado en la industria de la construcción (Sivakrishna et al., 2020). Sin embargo, esta actividad conlleva el consumo de cantidades importantes de recursos naturales y emisiones de gases contaminantes, generando aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de CP producido (Benhelal et al., 2021). Lo anterior conlleva un impacto ambiental que contribuye al calentamiento global y al cambio climático que en la actualidad el planeta y la sociedad enfrentan.

Para reducir el impacto ambiental generado por la industria del cemento, se están realizando diversas investigaciones respecto al uso de energías limpias para la producción de CP (Aranda Usón et al., 2013), así como al uso de materiales alternativos al mismo; por ejemplo, los cementos activados alcalinamente (Tang et al., 2019). Otra alternativa viable es la sustitución parcial del CP por materiales cementantes suplementarios (MCS) provenientes de residuos agro-industriales como la ceniza volante (CV), humo de sílice, ceniza de bagazo de caña y ceniza de cascara de arroz (Cordeiro et al., 2011; Kumar et al., 2021; Mehta & Ashish, 2020a; Sivakrishna et al., 2020; Tangchirapat et al., 2009). No obstante, el uso de CV como MCS se está viendo mermado debido a las regulaciones ambientales respecto al carbón (Fairbairn et al., 2010), además la demanda CP aumentará en aproximadamente 6 mil millones de toneladas para 2050 (Scrivener et al., 2018). Lo anterior sin duda promoverá el uso de otros MCS alternativos a la CV para satisfacer la demanda de CP y que ésta sea sustentable.

En este sentido, otro MCS que está siendo investigado en los últimos años es el vidrio molido el cual puede ser empleado como sustituto parcial de los agregados fino y grueso y/o del CP (Khan et al., 2020; Mehta & Ashish, 2020b). Sin embargo, diversas investigaciones (Jiang et al., 2019; Khan et al., 2020; Li et al., 2019) afirman que remplazar los agregados por vidrio molido (VM) induce la reacción álcali-agregado, lo que impacta negativamente en la durabilidad de los materiales basados en CP. Por lo tanto, el uso de VM como MCS es una opción viable, ya que se puede mitigar no solo las emisiones de CO₂ asociados a la manufactura del CP, sino que también reducir los residuos sólidos de vidrio y su impacto en el medio ambiente.

En el mercado existen diversos tipos de residuos de vidrio, aquellos provenientes de botellas, ventanas, cristales de televisiones o equipos de cómputo, lámparas fluorescentes, equipos de ópticas (Al-Jburi Najad et al., 2019; Lu & Poon, 2019). Ante esta diversidad, es fundamental realizar una evaluación de las propiedades físico-químicas y puzolánicas de VM con el fin de conocer si puede ser empleado como MCS, ya no todos los tipos de VM cumplen con los requerimientos establecidos por la ASTM C1866/C1866M-20 para ser empleado como MCS (Bignozzi et al., 2015) o bien reportar un desempeño insuficiente en su actividad puzolánica (Federico & Chidiac, 2009). En esta perspectiva, el siguiente trabajo presenta los resultados de la evaluación puzolánica de dos tipos de vidrio molido, uno proveniente de botellas de vidrio de vino color verde y el otro de vidrio incoloro proveniente de cristalería usada en laboratorios, ambos para ser empleados como sustituto parcial de cemento.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales cementantes

Los materiales cementantes para emplear fueron cemento Portland compuesto (CPC-30R), el cual cumple con los requerimientos de la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, además se emplearon dos tipos de vidrio molido, uno proveniente de botellas de vino color verde (VMV) y el otro de residuos de cristalería incolora empleada en laboratorios (VMI).

Ambos residuos de vidrio fueron triturados y posteriormente molidos en un molino de bolas de alta energía Emax® RETSCH hasta obtener polvos que posteriormente fueron tamizados por la malla ASTM No 325 para cumplir los requerimientos establecidos por la ASTM C C1866/C1866M – 20.

2.2 Distribución y tamaño promedio de partícula

La distribución y tamaño promedio de partícula del CP, VMV y VMI empleados se determinó en muestras de polvo usando un equipo Zetasizer Advance Pro-Blue.

2.3 Composición química

La composición química de los materiales cementantes se determinó por medio de Fluorescencia de rayos X con base en la norma ASTM E1621-21, utilizando un espectrómetro PAN-alytical® Epsilon3-XL.

2.4 Análisis mineralógico

Las fases mineralógicas de los materiales cementantes fueron identificadas mediante difracción de rayos X (DRX), utilizando un difractómetro Empyrean® con ánodo de Cu. El difractómetro se operó con un voltaje de 45 kV y una corriente de 40 mA. Las pruebas se realizaron de 10 a 70° (2-Theta) a una velocidad de escaneo de 0.5 s y en incrementos de 0.026°. Finalmente, las fases minerales se identificaron por medio del software X'Pert Software HighScore Plus®.

2.5 Índice de actividad resistente.

El índice de actividad resistente se realizó con base en la norma ASTM C311-11 para lo cual se fabricarán cubos de mortero de 5 cm donde el CP fue remplazado por 20% de VMV y VMI. Después de 24 horas, los cubos fueron desmoldados y curados en una solución saturada de hidróxido de calcio hasta la edad de prueba que fueron de 7, 14 y 28 días. La prueba de resistencia a la compresión de los cubos fue con base en la norma ASTM C109/C109M-20, empleando una prensa hidráulica Instron® modelo 600DX-B1-C3-G1A. Los resultados reportados fueron el promedio de seis muestras de cubos de morteros.

3. RESULTADOS

3.1 Distribución y tamaño promedio de partícula

La Figura 1 muestra la distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes empleados en la investigación. Respecto al CP (Figura 1a), éste posee partículas de 0.92 a 210 μm , con un tamaño promedio de partícula (TPP) de 21.70 μm . En lo que se refiere al VMV (Figura 1b), sus partículas se encuentran dentro de un rango de 3.76 a 209 μm con un TPP de 24.32 μm , mientras que el VMI (Figura 1c) presentó partículas dentro del rango de 3.69 a 176 μm , con TPP de 25.35 μm .



El TPP del VMV y VMI se encuentran dentro de lo reportado en la literatura; por ejemplo Jochem et al., (2021) y Siad et al., (2016) reportaron vidrio molido (VM) con TPP de 20 μm y con un rango de no mayor a 500 y 200 μm , respectivamente. En este contexto, el VM con el menor y mayor TPP reportado en la literatura fue de 0.90 μm ((Wang et al., 2023)) y 70 μm ((Afshinnia & Rangaraju, 2015)), respectivamente. En lo que se refiere a los rangos de tamaño de partícula, existen investigaciones que emplearon VM como MCS con tamaños de partícula menores a 38 μm (Shao et al., 2000), mientras que el VM con las partículas más grandes fueron de 500 μm (Jochem et al., 2021).

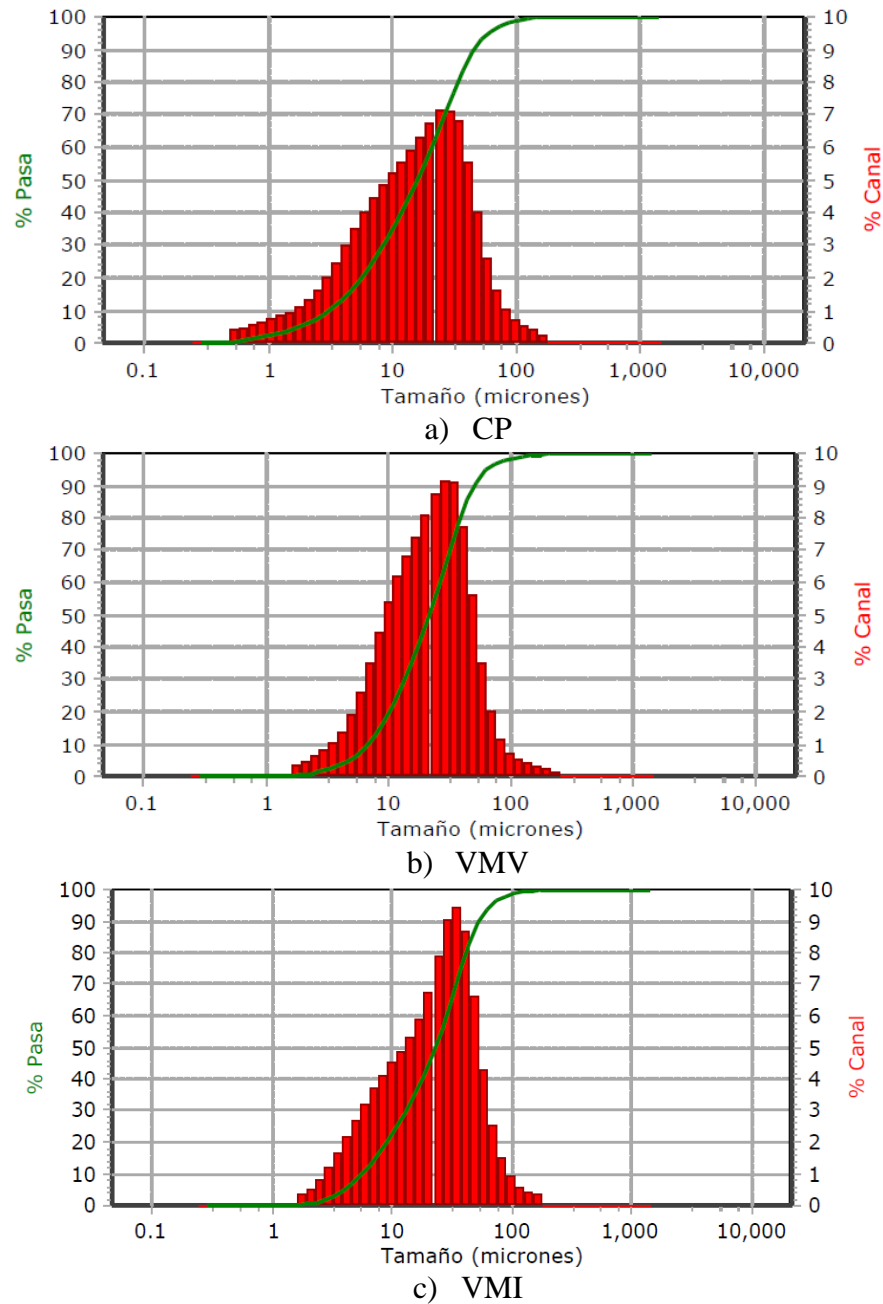


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula de a) CP. b) VMV y c) VMI

3.2 Composición química

La Tabla 1 muestra la composición química de los materiales cementantes. Se puede observar que los dos tipos de vidrio molido están compuestos principalmente por SiO_2 , ambos con porcentajes mayores al 60%, valor mínimo establecido por la norma ASTM C1866/C1866M-20, siendo el VMI el que presentó el porcentaje de SiO_2 más alto. En caso CaO , ambos VM mostraron valores inferiores a 15%, valor máximo permitido por la norma ASTM C1866/C1866M-20.

Continuando con el análisis, la suma de los principales óxidos ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$) del VMV y VMI fue mayor al 70%, con lo cual ambos VM cumplen con lo establecido por la norma ASTM C618-22, para ser considerados con potencial puzolánico.

En la sección anterior se observó que el VMV y VMI presentaron distribuciones y TPP semejantes a la del CP; sin embargo; la composición química también es un factor importante para considerar. En este sentido, existen investigaciones que reportaron TPP parecidos al VMV y VMI; no obstante; la suma de sus principales óxidos fue inferior a 70% (Bignozzi et al., 2015; Chen et al., 2006; Elaqr et al., 2019).

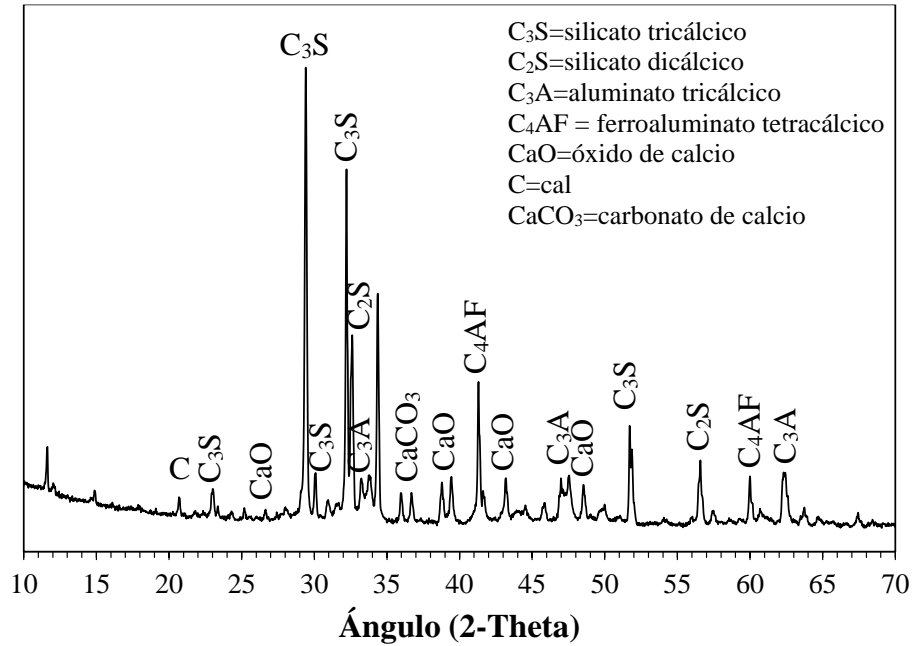
Además de que un MCS presente un porcentaje de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ mayor al 70%, estos óxidos deben de estar en estado amorfo. Lo anterior será discutido en la siguiente sección.

Tabla 1. Composición química de los materiales cementantes empleados

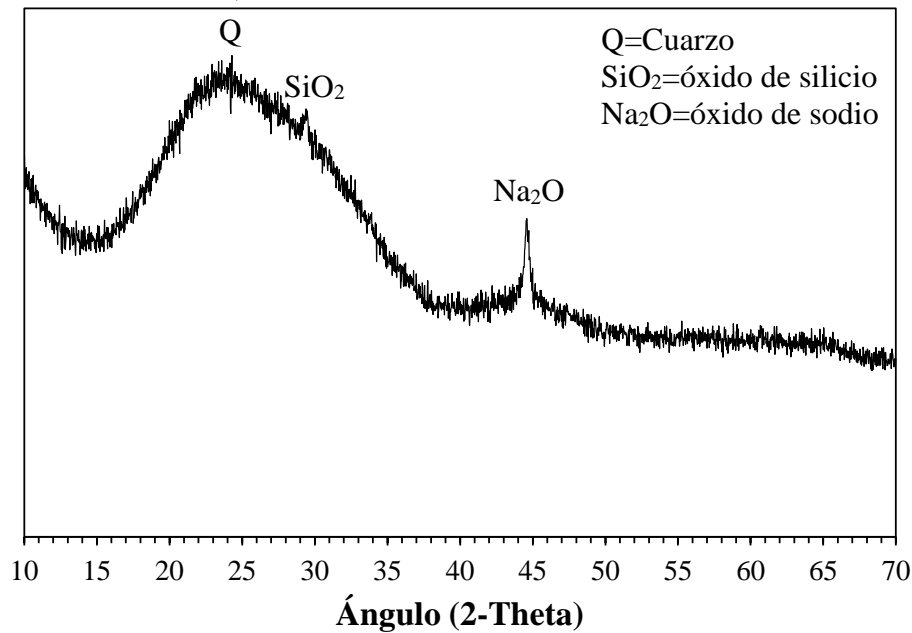
Óxidos	CP	VMV	VMI
SiO₂	14.04	76.13	90.05
Al₂O₃	3.00	2.23	4.24
Fe₂O₃	2.15	1.17	1.33
CaO	68.09	13.16	1.38
MgO	1.03	0.12	-
Na₂O	-	0.80	-
K₂O	1.23	0.80	1.07
TiO₂	0.12	0.23	-
P₂O₅	0.37	0.81	0.68
SO₃	2.69	0.43	-
Cr₂O₃	-	0.31	-
PPI	6.49	3.47	3.22
(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	-	76.53	95.62

3.3 Composición mineralógica

La composición mineralógica identificadas mediante DRX de los materiales cementantes es ilustrada en la Figura 2. Se puede observar que el CP (Figura 2a) presenta fases de silicato tricálcico y dicálcico, así como aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. Además, también están presentes fases de óxido de calcio, cal y carbonato de calcio. En lo que se refiere al VMV (Figura 2b), éste presenta fases mineralógicas de cuarzo, óxido de silicio o óxido de sodio, mientras que para el VMI (Figura 2c) solo de identificó una fase de óxido de sodio.

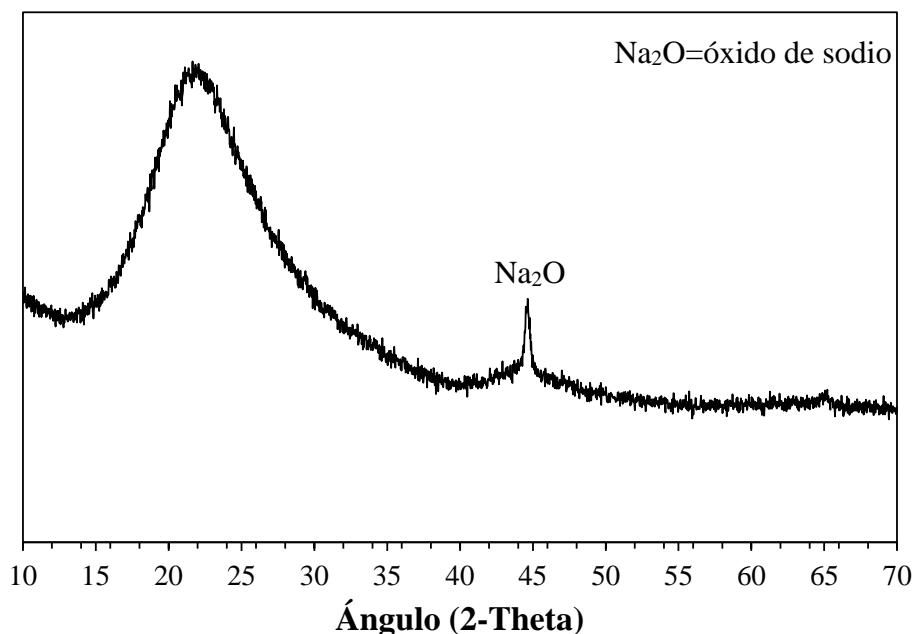


a) Patrón de DRX del cemento Portland



b) Patrón de DRX de vidrio molido verde





c) Patrón de DRX de vidrio molido incoloro

Figura 2. Patrón de DRX de los materiales cementantes empleados.

Es importante mencionar que el patrón de DRX del VMV y VMI presentó el típico halo amorfo entre el ángulo de 12 y $38^\circ 2\theta$, característica importante para que un material puede ser empleado como sustituto parcial del cemento, ya que es el SiO_2 y Al_2O_3 en su estado amorfo son los óxidos que reaccionan con el hidróxido de calcio en la reacción puzolánica para la formación de productos semejantes a los silicatos hidratados de calcio (C-S-H, por sus siglas en inglés) (Berenguer et al., 2021; Walker & Pavía, 2011).

Estos resultados son acordes con otros reportados en la literatura, donde patrones de DRX de vidrio molido de botellas de soda (Soliman & Tagnit-Hamou, 2016) y de lámparas fluorescentes recicladas (Shao et al., 2000), también presentaron compuestos amorfos.

3.4 Índice de actividad resistente

La Tabla 2 muestra los resultados de índice de actividad resistente (IAR) de morteros, donde el CP fue sustituido por un 20% de VMV y VMI. Los datos indican que, a 7 días de edad, el IAR de morteros con VMV y VMI presentaron valores superiores al 75%, valor mínimo establecido por la norma ASTM C1866 para un VM pueda ser considerado con MCS. A 14 días de edad, el IAR de ambos VM fue superior que a los 7 días y a edad de 28 días los valores de IAR fueron superiores a 85.

Es conocido que la reacción puzolánica de algunos MCS como la ceniza volante y ceniza de bagazo de caña ocurre a edades posteriores a 28 días (Juenger et al., 2019); no obstante, los resultados de IAR de ambos VM a 28 días sugieren que el óxido de silicio y óxido de aluminio amorfos reaccionaron con el hidróxido de calcio para formar C-S-H y con ello la resistencia a la compresión de los morteros con VMV y VMI incremento, respecto a las edades de 7 y 14 días. Estos resultados concuerdan con otros reportados en la literatura donde morteros elaborados con VM proveniente de botellas color ámbar y verde, así como de tubos de rayos catódicos presentaron valores de IAR superiores a 85 (Khmiri et al., 2013; Parghi & Shahria Alam, 2016; Schwarz et al., 2008).

Es importante mencionar no todos los VM evaluados en la literatura obtuvieron valores de IAR superiores a 85 y a una edad de 28 días. Por ejemplo, Khmiri et al., (2013) y Pereira-De-Oliveira et al., (2012) reportaron morteros con IAR de aproximadamente 60 para VM con TPP de 70 μm y en un rango de 40 a 80 μm . Lo anterior indica que el tamaño y distribución de partícula es un factor a considerar para que un VM pueda ser empleado como sustituto parcial del cemento.

Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que el VMV y VMI poseen propiedades puzolánicas para ser empleado con MCS y que, al contrastar estos resultados con otras investigaciones, se afirma que es indispensable una evaluación integral de las propiedades físicas y químicas de cualquier VM como material puzolánico.

Tabla 2. Índice de actividad resistente del VMV y VMI a 7, 14 y 28 días.

Material	7 días	D.E.	14 días	D.E.	28 días	D.E.
VMV	81	0.72	88	0.59	93	0.31
VMI	83	0.24	83	0.61	91	0.26
Valor mínimo establecido (ASTM C1866)	>75		---		>85	
D.E. = Desviación estándar.						

4. CONCLUSIONES

Basados en los resultados de la presente investigación, las siguientes conclusiones son mencionadas:

1. La distribución y tamaño promedio de partícula del vidrio molido verde y vidrio molido incoloro fueron semejantes a las del cemento Portland.
2. La suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 del vidrio molido verde e incoloro son superiores al 70%, valor mínimo requerido por la norma ASTM C1866/C1866M-20 para que un material pueda ser considerado con propiedades puzolánicas.
3. Los patrones de DRX del vidrio molido verde e incoloro presentaron el halo amorfo entre los ángulos 12 y 38° 2θ , lo cual indica que ambos poseen material amorfo, fundamental para la reacción puzolánica.
4. Los resultados de índice de actividad resistente del vidrio molido verde e incoloro fueron superiores al 75% y 85% a los 7 y 28 días, respectivamente, valores mínimos establecido por la norma ASTM C 1866/C1866M.
5. Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que ambos tipos de vidrio molido pueden ser empleados como materiales cementantes suplementarios, sustituyendo parcialmente al cemento y con ello la posibilidad de producir materiales basados en cemento de un menor impacto ambiental a aquellos producidos con solo cemento.



5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para la presente investigación mediante el proyecto “CONTINUIDAD DE: DESEMPEÑO PUZOLÁNICO DE VIDRIO MOLIDO RECICLADO COMO MATERIAL CEMENTANTE SUPLEMENTARIO” con clave 20689.24-P.

6. REFERENCIAS

- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. (2015). Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars. *Construction and Building Materials*, *81*, 257–267. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.041>
- Al-Jburi Najad, A. A., Hasan Kareem, J. K., Azline, N., & Ostovar, N. (2019). Waste glass as partial replacement in cement – A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *357*(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012023>
- Aranda Usón, A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Llera Sastresa, E. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 242–260. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.02.024>
- ASTM C109/C109M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- ASTM C311-11 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.
- ASTM C618-22 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM C1866/C1866M-20. Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete
- ASTM E1621-21 Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry.
- Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO2 abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, *104*, 84–101. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2020.11.020>
- Berenguer, R., Lima, N., Pinto, L., Monteiro, E., Povoas, Y., Oliveira, R., & Lima, N. B. D. (2021). Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides. *Journal of Building Engineering*, *41*, 102358. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102358>
- Bignozzi, M. C., Saccani, A., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2015). Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement and Concrete Composites*, *55*, 45–52. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.07.020>
- Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K., & Yang, C. C. (2006). Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, *36*(3), 449–456. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.12.010>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. de M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, *33*(5), 529–534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>



- Elaqra, H. A., Haloub, M. A. A., & Rustom, R. N. (2019). Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 75–82. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.077>
- Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., & Silvano, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.008>
- Federico, L. M., & Chidiac, S. E. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 606–610. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.02.001>
- Jiang, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., & Shi, C. (2019). A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *Journal of Environmental Management*, 242, 440–449. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.04.098>
- Jochem, L. F., Casagrande, C. A., Onghero, L., Venâncio, C., & Gleize, P. J. P. (2021). Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. *Construction and Building Materials*, 273, 121704. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121704>
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257–273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Khan, M. N. N., Saha, A. K., & Sarker, P. K. (2020). Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 28, 101052. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101052>
- Khmiri, A., Chaabouni, M., & Samet, B. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*, 44, 74–80. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.040>
- Kumar, K. R., Shyamala, G., Awoyera, P. O., Vedhasakthi, K., & Olalusi, O. B. (2021). Cleaner production of self-compacting concrete with selected industrial rejects-an overview. *Silicon*, 13(8), 2809–2820. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00636-6/METRICS>
- Li, B., Ling, T. C., Yu, J. G., Wu, J., & Chen, W. (2019). Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: Properties at the ambient and high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118155. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118155>
- Lu, J. X., & Poon, C. S. (2019). Recycling of waste glass in construction materials. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, 153–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00006-3>
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020a). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100888>
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020b). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100888>
- NMX-C-414-ONNCCE-2004: Industria de la construcción–cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba, Normas Mexicanas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Parghi, A., & Shahria Alam, M. (2016). Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR).



- Construction and Building Materials*, 104, 34–43.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.006>
- Pereira-De-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S. (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197–203.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.110>
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486–496. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2008.02.001>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 113, 163–173. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.049>
- Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Kumar, K. R. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54–58. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.08.202>
- Solahuddin, B. A. (2022). A comprehensive review on waste paper concrete. *Results in Engineering*, 16, 100740. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100740>
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 600–612. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.08.073>
- Tang, Z., Li, W., Hu, Y., Zhou, J. L., & Tam, V. W. Y. (2019). Review on designs and properties of multifunctional alkali-activated materials (AAMs). *Construction and Building Materials*, 200, 474–489. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.157>
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2641–2646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008>
- Walker, R., & Pavía, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime – pozzolan pastes. *Materials and Structures*, 44, 1139–1150. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>
- Wang, Y., Yang, J., Su, Y., He, X., & Strnadel, B. (2023). The Effect of Wet-grinding on the Properties of Glass Powder and Its Application in Cement Based Materials. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 38(6), 1372–1381. <https://doi.org/10.1007/S11595-023-2831-0/METRICS>





Delignification and characterization of Tule (*Typha Domingensis*) for its potential use in the production of green concrete.

R. G. Romero-Guzmán¹, E. Onofre-Bustamante^{1*}, A. C. Espindola-Flores¹

*Autor de Contacto: eonofre@ipn.mx

¹ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Instituto Politécnico Nacional, Altamira, Tamaulipas.

RESUMEN

En la búsqueda por mitigar la huella de carbono originada por la industria de la construcción, la elaboración de concreto verde es una gran alternativa. Se llevó a cabo un proceso de deslignificación con H₂O₂ para observar transformaciones en las propiedades morfológicas, químicas y estructurales del Tule (*Typha Domingensis*) en dos temporadas de extracción para ser estudiado en la mezcla de un nuevo concreto verde. Mediante microscopía óptica se observó un aumento de la rugosidad sin mostrar daños en las fibras, en cuanto a las propiedades químicas y estructurales se observó una disminución considerable de las señales atribuidas al material no celulósico. Además, la cristalinidad incremento un 13,58%, la humedad e hidrofobicidad de la fibra se mantienen similares considerando la temporada de extracción, aunque después la deslignificación este porcentaje tiende a disminuir significativamente. Por último, la investigación ha demostrado que es necesario realizar previamente un proceso de deslignificación para favorecer la interacción del Tule con la matriz del concreto, considerando el Tule un material susceptible de ser incorporado a un nuevo concreto verde.

Palabras clave: Huella de carbono; Concreto Verde; Deslignificación; *Typha Domingensis*.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Sistema Lagunar del Sur de Tamaulipas (SLST) está experimentando un crecimiento excesivo de una planta que se conoce en la zona como Tule o Junco (*Typha Domingensis*) erróneamente denominada *Typha Angustifolia* por algunos investigadores. La planta se identifica con diversos nombres en todo el mundo como: junco, pelusa, espadaña, chuspata, cumbungi, raupo, cañaveral, hierba elefante, entre otros, dependiendo de la zona y el país donde crezca (Pandey et al. 2022). Crece principalmente en agua dulce, pero también puede encontrarse en agua salada; la sombra es lo único que impide su proliferación. Es una macrófita emergente, se enraíza al sustrato con sus tallos, mientras que las hojas y las semillas están por encima de la superficie. Florece de mayo a agosto, y las semillas que brotan maduran de junio a septiembre (Baldenebro and López, 2014; Onuaguluchi and banthia, 2016; Loaiza et al., 2021; Sellami et al., 2013) y puede alcanzar alturas de hasta 3 m.

El Tule fue introducido a México y actualmente controlar su proliferación en agua dulce se ha convertido en un problema severo. Puede comportarse como una planta invasora (maleza) debido a que forma extensas poblaciones exclusivas de su especie, puede formar hasta 120 brotes por m², es decir; una planta madre de Tule puede producir hasta 35 plantas hijas por temporada, logrando colonizar de 1 a 2 m², los islotes de Tule son conocidos como Totorales (Pandey et al. 2022). Se sabe que en la zona conurbada se realizan dragados para su extracción. Sin embargo, no existe un programa para controlar el crecimiento desmedido del Tule y de esta manera se reduce el volumen de agua en las lagunas. Por lo anterior, es importante y necesario darle un valor agregado al Tule, para aprovecharlo en distintas aplicaciones.

Existen estudios que han usado del Tule como alimento para ganado, papel, ropa, artículos para el hogar (cestería, esteras, sillas), biocombustible, biopolímero y eliminación de metales pesados. Sin embargo, es necesario sumar esfuerzos para su control y reducción (Pandey et al. 2022; Loaiza et al., 2021; Ren et al., 2022). Por todo lo anterior, en esta investigación se estudian las propiedades fisicoquímicas de la planta en diferentes épocas de extracción, así como la transformación de la fibra después de aplicar un tratamiento de deslignificación química oxidante para eliminar sus azúcares solubles y evaluar su potencial uso en la producción de concreto verde. Sin embargo, ya ha demostrado ser un buen agente de refuerzo en compuestos poliméricos y se obtuvo una buena adherencia en la matriz del compuesto, su aplicación ha sido en el desarrollo de barcos, automóviles y en la construcción, haciendo revoques en las paredes de los edificios en Alemania (Pandey et al. 2022). Se espera que la celulosa y las cenizas obtenidas del Tule en este trabajo puedan tener múltiples aplicaciones, no sólo para el hormigón, sino también como referencia del diseño experimental propuesto y el uso del material obtenido en la creación de nuevos materiales sostenibles.



2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Proceso de extracción

El Tule se extrajo de una laguna ubicada a 22°19'40 "N 97°50'23 "O, cerca de la carretera Luis Donaldo Colosio colindante con Velamar en Madero, Tamaulipas, debido a su alto contenido de Tule y a la facilidad de extracción.

2.2 Tratamiento previo de la planta

Después de la extracción, se aplica un tratamiento térmico para deshidratar y conservar la planta. El tratamiento consiste en secar en una estufa a 100 ° c durante 5 horas para alcanzar una masa constante (Ren et al., 2022). Una vez aplicado el tratamiento térmico, es necesario separar la planta (sólo interesan el tallo y las hojas), debido a que son las partes de la planta con mayor cantidad de fibra y mejor rendimiento mecánico, la raíz se discriminará porque en la mayoría de los casos tiene presencia de contaminantes (absorbe metales pesados). Como paso siguiente, se reducirá el tamaño de la fibra mediante un molino triturador y posterior una segunda molienda con un molino pulverizador hasta obtener un tamaño similar al cemento.

2.3 Deslignificación

Se aplicó un tratamiento químico ácido para la eliminación de los azúcares solubles. Consiste en una inmersión de la fibra natural en H₂O₂ que ha sido reportado como un buen tratamiento de deslignificación y no genera subproductos tóxicos, se varió la concentración (2.5% y 5%) de H₂O₂ y la temperatura (ambiente, 40 y 50 °C) y 1 hora de tiempo de inmersión. Para todos los experimentos se utilizó una relación biomasa a H₂O₂ de 1:20 p/v, debido a que el H₂O₂ no se ha utilizado en la eliminación de azúcares solubles en Tule, es necesario evaluar y demostrar qué diseño experimental tiene los mejores resultados en la eliminación de azúcares solubles sin debilitar o dañar la fibra.

2.3 Determinación de la humedad y absorción de agua

Es necesario determinar el porcentaje de humedad y absorción de agua después de las dos fechas de extracción de la planta de Tule, así como de la fibra obtenida antes y después de los tratamientos con H₂O₂, los procedimientos siguen la norma ASTM D 2495 y NMX-N-098-SCFI-2014, respectivamente.

2.4 Análisis por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

El análisis FTIR de las fibras se realizó con un espectrofotómetro FTIR con accesorio ATR. Los espectros de transmitancia se registraron a una longitud de onda de 500 a 4000 cm⁻¹ con una resolución de 10 barridos. Las fibras se cortaron finamente y se pre-acondicionaron antes del análisis dejándolas secar en un horno a 105°C durante 5 horas.

2.5 Análisis por difracción de rayos X

Utilizando un difractómetro de rayos X (XRD), marca Bruker, Modelo D8 Advance, se realizó un análisis estructural de las fibras de Tule antes y después de los tratamientos aplicados para



determinar el grado de cristalinidad, con una radiación Ka de Cu ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) en un rango de ($\theta - 2\theta$) de 10 a 80° .

2.6 Análisis con microscopio óptico

La técnica de microscopía óptica se utilizó para evaluar las fibras de Tule antes y después del tratamiento de deslignificación químico con el fin de identificar que no estuvieran debilitadas o dañadas las fibras. La caracterización morfológica se realizó mediante un Microscopio BX51 con un sistema de corrección óptica al infinito Olympus UIS (Universal Infinity System).

2.7 Incorporación del Tule tratado a la mezcla de concreto verde

Se propone una mezcla de concreto que incluya Tule tratado como remplazo parcial del cemento en 1%, 3% y 5% en porcentaje en peso. Se le asignará un ID de la mezcla para identificar fácilmente el diseño de la mezcla, la M se refiere a Mezcla y la doble M es referente a la mezcla modificada, el numero seguido de la literal es referente al porcentaje de reemplazo como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Mezcla modificada con variaciones en el porcentaje de remplazo del Tule en porcentaje peso del cemento.

Cantidades en kg/m^3								
ID	Reemplazo (%)	Relación (a/c)	Cemento	Agua	Arena	Grava	Tule	Aditivo plastificante®
M1-0	0	0.45	398	180	978	784	0	0.028
MM1-1	1	0.45	394.02	180	978	784	3.98	0.028
MM1-3	3	0.45	386.06	180	978	784	11.94	0.028
MM1-5	5	0.45	378.1	180	978	784	19.9	0.028

Después de la elaboración de la mezcla de concreto se harán pruebas en estado fresco para estimar la masa unitaria y el revenimiento de acuerdo con las normas NMX-C-162-2000-ONNCCE y ASTM C 143, respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis FTIR

En la Figura 1 se muestra el espectro FTIR del Tule sin tratar (referencia). En el espectro puede observarse alrededor de 3350 cm^{-1} una banda ancha e intensa, que corresponde con la vibración del enlace O-H del enlace de hidrógeno. La banda de absorción ancha refleja la tendencia hidrofílica del Tule, relacionada con los grupos -OH presentes en el alcohol aromático de los componentes principales de la fibra (Ali et al., 2012). La banda alrededor de 2920 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} se debe al estiramiento C-H asimétrico y simétrico del enlace de compuestos alifáticos correspondientes a los residuos alifáticos de la celulosa y la hemicelulosa, así como los grupos metilo y metileno de la lignina (Ali et al., 2012). La banda alrededor de 1730 cm^{-1} se asigna al C=O de los grupos éster acetyl y urónico de la hemicelulosa o al enlace éster del grupo carboxílico de

los ácidos ferúlico y p-cumárico de la lignina y/o hemicelulosa (Santos et al., 2013; Liu et al., 2020). Las bandas nítidas y prominentes a 1635 cm^{-1} y 1467 cm^{-1} corresponden a la vibración del anillo aromático y a la flexión CH_2 (C-H) y CH_3 (C-H) de los grupos alifáticos, respectivamente. La frecuencia exacta de esta vibración depende de los grupos C=O y N-H unidos a la lignina (Bledzky et al., 2010). La región de bandas a 1245 cm^{-1} representa el estiramiento C-H correspondiente al estiramiento y deformación de la hemicelulosa y la lignina en los grupos éter y fenol presentes. Por último, las bandas a 1170 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} corresponden a la vibración asimétrica C-O-C y al estiramiento C-O respectivamente, asignadas a la deformación del CO en el alcohol secundario y el éter alifático principalmente de la celulosa (Bledzky et al., 2010).

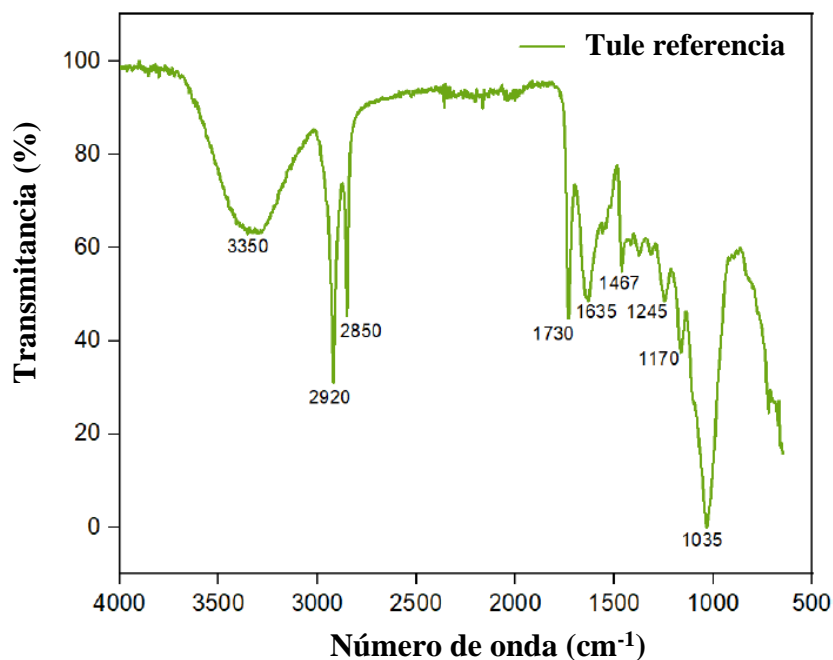


Figura 1. Espectro FTIR de la referencia del Tule.

La figura 2 muestra el espectro FTIR de Tule con la aplicación de cada uno de los tratamientos con respecto a la referencia. Se observa una disminución considerable de la banda ancha e intensa a 3350 cm^{-1} después de los tratamientos, que corresponde a la vibración del enlace O-H del enlace de hidrógeno, presente en los polisacáridos celulósicos y en los radicales O-H de los fenoles presentes en la lignina. Por otro lado, esta banda está asociada a la naturaleza hidrofobicidad de la fibra, indicando no sólo una posible eliminación de lignina, sino también que la hidrofobicidad, se observa una gran disminución de las bandas prominentes en el Tule de referencia a 2920 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} para cada tratamiento aplicado, que corresponde al estiramiento de los grupos C-H de los grupos metilo y metileno atribuidos a la lignina. La disminución de las bandas para cada tratamiento fue casi en su totalidad en 1730 cm^{-1} y 1635 cm^{-1} se aprecia una considerable disminución, teniendo en cuenta que aún quedan restos de hemicelulosa y lignina, lo que demuestra que hubo una ruptura entre los enlaces éster del ácido p-cumárico y la lignina producto de la reacción con el peróxido de hidrógeno. El caso contrario se da en las bandas en 1170 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} , donde fueron más pronunciadas, indicando un enriquecimiento de celulosa, asociado al tiempo de contacto para que se produzcan las reacciones. Por otro lado, se formó una banda en 875

cm^{-1} que no se observa en el Tule sin tratar, asociada a la frecuencia del grupo C-1 o a la frecuencia del anillo característica de los enlaces β -glicosídicos de la celulosa (Santos et al., 2013; Liu et al., 2020; Ka Khei et al., 2023). Los cambios en las bandas están asociados con un cambio en la estructura cristalina de la celulosa. De ahí un aumento de la intensidad en torno a 875 cm^{-1} (los enlaces β -glicosídicos entre las unidades de glucosa). Estos cambios en la literatura se asocian a la formación de celulosa II (Liu et al., 2020). La figura 3 muestra la comparación del Tule sin tratar en diferentes épocas de extracción, así como el espectro de las cenizas obtenidas de Tule. En cuanto al Tule de referencia (no tratado), los cambios en la banda ancha a 3350 cm^{-1} parecen ser insignificantes. Sin embargo, las bandas 2934 cm^{-1} y 2842 cm^{-1} correspondientes al estiramiento C-H asimétrico y estiramiento C-H asimétrico y simétrico de los compuestos alifáticos saturados que se asocian a los restos alifáticos en celulosa y hemicelulosa, así como de los grupos metilo y metileno de la lignina disminuyen significativamente. Además, la banda alrededor de 1730 cm^{-1} asignada al C=O de los grupos éster acetil y urónico de la hemicelulosa o al enlace éster del grupo carboxílico de los ácidos ferúlico y p-cumárico de la lignina y/o hemicelulosa o al enlace éster del grupo carboxílico de los ácidos ferúlico y p-cumárico de la lignina y/o hemicelulosa, que se asocian con un menor porcentaje de lignina en el mes de junio. Estos resultados concuerdan con la investigación de Pandey (Pandey et al., 2022), que menciona que la lignina puede aumentar o disminuir dependiendo de la estación de estudio de la planta. En el resto de las bandas no se aprecian cambios significativos a excepción de la banda 1024 cm^{-1} correspondiente a la vibración asimétrica C-O-C y al estiramiento C-O respectivamente, asignadas a la deformación del CO en el alcohol secundario y el éter alifático principalmente de la celulosa, lo que indica un enriquecimiento de este compuesto no soluble en la segunda estación de extracción. Por otro lado, respecto a la ceniza obtenida se observa que las bandas de 3350 cm^{-1} a 1632 cm^{-1} desaparecen y aparecen bandas alrededor de 1425 cm^{-1} con mayor intensidad asociadas a la deformación del metilo CH_3 y CH_2 y a la vibración Si-H del grupo Si- CH_3 (Roja et al., 2016; Castañeda et al., 2022), así como la aparición de la banda cercana a 1024 cm^{-1} exactamente a 1037 cm^{-1} asociada a los silicatos (Castañeda et al., 2022). En la segunda extracción estas bandas son más intensas, se asocia a un mayor contenido de minerales en las masas de agua y por tanto en las cenizas obtenidas en esa época de extracción, la presencia de minerales en las lagunas favorece la propagación de macrófitos emergentes y flotantes como el Tule y el Lirio acuático, respectivamente, contribuyendo a la eutrofización de las lagunas.



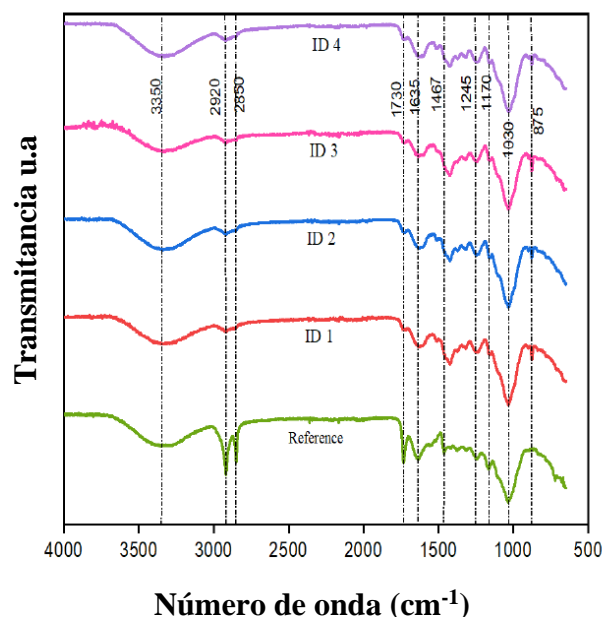


Figura 2. Espectro FTIR, Tule referencia, ID 1, ID 2, ID 3, ID 4.

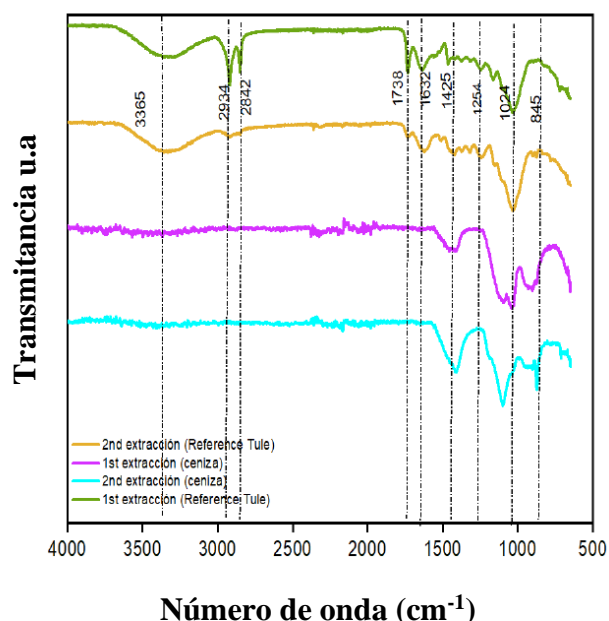


Figura 3. Espectro FTIR del Tule de referencia y de las cenizas obtenidas en la primera y segunda extracción.

3.2 Estimación de los porcentajes de absorción de agua y humedad del Tule por temporada de extracción

3.2.1 Absorción de agua

Se sabe que las plantas naturales de origen vegetal tienen la capacidad de absorber la cantidad de agua proporcional a su peso seco, se estimó el porcentaje de absorción de agua de la fibra de Tule antes de aplicar el tratamiento químico ácido, obteniéndose un $97,8 \pm 1,2\%$ de absorción, después del tratamiento químico su capacidad de absorción disminuyó $70,9 \pm 3,7\%$, estos valores se encuentran dentro de los rangos normales presentados por diferentes fibras naturales y demuestran la eficacia del tratamiento aplicado (Ren et al., 2022; Liu et al., 2020; Micheal and Moussa, 2021)

3.2.2 Humedad

El porcentaje de humedad de la fibra de Tule se estimó en base seca para ambas extracciones por duplicado, obteniéndose $10,09 \pm 0,07\%$ y $13,99 \pm 1,66\%$ para la 1ª y 2ª extracción respectivamente. El porcentaje de humedad es mayor en la segunda extracción. Este comportamiento se asocia a factores ambientales como el clima y al aumento de la época de lluvias, especialmente de junio a septiembre. Comparando con los resultados de Pandey (Pandey et al., 2022) donde obtienen porcentajes de humedad más bajos, se puede confirmar que, aunque se trate de la misma planta, el clima es un factor importante, aunque estamos hablando de la misma planta y en la zona

metropolitana específicamente Tampico, es conocida como una de las ciudades más húmedas del mundo, por otra parte, después de los tratamientos aplicados la humedad disminuyó $51 \pm 5 \%$.

3.3 Análisis DRX

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) proporcionaron información sobre la influencia en la estructura cristalina de la fibra de Tule con respecto a los tratamientos de peróxido de hidrógeno aplicados. Se estimó el grado de cristalinidad (X_c), se determinaron los ángulos de Bragg (2θ), las distancias interplanares (d) y el tamaño de los cristalitas (D). En este estudio se empleó el método de relación de intensidades, respectivamente $X_c = I_{\text{cristalina}} / (I_{\text{cristalina}} + I_{\text{amorfa}})$, los valores obtenidos se pueden observar en la Tabla 2 (Torres et al., 2017).

La identificación de fase se realizó utilizando los picos de difracción característicos en los archivos de difracción de potencia (PDF) de la celulosa con los números PDF 00-056-1719, 00-056-1718 y 00-056-1719, que corresponden a celulosa I α -celulosa, celulosa I β -celulosa y celulosa II-celulosa, respectivamente. En los difractogramas obtenidos se puede observar que la fibra de Tule es semicristalina, es decir, que presenta regiones cristalinas y amorfas. Los picos principales en el difractograma de la referencia Tule presentan valores de $20,86^\circ$ y $29,41^\circ$ (Figura 4), asociados a los planos de difracción (002) y (102) de la celulosa I α , al aplicar el tratamiento con peróxido de hidrógeno se observa una transformación en los mencionados picos intensificándose, observándose un cambio de fase de celulosa I α a celulosa II asociado al plano de difracción (020) se verificó en $22,03^\circ$. Por otra parte, la intensidad en la señal de la fase cristalina de la celulosa para Tule es mayor cuando el material ha sido tratado, ya que la presencia de celulosa tipo II confiere a la fibra obtenida mejor estabilidad térmica y mejores propiedades reológicas que la celulosa tipo I. En el difractograma se puede observar una combinación de celulosa tipo I α , I β y II (Dima et al., 2017).

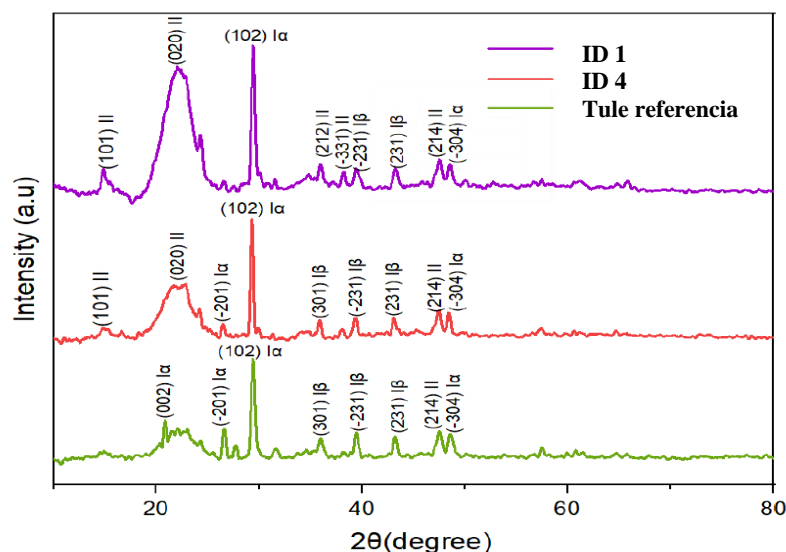


Figura 4. Difractogramas de rayos X de Tule de referencia, ID1 e ID 4.

Tabla 2. Parámetros de DRX: grado de cristalinidad (Xc), valores 2θ ($^{\circ}$), distancias interplanares (d) y tamaños de cristalitas (D).

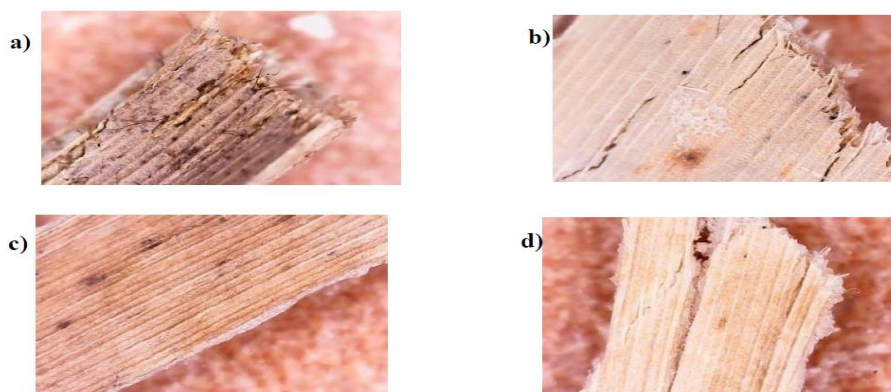
Muestra	Xc	2θ ($^{\circ}$)	d1(Å)	D1(Å)	2θ ($^{\circ}$)	d2(Å)	D2(Å)	2θ ($^{\circ}$)	d3(Å)	D3(Å)	2θ ($^{\circ}$)	d4(Å)	D4(Å)
aT	36.9 8 ± 2.42	20.8 6	4.2 51	283.9 11	29.4 1	3.0 32	198.7 82	39.4 4	2.2 82	204.0 33	43.2 2	2.0 90	209.1 53
ID 1	50.5 6 ± 1.28	22.0 3	4.0 28	25.03 3	29.3 0	3.0 44	242.9 46	39.3 4	2.2 87	195.6 88	43.1 3	2.0 95	220.9 78
ID 4	52.3 3 ± 4.23	22.1 7	4.0 05	24.52 9	29.4 2	3.0 32	204.0 78	39.3 5	2.2 89	198.7 89	43.1 4	2.0 98	220.9 86

aT= Tule Referencia

3.4 Microscopía óptica

La microscopía óptica proporcionó información muy importante sobre la morfología de la superficie de la fibra de Tule de referencia con respecto a las tratadas con H_2O_2 en cada ID del experimento.

En la micrografía observada en la Figura 5 del Tule de referencia se aprecia una tonalidad oscura con formas irregulares de la sección transversal y un mayor grosor de la fibra, en contraste con las tratadas, donde se produce un blanqueamiento, característico de la eliminación de los componentes no celulósicos de la fibra, el color blanco es proporcional a la eliminación de azúcares solubles, es decir, a mayor blanqueamiento, mayor es la eliminación de componentes no celulósicos. La sección transversal de las micrografías de la Figura 5 con respecto a ID 1, ID 2 e ID 3, se vuelve regular, contrariamente a la topografía donde se observa un aumento de su rugosidad se observa a medida que aumenta el porcentaje de peróxido de hidrógeno utilizado y la temperatura, así como disminuye el espesor de la fibra observado visualmente, asociándolo a la eliminación de azúcares solubles. Estas características se convierten en una ventaja para la fibra tratada obtenida ya que puede favorecer la interfaz entre la matriz del concreto y la fibra. Por otro lado, no se observó daño o debilitamiento de las fibras obtenidas en ningún experimento.

**Figura 5.** Micrografías a 500 x a) Tule de referencia, b) ID 1, c) ID 2, d) ID 3.

4.MASA UNITARIA Y REVENIMIENTO

4.1 Masa unitaria

Los resultados de la prueba de masa unitaria muestran una disminución del peso considerable con respecto a la referencia, el promedio es de un 6.5%, lo que representa una disminución de 152 kg/m³, por lo tanto, se obtuvo un concreto más ligero. Este avance es de gran ya que podría soportar más pisos una construcción. Adicionalmente se puede observar en la Figura 6 que para todos los experimentos se cumple con la norma ACI 318-05, con un mínimo de 1900 kg/m³ para un concreto estructural y el máximo 2400 kg/m³ (Arbelaez et al., 2023).

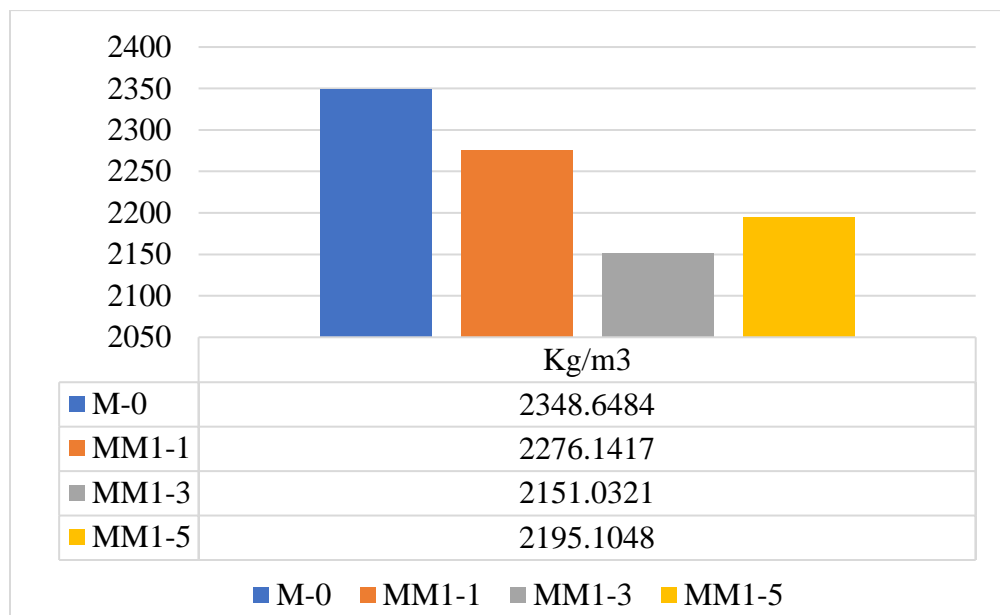


Figura 6. Resultados de la prueba de masa unitaria.

4.2 Revenimiento

La prueba de revenimiento nos indica la consistencia y fluidez del concreto, es decir, la trabajabilidad del concreto fresco. Los valores de revenimiento normal o bien una trabajabilidad excelente para concreto estructural está entre 2 y 7 pulgadas (5.08 cm y 17.78) y se considera una consistencia fluida, por debajo de los 6 cm, consistencia plástica (2-6 cm) y la consistencia seca (0-2 cm), entre los 14 y 22 cm, consistencia líquida. Los valores obtenidos en la figura 7 indican que el mejor revenimiento se obtuvo para la MM1-5, sin embargo, se observa una ligera disminución de revenimiento, debido a que las partículas de Tule, aunque fueron tratadas aún tenían capacidad de absorber en promedio un 30% de agua. No obstante, se obtuvo una consistencia blanda-líquida. Diversos investigadores reportan la disminución del asentamiento a mayor reemplazo parcial de fibras naturales y esto se debe principalmente a su capacidad de absorción hídrica, sin embargo, se puede añadir más agua para compensar o utilizar aditivo plastificante.

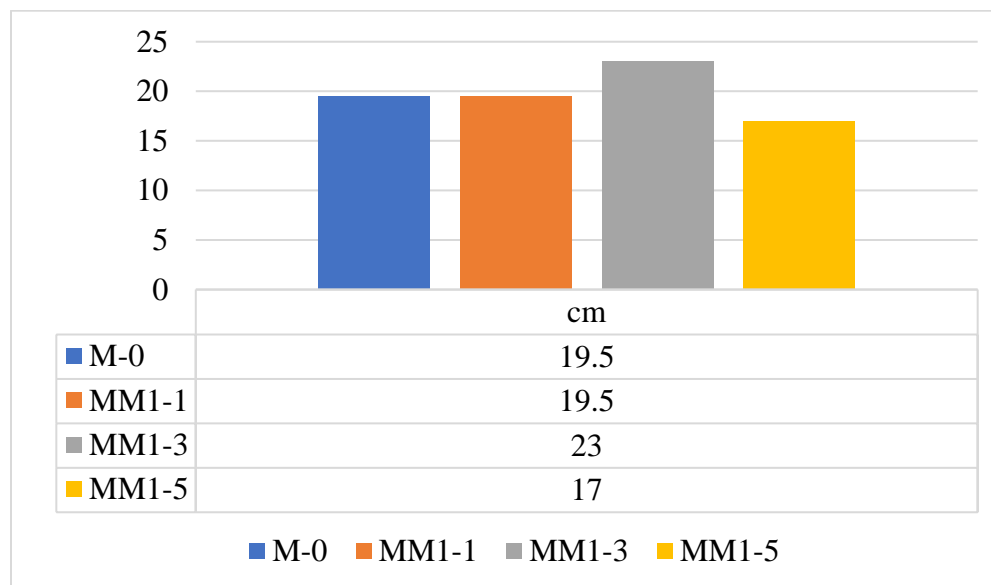


Figura 7. Resultados de la prueba de revenimiento.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que el tratamiento de deslignificación utilizando H_2O_2 al 2,5% de concentración a temperatura ambiente ($30^\circ C$) es el más eficiente debido a que en estas condiciones se obtiene la máxima eliminación de azúcares solubles y enriquecimiento en celulosa con un tiempo de contacto de una hora. Adicionalmente el tratamiento aplicado consiguió: reducir considerablemente la presencia de lignina y hemicelulosa, disminuir el proceso de fermentación natural de las fibras así como reducir considerablemente la hidrofobicidad de las fibras.

Por otro lado, mediante DRX se demostró un incremento de la cristalinidad de la fibra de Tule después de aplicar el tratamiento de deslignificación (ID 1) así como la obtención de celulosa tipo I y II, que tienen un efecto directo con el incremento de las propiedades mecánicas de la fibra.

Las muestras de concreto modificadas con diferentes porcentajes de fibra de Tule previamente deslignificadas (ID 1), presentaron valores de revenido y/o trabajabilidad del concreto menores de acuerdo con el incremento del porcentaje de Tule incorporado a la mezcla, esto debido a la capacidad de absorción de agua que aún tenía la fibra de Tule, sin embargo, se obtuvo un concreto más ligero y amigable con el medio ambiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Instituto Politécnico Nacional la financiación de este trabajo en el marco del proyecto IPN-SIP 20231307 y 20230611, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) y concretos Tancol.

6. REFERENCIAS

- Ali M, Liu A, Sou H and Chouw N 2012 Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete *Constr. Build. Mater.* 30 814–25
- Arbelaez O-F, Delgado K-A, Castañeda J-D 2023 Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio: *Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr.* 62 5 443–451
- Baldenebro-Lopez F J 2014 Influence of continuous plastic fibers reinforcement arrangement in concrete strengthened *IOSR J. Eng.* 4 15–23
- Bledzki A K, Mamun A A and Volk J 2010 Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties *Compos. Sci. Technol.* 70 840–6
- Castañeda Ma D, Santamaría-Juárez J D, Linares Ruíz V, Ramírez-Guzman M E, Juárez M. M, Velasco H. Á, Águila A. E, Munguía P. R, Rivera A and Báez R. A 2022 Caracterización fisicoquímica de material particulado del Popocatepetl, trayecto Atlixco-Puebla, y su impacto en la salud y el ambiente *Acta Univ.* 32 1–22
- Dima S-O, Panaitescu D-M, Orban C, Ghiurea M, Doncea S-M, Fierascu R, Nistor C, Alexandrescu E, Nicolae C-A, Trică B, Moraru A and Oancea F 2017 Bacterial Nanocellulose from Side-Streams of Kombucha Beverages Production: Preparation and Physical-Chemical Properties *Polymers* 9 37
- Ka Khei L, Verma R, Yin Tan E L, Ismail D and Mohamad Asri M N 2023 Forensic analysis of nail polish traces on different substrates using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods *Forensic Chem.* 34 100503
- Liu C, Li M, Mei C, Chen W, Han J, Yue Y, Ren S, French A D, Aita G M, Eggleston G and Wu Q 2020 Cellulose nanofibers from rapidly microwave-delignified energy cane bagasse and their application in drilling fluids as rheology and filtration modifiers *Ind. Crops Prod.* 150 112378
- Loiaza J M, Zamudio M A, Lozano S, Alfaro A, Garcia M T, García J C and Lopez F 2021 Characterization and usage of tule (*Typha domingensis* Pers) to obtain cellulose pulp in a biorefinery framework *BioResources* 16 3328–47
- Micheal A and Moussa R R 2021 Investigating the Economic and Environmental Effect of Integrating Sugarcane Bagasse (SCB) Fibers in Cement Bricks *Ain Shams Eng. J.* 12 3297–303
- Onuaguluchi O and Banthia N 2016 Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review *Cem. Concr. Compos.* 68 96–108
- Pandey R, Jose S and Sinha M K 2022 Fiber Extraction and Characterization from *Typha Domingensis* *J. Nat. Fibers* 19 2648–59
- Ren G, Yao B, Ren M and Gao X 2022 Utilization of natural sisal fibers to manufacture eco-friendly ultra-high performance concrete with low autogenous shrinkage *J. Clean. Prod.* 332 130105
- Rojas-Morales J L, Gutiérrez-González E C and Colina-Andrade G D J 2016 Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola *Ing. Investig. Tecnol.* 17 453–62
- Santos R M D, Flauzino Neto W P, Silvério H A, Martins D F, Dantas N O and Pasquini D 2013 Cellulose nanocrystals from pineapple leaf, a new approach for the reuse of this agro-waste *Ind. Crops Prod.* 50 707–14



Sellami A, Merzoud M and Amziane S 2013 Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers *Constr. Build. Mater.* 47 1117–24
Torres Jaramillo D, Morales Vélez S P and Quintero Díaz J C 2017 Evaluación de pretratamientos químicos sobre materiales lignocelulósicos *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* 25 733–43





Biomateriales sustentables para construcciones eco-amigables.

M. Soria-Castro¹, J. Genescá-Llongueras¹,
G. I. Hernández-Bolio², P. Castro-Borges^{2*}
*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

¹ Unidad de Investigación y Tecnología Aplicadas, UNITA, Facultad Química. UNAM. Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, PIIT, 66628 Apodaca, NL

²Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación discute el uso de biomateriales sustentables en morteros de cemento en la infraestructura, en este sentido, puede ser tanto para mejorar calidad de los materiales, así como para su recuperación. El aditivo natural proviene de la extracción orgánica de la corteza del árbol *Albizia tomentosa*, típico de la región de Yucatán. La caracterización del extracto por RMN reveló la presencia de fenoles como epicatequina y carbohidratos como la sacarosa. Otras técnicas de caracterización por DRX y MEB fueron empleadas para el cemento y los agregados determinando su composición mineralógica, morfología y análisis elemental. Para determinar la mejora del aditivo orgánico a una concentración de 5mg/ml durante los procesos de hidratación y curado de la mezcla, se midieron las propiedades de resistividad eléctrica, absorción de agua por capilaridad y la velocidad de propagación de ultrasonido de los morteros de cemento comparándose con el mortero control, a un tiempo de curado de 7, 28 y 96 días. De manera general, los resultados mostraron que el uso del biomaterial probado puede mejorar la durabilidad y recuperación de estructuras de concreto.

Palabras clave: Biomateriales; Extracto orgánico; Morteros de cemento.

1. INTRODUCCIÓN

El cemento es el material más utilizado en el sector de la construcción a nivel mundial, sin embargo, cada tonelada de cemento fabricada con clinker Portland es responsable de un alto consumo de energía y de las emisiones de CO₂ que van desde los 0.7 a 0.8 toneladas aproximadamente (Li et al., 2011). Además, es muy probable que estos valores aumenten cada año, ya que la industria de la construcción pretende infraestructuras renovadas e innovadoras para satisfacer las expectativas de la sociedad. En un esfuerzo por reducir estos valores y disminuir el impacto del calentamiento global, diferentes países de todo el mundo han sustituido el cemento Portland ordinario por el cemento Portland compuesto (CPC) que conlleva importantes cambios en la elaboración del cemento. Además, que se están realizando numerosos intentos para ampliar la durabilidad y el ciclo de vida de los materiales de construcción y aumentar su sustentabilidad con el uso de aditivos orgánicos (Schmidt, 2018; Dvorkin, 2014; Soria-Castro, 2024).

Desde la época de los Mayas, los aditivos orgánicos a base de morteros de cal fueron utilizados como recubrimientos para la conservación de elementos arquitectónicos ya que mejoran sus propiedades físicas e hídricas (dureza, porosidad, absorción de agua y permeabilidad) (García-Solís and Benavides, 2013). Estos aditivos orgánicos provenían de la corteza de árboles como *el chakaj* (*Bursera simaruba*), *jabin* (*Piscidia piscipula*) y *chukum* (*Havardia albicans*) típicos de la región de Yucatán. Los morteros de cal se utilizaban en varias partes del mundo para mejorar su durabilidad (Zhai et al., 2023) hasta la llegada del cemento, que tiene varias ventajas sobre él. Los morteros de cemento y el concreto se utilizan para construir estructuras expuestas a condiciones ambientales agresivas que pueden provocar su deterioro y, por tanto, una reducción de su vida útil. A partir de esto, recientemente buscando la sustentabilidad y durabilidad de las estructuras, se han aplicado morteros de cemento con resina *de chukum*, demostrando que tienen propiedades impermeables e inhibitoras contra el moho, además de tener un tono natural minimalista (Ordóñez-Melken et al., 2019). La Península de Yucatán posee una flora distintiva particularmente rica en especies de Leguminosae (Carnevali Fernández-Concha et al., 2010), cuya corteza arbórea está enriquecida con compuestos que tienen una amplia gama de propiedades. Entre estas especies se encuentra *Albizia tomentosa*, un árbol de tamaño pequeño a mediano; su corteza es gris/marrón y estriada horizontalmente (Rico-Arce et al., 2008). Aunque no se han realizado estudios fitoquímicos, se espera que tenga compuestos polifenólicos similares que podrían mejorar las propiedades del cemento (El-Khodary et al., 2021).

Por ello, este trabajo de investigación inicia los estudios para la sustentabilidad del concreto a través de la incorporación en los morteros de cemento aditivos orgánicos provenientes de la flora regional yucateca, con abundantes moléculas, para obtener un biomaterial de construcción amigable con el medio ambiente. El aditivo se extrajo de la corteza del árbol *Albizia tomentosa* por maceración en agua y se adicionó a los morteros de cemento para realizar pruebas de durabilidad: resistividad eléctrica, propagación de velocidad de ultrasonido y absorción de agua por capilaridad, además de resonancia magnética nuclear (RMN), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).



2. METODOLOGIA

El proyecto de investigación siguió los lineamientos de la norma mexicana de durabilidad NMX-C-530-ONNCCE-2018 (2019), la cual, proporciona métodos, procedimientos, criterios, etc. para poder diseñar, inspeccionar, diagnosticar, reparar, rehabilitar o reforzar estructuras de concreto u otros elementos como morteros y pastas de cemento con criterios de durabilidad que están sometidos a diferentes tipos de ambientes agresivos en el país.

2.1 Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación fueron CPC, agregados típicos de la región de la Península de Yucatán, y el extracto orgánico proveniente de la corteza del árbol nativo de la Península de Yucatán *Albizia tomentosa* que pertenece a la familia *Fabaceae* como ejemplo, el árbol *chukum*. Información taxonómica disponible en el sitio digital Flora, con la base de datos del herbario del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY-Flora digital, 2023).

La metodología para la extracción orgánica consiste en obtener fragmentos de la corteza del árbol *Albizia tomentosa*. Los fragmentos se pesaron y se colocaron inmediatamente en agua desionizada durante 24h para extraer los compuestos de alta polaridad. A continuación, se filtró y liofilizó un pequeño volumen del sobrenadante (color rojo) y el resultante del extracto de la *Albizia* se obtuvo en polvo (EAP) para su caracterización fisicoquímica. El rendimiento resultante de la extracción fue de 5mg/ml, y posteriormente se analizó por RMN. El extracto *Albizia* en solución (denominada EAS) restante, se utilizó para la preparación de mezclas de mortero de cemento (Figura 1).



Figura 1. Metodología para la extracción orgánica de la corteza de *Albizia tomentosa* y la preparación de los morteros de cemento con el aditivo orgánico.

2.2 Caracterización fisicoquímica

2.2.1 Perfiles de RMN del EAP

Los experimentos de RMN se realizaron a 25 °C en un espectrómetro Varian-Agilent AR Premium Compact de 600 MHz (14.1 T). El EAP se re suspendió en 600 µl de agua deuterada que contenía 0.05% de TSP como referencia de desplazamiento químico, posteriormente se transfirió a un tubo de 5 mm. El análisis fue de protón (^1H) y carbono (^{13}C) utilizando la secuencia *s2pul* con 128 y 50

000 escaneos, respectivamente. Se llevaron a cabo experimentos adicionales de RMN 2D como gHSQC para apoyar la identificación de los metabolitos detectados.

2.2.2 Análisis mineralógico por DRX

Los análisis de difracción de rayos X en polvo (XRD Siemens D-5000) se realizaron con una geometría Bragg-Brentano y radiación Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) con un tamaño de paso = $0,02^\circ$, $t = 3 \text{ s}$, $10^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$, y el patrón se determinó usando la base de datos XRD del Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS). Esta técnica se utilizó para caracterizar los agregados y el CPC.

2.2.3 Análisis morfológico y composición elemental por MEB

La morfología, el tamaño de partícula y el análisis químico fueron corroborados por Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FE-SEM, JEOL JSM- 7600F) en un microscopio equipado con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) a 25 kV. Esta técnica se utilizó para caracterizar los agregados y el CPC.

2.3 Preparación y caracterización de los morteros de cemento

Se analizaron un total de 18 morteros de cemento con las dimensiones de $6.5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$, utilizando una proporción agregados:CPC (3:1), la relación agua/cemento fue de 0.5 (a/c) y la concentración del EAS fue de 5 mg/ml. La cantidad de agregados se calculó de acuerdo con la NMX-C-077-1997-ONNCCE (1998). El EAS se incorporó durante la mezcla del cemento y luego se colocaron en un molde de silicón, después de las 24 horas en el molde se retiraron y se colocaron en una solución de cal al 3% dejándolos curar durante 7, 28 y 96 días.

Los morteros de cemento se prepararon de la siguiente manera: 9 morteros de cemento de control y 9 morteros de cemento con el EAS (biomateriales), todos fueron evaluados mediante técnicas no destructivas para determinar la durabilidad del concreto, como son: resistividad eléctrica, la velocidad de propagación de ultrasonidos y la absorción de agua por capilaridad. Todos estos parámetros fueron medidos en un tiempo de curado de 7, 28 y 96 días, con el propósito de evaluar la mejora en las propiedades eléctricas, físicas e hídricas de los morteros de cemento con el aditivo orgánico.

2.3.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de los morteros por el método directo se midió de acuerdo con la NMX-C-514-ONNCCE-2016 (2016). Para calcular la resistencia al paso de cargas eléctricas se utilizó la ley de Ohm con la siguiente ecuación 1:

$$R_e = \frac{E}{I} \quad (1)$$

Donde R_e es la resistencia eléctrica ($k\Omega$) que se mide aplicando la relación de voltaje E y el paso de corriente I . La resistividad eléctrica ($k\Omega\cdot\text{cm}$) se obtuvo mediante la ecuación 2:

$$\rho = R_e k \quad ; \quad k = \frac{A}{L} \quad (2)$$



Donde ρ es la resistividad eléctrica, A es el área del mortero (cm^2) y L es la longitud del mortero (cm).

2.3.2 Velocidad de propagación de ultrasonido

La velocidad de propagación de ultrasonido (V_p) evaluó la mejora de las propiedades físicas de los morteros (a mayor velocidad, mayor densidad del material y menor porosidad). La V_p se midió como se especifica en la NMX-C-275-ONNCCE-2004 (2004), y el tiempo de propagación de la onda se midió utilizando un instrumento pulser CNS Electronics PUNDIT. Para este estudio, se realizaron tres mediciones por cada mortero mediante el modo de transmisión/recepción directa, a través de lados paralelos opuestos de las muestras en las tres direcciones espaciales (ejes X, Y, Z).

2.3.3 Absorción de agua por capilaridad

Se determinó la absorción de agua por capilaridad para analizar el comportamiento hídrico a través del mortero siguiendo los procedimientos descritos en la NMX-C-504-ONNCCE-2015 (2015). Esta técnica muestra la cantidad de agua absorbida expresada por el incremento de masa del mortero y la unidad de área, por la raíz cuadrada del tiempo ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$). Se monitoreó la cantidad de agua absorbida a los tiempos de 1, 5, 10, 20, 30 min y 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 h.

3. RESULTADOS

3.1 Perfiles de RMN del EAP

La Figura 2 muestra el espectro $^1\text{H-NMR}$ del extracto orgánico (EAP), donde se detectaron señales características del flavonoide epicatequina en la región aromática (6.00 - 7.50 ppm, círculo). También se observan resonancias amplias, que sugieren la presencia de taninos, conocidos por mejorar las propiedades de los morteros de cemento. Además, las señales en la región de 3.00 - 5.00 ppm se asignaron a la sacarosa, una molécula disacárida compuesta de glucosa y fructosa. La presencia de las moléculas encontradas en el EAP por RMN pueden mejorar sustancialmente las propiedades de los materiales de construcción. Otros autores han estudiado el refuerzo y la mejora de los materiales de construcción mediante la interacción entre productos naturales e hidratos de cemento. Por ejemplo, Zhang et al., (2023) añadieron un 0.025% de ácido tánico al cemento curado con calor, mejorando su grado de hidratación lo que dio lugar a un aumento de la resistencia a la compresión y a la flexión de las pastas de cemento. Otro estudio reciente, utiliza el ácido tánico en el tratamiento de finos de concreto reciclado para sustituir parcialmente al cemento Portland. Entre los beneficios del tratamiento se encuentran la reducción de la porosidad y las grietas del mortero de cemento, mejorando, al mismo tiempo, la densidad de empaquetamiento de los productos de hidratación, etc. (Wang et al., 2022).

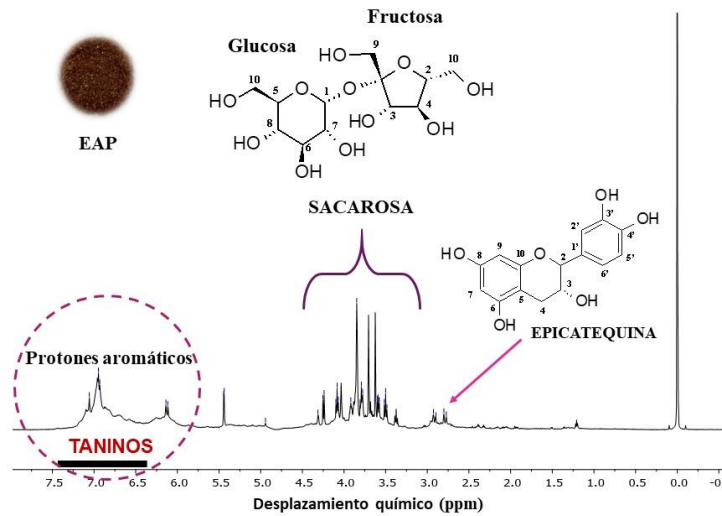


Figura 2. Espectro por $^1\text{H-NMR}$ (D_2O , 600 MHz) del EAP y las estructuras moleculares de los principales metabolitos detectados.

3.2 Detección de la composición mineralógica por DRX

Los resultados por DRX del CPC muestra que el pico principal corresponde a la calcita (CaCO_3), seguido del silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), también conocida como alita (C3S) que es un mineral que forma productos de hidratación. Además, se encontraron fases menos intensas del compuesto anhidrita (CaSO_4), que es un inductor de la hidratación y hatruida (Ca_3SiO_5) que es una forma de C3S (Chinh et al., 2021). Se observaron trazas de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) que son producto del medio ambiente (Figura 3a). Para los agregados el difractograma mostró únicamente el pico de la calcita (Figura 3b).

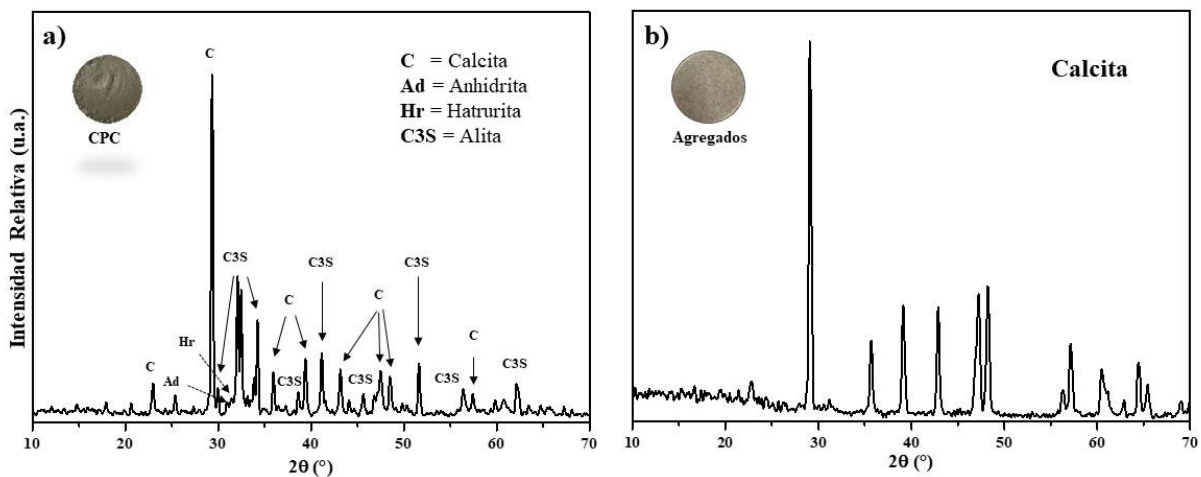


Figura 3. Difractograma de rayos X: a) CPC y b) agregados

3.3 Morfología y análisis elemental por SEM

La Figura 4 muestra las imágenes por MEB del CPC y su composición elemental en dos zonas distintas, a) y b), con características diferentes. En la zona a) se observa una forma amorfa, es decir,

difícil de definir, y la zona b) muestra una morfología cúbica con un tamaño de partícula de aproximadamente $7\ \mu\text{m}$ y con partículas pequeñas entre 0.1 y $0.5\ \mu\text{m}$ incrustadas.

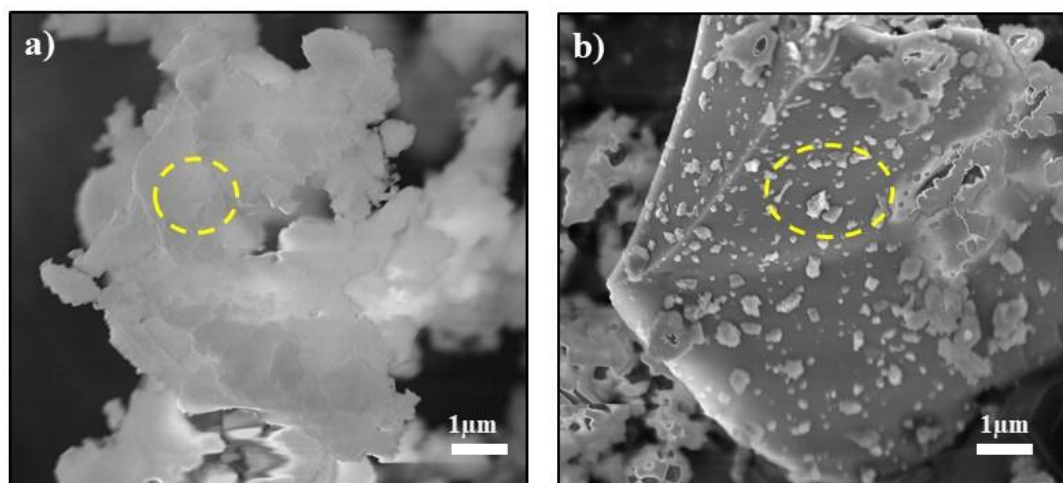


Figura 4. Imágenes por MEB del CPC en dos zonas diferentes. a) y b).

El análisis elemental mostró que la composición química de la zona a) es 23% C, 46% O, 8% Si, 3% S y 20% Ca y para la zona b), se encontraron los elementos al 9% C, 38% O, 10% Si, 3% S, 34% Ca y 4% Mg, además, se detectó el elemento Mg (2%). Los elementos presentes en la CPC confirmaron los compuestos detectados por DRX.

3.4 análisis granulométrico

Los resultados del análisis de granulometría se muestran en la Figura 5, que corresponde al porcentaje de peso de los agregados que pasan a través del número de malla correspondiente. El agregado (curva negra) cumple con los límites de la NMX-C-077-1997-ONNCCE (1998) (curvas rojas). El valor calculado de agregados finos, es decir, el módulo de finura es de 2.8 por lo que se confirma que puede considerarse óptimo para la construcción.

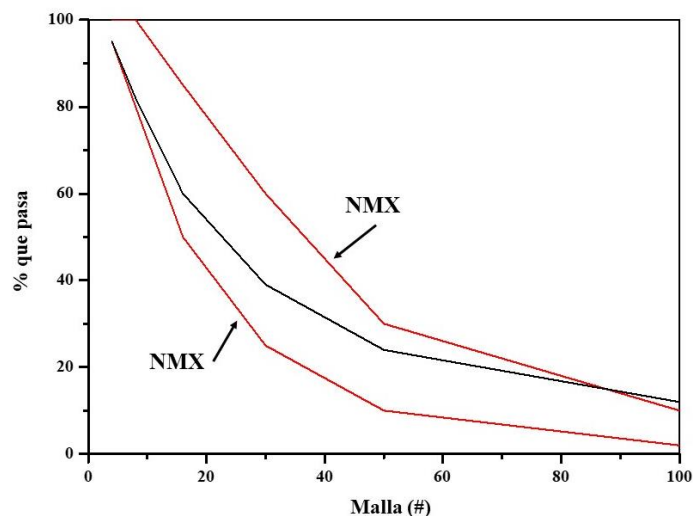


Figura 5. Caracterización granulométrica de los agregados y ejemplos del tamaño de las mallas.

3.5 Caracterización de las propiedades eléctricas, físicas e hídricas de los morteros de cemento

El extracto orgánico se aplicó a una concentración de 5mg/ml durante los procesos de hidratación y curado de las mezclas de cemento, después se midieron las propiedades de resistividad eléctrica, absorción capilar de agua y velocidad de propagación ultrasónica de los morteros de cemento y se compararon con el mortero control, a un tiempo de curado de 7, 28 y 96 días.

Los resultados de la resistividad eléctrica para los biomateriales fueron, 12.44 ± 0.015 , 7 días, 15.75 ± 0.002 , 28 días y 22.40 ± 0.004 , 96 días $k\Omega \cdot cm$ (Figura 6), este efecto de aumento de los valores en el tiempo de curado, He et al., (2021) lo atribuye al hecho de que, en las primeras etapas de curado, los poros dentro de la mezcla pueden ser utilizados como una vía conductora interna, lo que se traduce a mayor conductividad eléctrica menor resistividad eléctrica. En este sentido, con el aumento del tiempo de curado se puede observar que los valores aumentan. Esta misma tendencia creciente se produce en los morteros control después de los 7 días ($11.77 \pm 0.022 k\Omega \cdot cm$) de curado, es decir, a los 28 y 96 (15.13 ± 0.015 , $19.91 \pm 0.036 k\Omega \cdot cm$, respectivamente).

Ahora bien, el aumento de estos valores de la resistividad eléctrica de los morteros de cemento con el aditivo orgánico y los morteros control, se pueden explicar con los resultados obtenidos por DRX del CPC. Dado que, la resistividad del mortero de cemento está relacionada con la continua reacción de hidratación del cemento, es decir, la presencia de alita en el CPC, que al reaccionar con el agua forman los silicatos e hidróxidos de calcio que son los principales productos de hidratación (Dorn et al., 2022). Otro compuesto óptimo detectado en el CPC es el sulfato de calcio (anhidrita), del que se dice que induce la hidratación del C3S (Cabrera-Luna et al., 2021). y que tiene propiedades adhesivas y cohesivas capaces de unir fragmentos minerales en presencia de agua, ayudando así a formar un mortero de cemento más compacto y denso. Además, los patrones de difracción del CPC y los agregados muestran picos de carbonatos como $CaCO_3$ (pico principal) y $CaMg(CO_3)_2$ (traza) que al hidratarse empiezan a reaccionar químicamente en hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio según el tiempo de curado.

Sin embargo, los biomateriales presentaron valores más altos de resistividad eléctrica que los morteros control (Figura 6), esto se le puede atribuir a que los taninos y la sacarosa presentes en el EAS a una concentración de 5mg/ml posiblemente disminuyeron la formación de grietas, esto se puede observar por el aumento de su resistividad y la estabilidad en los datos obtenidos de la desviación estándar. En cuanto al mecanismo de acción para *A. tomentosa*, es posible que la polimerización de los taninos, y otros polifenoles, conduzca a un aumento del tamaño molecular, rellenando así las microfisuras producidas durante la hidratación del cemento y mejorando propiedades como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón, como se ha visto en el caso de las mezclas de extractos de uva y morera (Mahmood et al., 2021). Por otro lado, el uso de sacarosa a una concentración adecuada aumentó la resistencia a la compresión de los morteros a 28 días y se mostró más compacto y denso por el análisis MEB (Khazma et al., 2008) mientras que, a bajas concentraciones, retrasó el tiempo de fraguado de las pastas por reducción de la hidratación de C3S y sin cambios significativos en la evolución del límite elástico (Tramontin-Souza et al., 2022). En consecuencia, la mejora de las propiedades físicas de durabilidad podría deberse a la presencia de los taninos y otros polifenoles como la epicatequina, que tienden a formar estructuras sólidas, disminuyendo la porosidad.



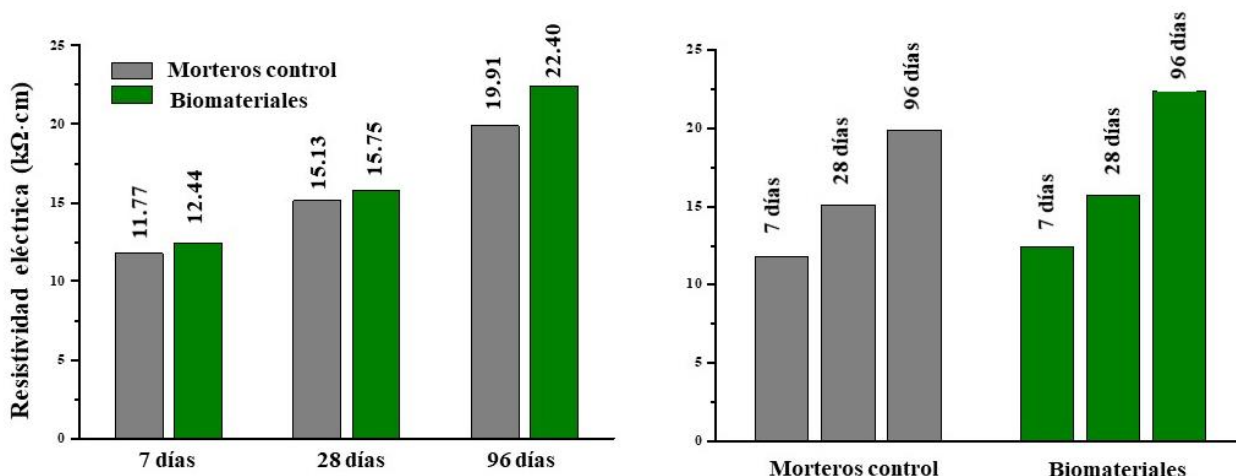


Figura 6. Comparación de los valores de resistividad eléctrica (kΩ·cm) de las mezclas de mortero a base de cemento y curadas durante 7, 28 y 96 días.

La Tabla 1 muestra que los valores más bajos corresponden a un tiempo de curado de 7 días y los más altos a 96 días. La incorporación de EAS al mortero de cemento mejoró sus propiedades de durabilidad al rellenar los poros internos, haciendo al mortero más homogéneo y compacto, en relación al incremento de su velocidad ultrasónica de 7 a 96 días, lo que demuestra que el tiempo de curado también fue un factor importante. Estos resultados de la V_p confirmaron los resultados de la resistividad eléctrica, ya que mejora las propiedades de durabilidad de los morteros de cemento cuando se mezclan con los aditivos orgánicos.

Tabla 1. Valores promedio de V_p

Curado	m/s	Morteros control	Biomateriales
7 días	V_p	973 ± 32	1006 ± 12
28 días	V_p	1025 ± 10	1056 ± 5
96 días	V_p	1266 ± 15	1345 ± 6

En la Figura 7 se muestran las curvas de absorción de agua, que representan la masa del mortero de cemento (Kg/m^2) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($\text{s}^{1/2}$), con estos datos se obtuvo su coeficiente de capilaridad. A partir de los resultados del coeficiente de capilaridad, se pudo observar que los biomateriales, obtuvieron una menor absorción de agua en los tiempos de curado de 7, 28 y 96 días respecto al mortero de cemento control, respectivamente (Figura 7 y Tabla 2). El mecanismo de acción podría estar influenciado por las fuerzas capilares (tensión superficial, adhesión y cohesión) (Jiang et al., 2020), pero se necesitan varios estudios para confirmar esta hipótesis. Estos resultados son muy importantes para la industria civil, dado que los morteros, al ser un material de construcción que puede estar expuesto al ambiente tropical, el agua absorbida contiene comúnmente una alta concentración de sales solubles (Cl^- , SO_4^{2-}) y esos iones tendrán ciertamente un efecto destructivo en el concreto armado (Castro-Borges and Mendoza-Rangel, 2010).



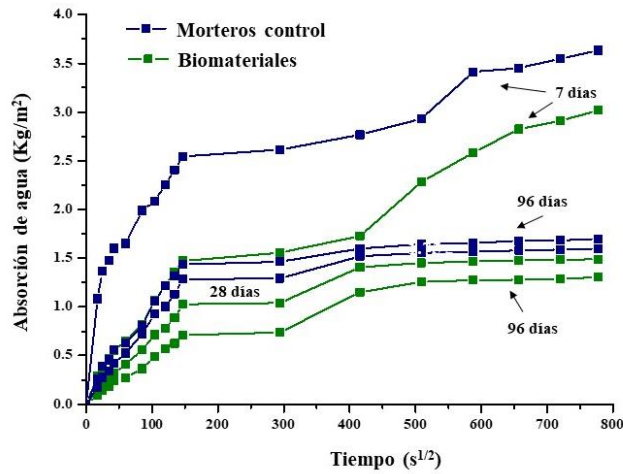


Figura 7. Curvas comparativas de la absorción de agua por capilaridad en diferentes tiempos de curado

Tabla 2 Valores del coeficiente capilar

Curado	Morteros control	Biomateriales
	(kg/m ² s ^{1/2})	(kg/m ² s ^{1/2})
7 días	0.0123	0.0085
28 días	0.0081	0.0065
96 días	0.0082	0.0045

4. CONCLUSIONES

Los mejores resultados se obtuvieron a los 96 días en los morteros de cemento con el extracto orgánico de *Albizia tomentosa*, mostrando una ligera pero clara mejora de la resistividad eléctrica, velocidad de propagación de ultrasonidos y en el coeficiente de absorción agua por capilaridad. Los taninos y la sacarosa presentes en el extracto probablemente ayudaron a disminuir la formación de grietas en los morteros de cemento, dando lugar a un aumento del tamaño molecular, rellenando así las microgrietas producidas durante la hidratación del cemento y mejorando sus propiedades. La caracterización de los agregados, y del cemento fue beneficiosa ya que conocer su composición mineralógica, ayudó a explicar los procesos de reacción y la formación de los productos de hidratación como el hidróxido de calcio a partir del mineral alita. Por lo tanto, el uso del aditivo orgánico evaluado puede mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto.

5. AGRADECIMIENTOS

Una de las autoras, Montserrat Soria Castro, agradece el apoyo financiero posdoctoral de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico [DGAPA] a través del proyecto, «Programa de Becas Posdoctorales en la UNAM», y agradece a la Facultad de Química de la UNITA-UNAM, Monterrey N.L. institución anfitriona. Los autores también agradecen a la Ing. Mercedes Balancan Zapata por su valiosa ayuda en la comprensión y medición de los morteros de cemento, así como a la M.C Alexia Zozaya Ortiz por su asistencia en las pruebas de capilaridad en el CINVESTAV,



Mérida. Gracias también a la Dra. Patricia Quintana Owen responsable del Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBio) del CINVESTAV, Mérida por el uso de los laboratorios y sus instrumentos de caracterización (Proyecto SCORE No. 101007531).

6. REFERENCIAS

- Cabrera-Luna, K., Maldonado Bandala, E.E., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P., Perez-Cortes, P., Escalante García, J.I. (2021), *Supersulfated cements based on pumice with quicklime, anhydrite and hemihydrate: Characterization and environmental impact*. Cem. Concr. Compos. 124:104236.
- Carnevali Fernández Concha, G., Tapia Muñoz, J.L., Duno de Stefano, R., Ramírez-Morillo, I.M. (2010), Flora ilustrada de la Península de Yucatán: listado florístico, E-Publish CICY, México.
- Castro Borges, P., Mendoza Rangel, J.M. (2010), *Influence of climate change on concrete durability in Yucatan peninsula*. Corros. Eng. Sci. Technol. 45:61-69.
- Chinh Chu, D., Kleib, J., Amar, M., Benzerzour, M., Abriak, N. (2021), *Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: Scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA)*. Case Stud. Constr. Mater. 15:e00754.
- Dorn, T., Blask, O., Stephan, D. (2022), *Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures*. Constr. Build. Mater. 323:126554.
- Dvorkin, L., Dvorkin, O., Garnitsky, Y., Ribakov, Y. (2014), *Adhesive and cohesive properties of glue cement mortars with addition of organic–mineral modifiers*. Mater. Des. 53:588-595.
- El Khodary, Y.A., Ayoub, I.M., El Ahmady, S.H., Ibrahim, N. (2021), *Molecular and phytochemical variability among genus Albizia: a phylogenetic prospect for future breeding*. Mol. Biol. Rep. 48:2619-2628.
- Flora digital, *Albizia Tomentosa*. https://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/ficha_virtual.php?especie=1508 (2023).
- García-Solís, C.A., Jáidar Benavides, Y. (2013), *El uso de aditivos orgánicos en mezclas de morteros de cal en el área maya*, Eds. L.B. Pingarrón, I. Villaseñor-Alonso. La cal historia propiedades y usos. E-publish, México. 115-138.
- He, W., Jiao, Z., Wang, Y., Xu, J., Zhao, Q. (2021), *Research on the mechanical properties and electrical conductivity of cement mortar based on recycled nano-iron boride*. Waste Dispos. Sustain. Energy. 3:155-164.
- Jiang, L., Ke, W., Ming-Liang, Q. (2020), *Experimental determination on the capillary water absorption coefficient of porous building materials: A comparison between the intermittent and continuous absorption tests*. J. Build. Eng. 28:10109.
- Kalyana-Chakravarthy, P.R., Ilango, T., Pugazhenth, R. (2022), *Mechanical properties of concrete with foundry sand and coconut shell as partial replacement for coarse and fine aggregate*. Materials Today:Proceedings. 52:537-543
- Khazma, M., Hajj, N.E., Goullieux, A., Dheilily, R.M., Queneudec, M. (2008), *Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementious matrix*. Composites: Part A Appl. Sci. Manuf. 39:1901-1908.
- Li, C., Gong, X.Z., Cui, , Wang, Z.H., Zheng, Y., Chi B.C. (2011), *CO₂ emissions due to cement manufacture*. Materials Science Forum: Trans Tech Publ. 181-187.



- Mahmood, H.F., Dabbagh, H., Mohammed, A.A. (2021), *Comparative study on using chemical and natural admixtures (grape and mulberry extracts) for concrete*. Case Studies in Construction Materials. 15 e00699.
- NMX-C-077-1997-ONNCCE. Industria de la construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico. Publicada 1998.
- NMX-C-275-ONNCCE-2004, Industria de la construcción - Concreto - Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto - Método de ultrasonido. Publicada 2004.
- NMX-C-504-ONNCCE-2015, Industria de la construcción - Determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico - Método de ensayo. Publicada 2015.
- NMX-C-514-ONNCCE-2016, Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo. Publicada 2016.
- NMX-C-530-ONNCCE-2018 Industria de la Construcción - Durabilidad - Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Criterios y Especificaciones. Publicada 2019.
- Ordóñez Melken A.G., Rodríguez Poot, C.B., Gómez Pinzón, J.A., Navarrete Canto, N.M. (2019), *Mortero arquitectónico a base de resina del árbol de chukum*. Ava Cient VII. 107-114.
- Rico-Arce, M.L., Gale, S.L., Maxted, N. (2008), *A taxonomic study of Albizia (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) in México and Central America*. Anales Jar. Bot. Madrid. 65(2):255-305.
- Schmidt, W., Tchetgnia Ngassam, I.L., Olonade, K.A., Mbugua, R., Kühne, H. (2018), *Plant based chemical admixtures – potentials and effects on the performance of cementitious materials*. RILEM Technical Letters. 3:124-128.
- Soria Castro M., Genescá Llongueras J., Hernández Bolio, G.I., Castro Borges, P. (2024), *Characterization of cement mortars with regional organic and inorganic additives*. RSC Adv. 13;14(22):15468-15482
- Tramontin Souza, M., Dors Sakata, R., Onghero, L., Colares-Magalhães, L. C., Maduro de Campos, E., Novaes de Oliveira, A. P., Longuini-Repette, W. (2022), *Insights into the “accelerating effect” of sucrose on cement pastes*. J. Build. Eng. 59:105053.
- Wang, L., Wang, J., Wang, H., Fang, Y., Shen, W., Chen, P., Xu, Y. (2022), *Eco-friendly treatment of recycled concrete fines as supplementary cementitious materials*. Constr. Build. Mater. 322:126491.
- Zhai, K., Zhang, B., Zhu, L. (2023), *A new proposed semi-quantitative method for the organic additives analysis in traditional lime mortar*. J. Cult. Herit. 62:284–292.
- Zhang, J., Kang, Z., Yang, Y., Dong, B., Ma, H. (2023), *Enhancement of heat-cured cement paste with tannic acid*. Cem Concr. Compos. 137:104931





Construcción y caracterización de un palafito de concreto en el Golfo de México: Un enfoque en durabilidad y sostenibilidad.

J. A. Briceño-Mena^{1,2} M. G. Balancán-Zapata¹, M. T. Castillo Burguete³,
A. A. Torres Acosta⁴, P. Castro-Borges^{1*}
*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

¹ Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

² Investigador por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Ciudad de México, México.

³ Departamento de Ecología Humana, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Mérida, México.

⁴ Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores, Tecnológico de Monterrey, Campus Querétaro, Querétaro, México

RESUMEN

Este estudio analiza la durabilidad y el comportamiento electroquímico de una subestructura tipo palafito prefabricada, expuesta a un entorno marino tropical agresivo en la costa de Yucatán. Para ello, se llevó a cabo un monitoreo sistemático durante cinco años, evaluando parámetros electroquímicos como el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica. De forma complementaria, se registraron las condiciones ambientales (humedad relativa y temperatura) mediante cámaras de acceso instrumentadas, colocadas estratégicamente en las columnas de concreto reforzado. Los resultados obtenidos indicaron, a partir del potencial de corrosión, una baja probabilidad de corrosión en las armaduras. La velocidad de corrosión fue clasificada como despreciable, conforme a los criterios normativos vigentes, mientras que la resistividad eléctrica superó consistentemente los umbrales mínimos, lo que refleja una baja porosidad en el concreto y su capacidad para limitar la penetración de agentes agresivos. El sistema de monitoreo continuo, adaptado a un ambiente marino adverso, permitió observar la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo, concluyendo que el diseño y la estrategia de monitoreo implementados garantizan una solución estructural duradera y sostenible, adecuada para enfrentar las condiciones severas de zonas costeras.

Palabras clave: Palafitos; Corrosión; Durabilidad; Concreto reforzado; Inundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras de México, particularmente aquellas situadas en el Golfo de México, enfrentan los efectos devastadores de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes y tormentas tropicales. Estos eventos traen consigo inundaciones causadas por el aumento de las mareas, poniendo en riesgo tanto la integridad física de los habitantes como su seguridad económica. La exposición constante a ambientes marinos, caracterizados por la alta salinidad y humedad, representa un riesgo adicional para las estructuras construidas en estas regiones. Ante esta problemática, desde el año 2000, en la comunidad de San Crisanto, en Yucatán, se han desarrollado soluciones basadas en la construcción de palafitos de concreto reforzado, diseñados para soportar condiciones ambientales severas y prolongar su vida útil mediante estrategias de durabilidad. Este proyecto ha sido desarrollado por Cinvestav, Unidad Mérida, en colaboración con varias instituciones/empresas como Cemex, Galvex y las Facultades de Arquitectura e Ingeniería Civil de la UADY, y ha evolucionado a través de cinco generaciones de palafitos, cada una optimizada para enfrentar mejor los efectos de la corrosión.

El diseño de estas estructuras utiliza pilas y trabes de concreto reforzado, que están en constante exposición a ambientes altamente corrosivos debido a la salinidad y la humedad del entorno. Para prolongar la vida útil de estas estructuras, es fundamental comprender el comportamiento electroquímico de la subestructura, en particular en relación con la corrosión.

Para obtener un panorama detallado sobre el comportamiento de la estructura, a lo largo de un periodo de cinco años, se llevó a cabo una evaluación de la resistividad eléctrica, así como mediciones electroquímicas como la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión, adicionalmente se realizó el seguimiento de la humedad relativa y la temperatura mediante el uso de métodos y equipos especializados. Estos parámetros se midieron periódicamente con el fin de monitorear de cerca cómo la exposición prolongada al ambiente tropical marino afecta los componentes estructurales del palafito, en particular aquellos que están constantemente expuestos a altos niveles de salinidad y humedad (U. Angst et al., 2009; Broomfield, 2023; Cao et al., 2019). El análisis conjunto de estos datos permitirá determinar si la subestructura mantiene un desempeño estable y resistente frente a las duras condiciones ambientales, además de proporcionar una descripción detallada del proceso de construcción y de la caracterización electroquímica de los palafitos, que han sido diseñados con estrictos criterios de durabilidad.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de la quinta generación de palafitos prefabricados mediante un monitoreo de la resistividad, de la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión, la humedad relativa y la temperatura. Estos datos, recopilados durante más de cinco años, proporcionan una visión integral sobre la eficacia del diseño y su resiliencia frente a las condiciones adversas del ambiente marino tropical.

2. METODOLOGÍA

2.1 Detalles constructivos

La subestructura está compuesta por trabes, trabe-losa, columnas y dados de cimentación. Estos elementos fueron prefabricados en una planta industrial en la ciudad de Mérida, lo que permitió un control de calidad en la fabricación.

2.1.1 Instalación de Fitters

Los “fitters” son dispositivos de diseño propio, desarrollados para permitir el ingreso de equipos

de medición al interior del concreto, sin afectar sus propiedades o integridad estructural. Se instalaron en cada columna y trabe de la subestructura de los palafitos, con el objetivo de llevar a cabo el seguimiento continuo de las condiciones internas del concreto y tener un medio de contacto eléctrico con el refuerzo de los elementos. Su función es clave para medir parámetros como la temperatura, la humedad relativa y los valores de corrosión electroquímica de las armaduras, proporcionando datos críticos para evaluar la durabilidad y el desempeño de la estructura en ambientes marinos adversos (Pacheco-Torgal et al., 2019). La ubicación de los fitters es permite que los datos recolectados sean representativos de las condiciones reales del concreto, dado que los gradientes de temperatura y humedad pueden variar en función de su exposición al ambiente exterior.

La instalación de los fitters se llevó a cabo a través de un proceso planificado. Primero, fueron fijados directamente a las armaduras de los elementos estructurales antes de que estos fueran colocados en las cimbras. Este paso aseguraba que los sensores estuvieran en contacto directo con el acero de refuerzo, permitiendo una medición precisa del comportamiento electroquímico. Después, los elementos con los fitters incorporados fueron colocados en las cimbras, y se procedió al colado del concreto, procurando que los fitters quedaran encapsulados sin generar vacíos o interferencias que pudieran afectar su desempeño. Una vez colados y fraguados los elementos, se descimbraron, asegurando la permanencia de éstos. En la Figura 1, se observa la disposición de los fitters en una columna típica, destacando su integración con la armadura y su encapsulamiento dentro del concreto.

Los fitters han demostrado ser una herramienta apropiada que permite detectar las variaciones de temperatura y humedad en el interior del concreto. Por ejemplo, los datos obtenidos han mostrado un aumento en la humedad relativa interna durante la temporada de lluvias, lo que podría correlacionarse con una mayor probabilidad de corrosión en áreas vulnerables. Estos datos ayudan a comprender mejor el comportamiento de la subestructura bajo las condiciones del ambiente tropical marino, permitiendo realizar ajustes en el diseño y en las prácticas constructivas para mejorar la durabilidad de futuras generaciones de palafitos. El uso de fitters no solo ha permitido la comprensión del comportamiento de las estructuras en ambientes tropicales marinos, sino que también ha sentado las bases para estrategias de monitoreo continuo en tiempo real. Este enfoque puede replicarse en otros proyectos de infraestructura costera, asegurando un diseño más resiliente y adaptado a las condiciones específicas de cada entorno.

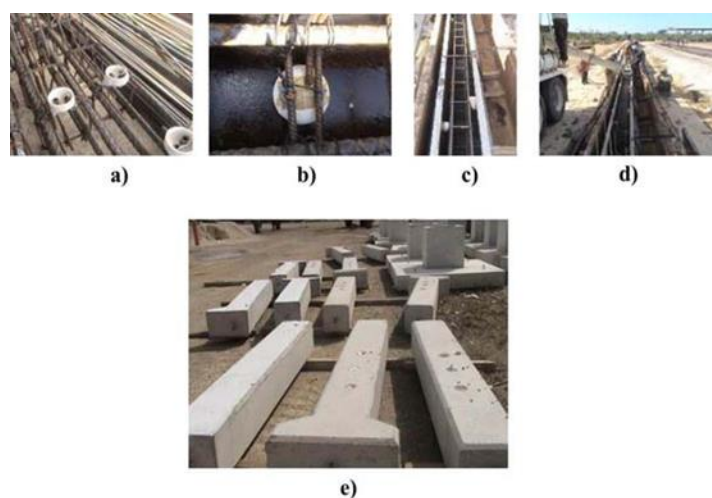


Figura 1. Instalación de Fitters.

2.1.2 *Ensamble de la subestructura tipo palafito.*

Una vez completada la fabricación de las piezas prefabricadas en la planta industrial ubicada en Mérida, estas fueron trasladadas al sitio de construcción en la costa. Este traslado requirió la planeación de la logística, dado que los elementos prefabricados son piezas grandes y pesadas que deben manipularse con cuidado para evitar daños. Durante este proceso, se emplearon vehículos de transporte equipados con sistemas de sujeción que garantizaban la estabilidad de las piezas durante el recorrido. El proceso de ensamblaje e instalación de la subestructura tipo palafito se llevó a cabo con base en un plan que incluyó la preparación del terreno, la instalación de la cimentación y el montaje de los elementos prefabricados, siguiendo los planos y especificaciones técnicas. Este procedimiento garantiza la estabilidad y durabilidad de la estructura, particularmente en un entorno marino como el del Golfo de México. En la Figura 3, se ilustra el proceso de instalación, que abarcó las siguientes etapas:

Excavación: Se realizó una excavación en el terreno para preparar el área donde se instalaría la cimentación. Este paso permitió tener un terreno estuviera nivelado y compacto.

Colocación de anillos de concreto: Los anillos de concreto fueron colocados en las excavaciones para formar la base de la cimentación tipo ciclópea.

Ciclópeo alrededor de los anillos: Se colocaron piedras locales alrededor de los anillos y se procedió al ciclópeo, una técnica que aumenta la resistencia de la cimentación frente a las cargas verticales y los movimientos del terreno.

Colado de la plantilla: Una vez completada la cimentación ciclópea, se vertió una plantilla de concreto que proporcionó una superficie nivelada para el montaje de los dados prefabricados.

Montaje de dados y elementos prefabricados: Los dados prefabricados se colocaron sobre la plantilla y, posteriormente, se ensamblaron las columnas, traveses y traveses-losas siguiendo un orden para garantizar la correcta distribución de cargas.

Colado de la capa de compresión: Finalmente, se realizó el colado de la capa de compresión, que actúa como un sistema monolítico que unifica los elementos y refuerza la estructura.

El ensamblaje de la subestructura fue supervisado para que cada elemento quedara correctamente alineado y anclado. Este proceso es crucial para garantizar que la estructura pueda resistir las cargas dinámicas y estáticas, así como las condiciones adversas del ambiente costero.



Figura 3. Instalación y ensamblaje de la subestructura tipo palafito.

2.1.3 Observaciones sobre supervisión en la construcción

En los proyectos de construcción, es habitual encontrar algunos detalles que, aunque no siempre son evidentes al inicio, pueden manifestarse con el tiempo y afectar tanto el rendimiento como la durabilidad de la estructura. Estos detalles suelen estar relacionados con errores durante la fase de manufactura de los elementos estructurales o con una ejecución deficiente en las etapas de concreto, particularmente en el colado y compactación del concreto (Neville & Brooks, 2010). A pesar de contar con una supervisión durante la construcción de la subestructura de los palafitos, se identificaron algunos detalles que podrían comprometer la durabilidad de la subestructura a largo del tiempo.

Uno de los detalles se observó en la columna A, donde se detectaron pequeñas oquedades en la superficie del concreto, como se puede observar en la Figura 2. Las oquedades son un indicativo de que, durante el proceso de colado del concreto, no se logró eliminar el aire atrapado en la mezcla o no se llevó a cabo una vibración suficiente para compactar el material.



Figura 2. Porosidad en la cara este de la columna A

Otro problema que se detectó fue la presencia de pequeñas filtraciones de agua en áreas específicas de la estructura. Estas filtraciones se atribuyen a un descuido durante el colado de la capa de compresión. Esto resultó en una fractura en la instalación hidráulica, lo que permitió el paso de agua hacia otras áreas de la estructura. Las filtraciones de agua en una estructura de concreto reforzado son preocupantes, especialmente en ambientes costeros, ya que la humedad persistente no solo reduce la resistividad eléctrica del concreto, también promueve la corrosión del acero. Si no se corrigen, estas filtraciones pueden acelerar el proceso de deterioro, comprometiendo tanto la durabilidad de la subestructura como la seguridad de la construcción.

La presencia de cloruros en el agua filtrada puede acelerar la corrosión, generando expansión del acero, fisuración del concreto y, eventualmente, una reducción en la capacidad de carga de la estructura. Para mitigar los efectos de estos detalles, es fundamental implementar un mantenimiento preventivo regular, que incluya inspecciones periódicas a través del uso de técnicas no destructivas, como medición de resistividad, y reparación inmediata de las filtraciones en la instalación hidráulica para evitar que el agua continúe penetrando en la estructura.

2.2 Técnicas de medición

El seguimiento de los parámetros electroquímicos y ambientales del comportamiento de los palafitos se realizó de forma periódica, aproximadamente cada tres meses. Sin embargo, en ocasiones, el intervalo de medición fue más amplio debido a factores externos. Estos parámetros

son fundamentales para evaluar el estado de la subestructura de concreto reforzado, particularmente en lo relacionado con la corrosión del acero de refuerzo y la capacidad de la estructura para soportar las condiciones agresivas del entorno costero.

Antes de proceder con las mediciones de velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad, es necesario realizar las mediciones ambientales ya que los niveles de humedad y temperatura influyen directamente en los procesos de corrosión. Posteriormente, se humectan los elementos para evitar que la falta de humedad altere los resultados.

2.2.1 Parámetros electroquímicos.

El monitoreo de los parámetros incluye la resistencia óhmica y los electroquímicos como la medición del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión (Ramón et al., 2021; Xia et al., 2022). Para llevar a cabo estas mediciones, se utilizó un corrosímetro comercial (Gcorr 6), un equipo especializado que emplea la técnica de resistencia a la polarización. Este equipo permite obtener mediciones precisas del comportamiento electroquímico del acero de refuerzo, lo cual es fundamental para detectar y controlar los procesos de corrosión que podrían comprometer la durabilidad de la estructura.

En la Figura 4, se puede observar el uso del corrosímetro en uno de los elementos estructurales del palafito. Para garantizar que las mediciones sean representativas, se ubicaron seis puntos de medición en cada columna: tres en la barra oeste y tres en la barra este, distribuidos a alturas de 40 cm, 80 cm y 110 cm desde el Nivel de Piso Terminado (NPT).



Figura 4.- Proceso de medición con el Gcorr 6.

Para las traveses, la orientación de los puntos de medición fue de norte a sur, como se indica en la Figura 5. Estos puntos estratégicos permiten obtener un perfil detallado de cómo varía la corrosión a lo largo de la estructura, lo cual es crucial para identificar las áreas más vulnerables y aplicar medidas preventivas. Sin embargo, en este trabajo se presenta únicamente el caso de las columnas.

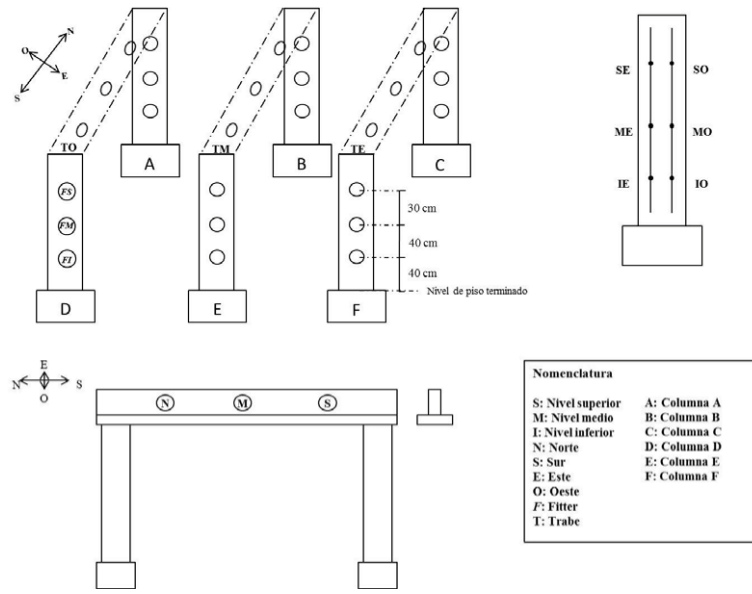


Figura 5. Croquis de la subestructura tipo palafito.

2.2.1.1 Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de corrosión (E_{corr}) es un parámetro clave para evaluar la probabilidad de corrosión en las armaduras embebidas en el concreto. Este potencial, medido con respecto a un electrodo de referencia, proporciona información sobre el estado del acero de refuerzo, aunque este valor, por sí solo, no indica la velocidad de corrosión. Es una herramienta diagnóstica fundamental que debe interpretarse en función de las condiciones ambientales, como la humedad, la contaminación y la calidad del concreto. En el contexto del ambiente costero, donde la estructura está expuesta a alta salinidad y fluctuaciones de temperatura, el E_{corr} se convierte en un indicador esencial para determinar zonas críticas que requieren mantenimiento preventivo. Los criterios de evaluación de E_{corr} se pueden observar en la Tabla 1:

Tabla 1. Criterios de evaluación del potencial de corrosión (E_{corr}) (NMX-C-495-ONNCCE-2015 (aprobada 2021).

E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	Descripción
> -200	10% de probabilidad de corrosión
-200 - -350	Incertidumbre
-350 - -500	90% de probabilidad de corrosión
< -500	Corrosión severa

2.2.1.2 Velocidad de corrosión (i_{corr}).

La velocidad de corrosión (i_{corr}) es uno de los parámetros más críticos para evaluar el deterioro del acero de refuerzo. Este valor, medido en microamperios sobre centímetro cuadrado ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), indica la rapidez con que el acero pierde material debido a la corrosión, lo que permite estimar la vida útil restante de la estructura. En ambientes marinos, como el del Golfo de México, la presencia de cloruros y humedad elevada puede aumentar significativamente la velocidad de corrosión. En condiciones reales, valores superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ya son considerados elevados y pueden reducir la vida útil de la estructura. A continuación, en la Tabla 2 se presentan los criterios para evaluar la

velocidad de corrosión:

Tabla 2. Criterios de evaluación de la velocidad de corrosión (i_{corr}) (NMX-C-501-ONNCCE-2015, 2015).

Velocidad de corrosión		Nivel de corrosión	Estado del concreto
($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	($\mu\text{A}/\text{año}$)		
< 0.1	< 1	Despreciable	Concreto seco o no carbonatado
0.1 – 0.5	1 – 5	Bajo	Concreto saturado o ligeramente húmedo carbonatado o con cloruros
0.5 – 1.0	5 – 10	Moderado	Concreto con alto contenido de humedad, carbonatado o con cloruros
> 1.0	> 10	Alto	Concreto muy contaminado con cloruros

2.2.1.3 Resistividad eléctrica (ρ).

La resistividad eléctrica (ρ) del concreto es otro indicador importante, mide la capacidad del concreto para resistir el flujo de corriente eléctrica, está directamente relacionado con su porosidad y capacidad de transportar agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Una baja resistividad indica un mayor riesgo de corrosión, ya que facilita el transporte de cloruros y agua hacia el refuerzo. Aunque no existe un consenso general sobre el límite exacto de resistividad por debajo del cual el riesgo de corrosión es despreciable, en la práctica se utiliza la clasificación de la Tabla 3 como referencia:

Tabla 3. Criterio de evaluación de resistividad eléctrica (ρ) (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

Resistividad ($\text{k}\Omega \text{ cm}$)	Probabilidad de corrosión
> 100 - 200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 - 100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.



2.2.2 *Parámetros ambientales del concreto.*

Los parámetros ambientales, como la humedad relativa y la temperatura dentro del concreto, son fundamentales para comprender los procesos de corrosión. Estos factores son cruciales, ya que el ambiente marino en el que se encuentra la estructura del palafito está caracterizado por altas fluctuaciones de humedad y temperatura, que pueden influir en los procesos de corrosión (Bouteiller et al., 2012; Chauhan & Sharma, 2019; Villagrán Zaccardi et al., 2013).

Para medir estos parámetros, se utilizó un sensor digital Vaisala, que mide la temperatura y la humedad relativa a una profundidad de 6 cm dentro del concreto. En la Figura 6 se muestra la sonda del medidor introducida en los fitters. Esta configuración asegura que las mediciones reflejen las condiciones reales del interior del concreto, sin verse afectadas por las condiciones externas.



Figura 6. Medición de temperatura y humedad relativa en columna.

3. RESULTADOS

El proyecto de los palafitos en la costa de Yucatán ha permitido realizar un monitoreo de largo plazo para evaluar la durabilidad y el comportamiento estructural de estas construcciones prefabricadas establecidas en un ambiente tropical marino. A lo largo de cinco años se ha llevado a cabo un seguimiento detallado de los parámetros electroquímicos y ambientales, fundamentales para analizar el estado de la subestructura en términos de resistencia a la corrosión y la capacidad para soportar las condiciones agresivas de alta salinidad y humedad, propias del entrono costero. Los resultados de las mediciones realizadas con el corrosímetro mostraron que la mayoría de los elementos estructurales mantenían un estado pasivo en las armaduras de refuerzo. Las mediciones del E_{corr} según la Figura 7, indicaron que todas las columnas tuvieron valores más positivos que -200 mV, lo cual indica que se tiene un 10% de probabilidad de corrosión según los criterios establecidos en la normatividad mexicana. Sin embargo, debido a que esta técnica es cualitativa, se debe llevar a cabo la verificación en aquellas áreas específicas donde se detecten defectos de construcción como oquedades o filtraciones y donde el potencial de corrosión sea menor que -250 mV (U. M. Angst, 2019). Por lo anterior, se procedió a verificar la velocidad de corrosión de todas las columnas como se muestra en la Figura 8.

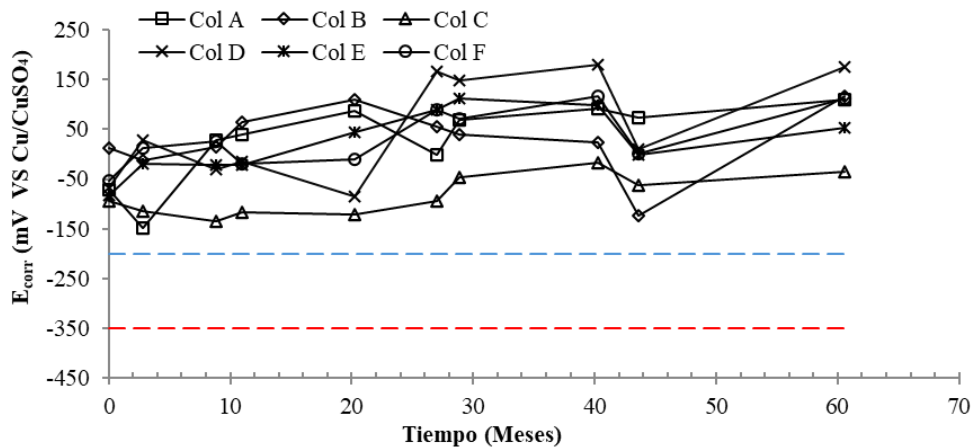


Figura 7. Resultados de E_{corr} de todas las columnas.

La velocidad de corrosión se mantuvo en general por debajo de $0.1 \mu A/cm^2$, lo cual es considerado un nivel de corrosión bajo. En los puntos donde se identificaron defectos en el concreto, los valores de i_{corr} no presentan un comportamiento distinto a los demás elementos, indicando que estas oquedades encontradas son muy superficiales y no afectan el recubrimiento sobre el acero. Estas zonas solo se apreciaron visualmente y, por lo tanto, pueden conllevar un sistema de reparación superficial.

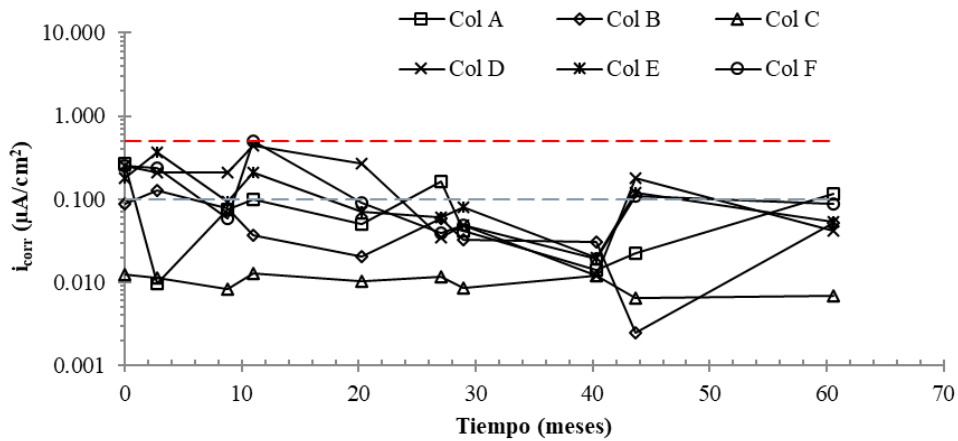


Figura 8. Resultados de i_{corr} de todas las columnas.

La resistividad eléctrica del concreto en la mayoría de los casos fue cercana o superior a $50 k\Omega \cdot cm$ como se puede observar en la Figura 9, lo que señala un bajo riesgo de corrosión debido a la dificultad para el transporte de iones en el interior del concreto. La baja resistividad inicial de todos los elementos se debe a que, con el paso del tiempo, la matriz del concreto se va secando y adensando. Esto resalta la importancia de la calidad del concreto y la integridad estructural para mantener la protección pasiva del acero de refuerzo. La columna B presenta las mayores resistividades superando los $100 k\Omega \cdot cm$, lo que indica que el concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. En el caso de la columna A, donde se observaron las oquedades, podemos apreciar que la resistividad es superior a $50 k\Omega \cdot cm$, teniendo una alta densidad en el concreto, confirmando así que se trata de detalles superficiales.

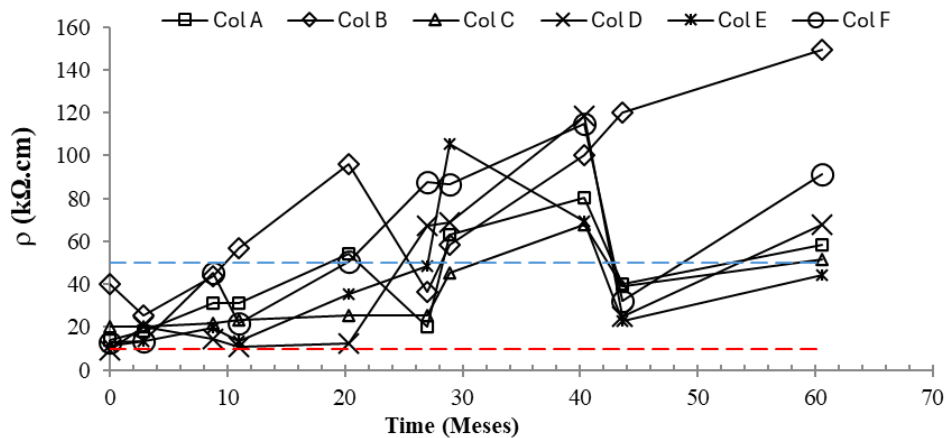


Figura 9. Resultados de resistividad de las columnas.

Las mediciones de la Figura 9 mostraron una variabilidad estacional significativa, donde se pueden observar resistividades bajas que podrían asociarse a la temporada de lluvias, lo que incrementa el riesgo de corrosión en estas épocas. Por otra parte, los niveles de humedad por encima del 80% mostrados en la Figura 10, durante estos periodos, sugieren que el concreto se encuentra en un estado que favorece la formación de capas de humedad en la superficie del acero, aumentando la conductividad eléctrica y, por lo tanto, la velocidad de corrosión. Las fluctuaciones de temperatura, típicas de la región, también afectaron ésta, ya que las temperaturas más altas aceleran las reacciones electroquímicas. No obstante, estas variaciones no generaron cambios drásticos en la velocidad de corrosión.

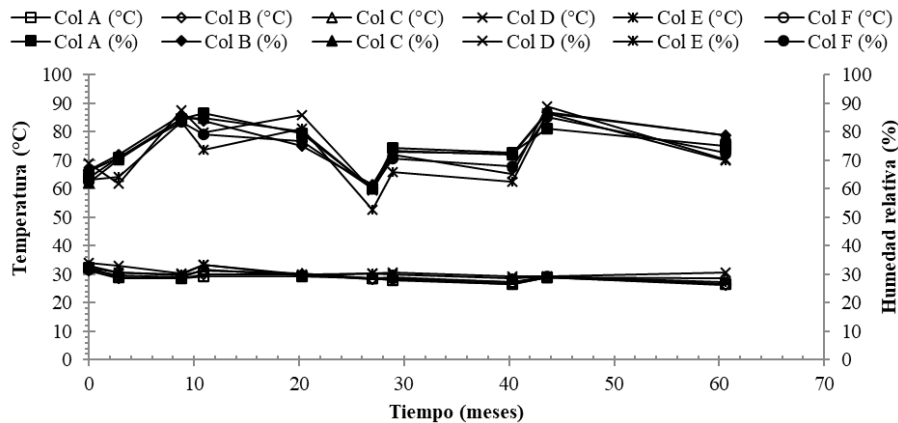


Figura 10. Resultados de humedad relativa y temperatura de las columnas.

4. DISCUSIÓN

A lo largo de un periodo de cinco años, se han llevado a cabo pruebas continuas de caracterización electroquímica, y los resultados hasta la fecha indican que la mayoría de los elementos estructurales son adecuados para su uso en la construcción de palafitos. Los datos recolectados sugieren que, en general, la subestructura mantiene un buen comportamiento frente a la corrosión, con niveles de velocidad de corrosión bajos a moderados en la mayoría de los puntos monitoreados. Las columnas

con alta densidad y recubrimiento adecuado presentaron valores bajos de i_{corr} y resistividad elevada, lo que indica una resistencia a la corrosión. Se observó un comportamiento de pasividad en las armaduras de refuerzo, lo que significa que el acero está protegido contra la corrosión bajo las condiciones actuales. Los valores de i_{corr} y E_{corr} registrados son consistentes con investigaciones previas realizadas en estructuras marinas, lo que valida las estrategias de diseño adoptadas para los palafitos. Por otra parte, la influencia de la humedad relativa y la temperatura en el comportamiento del concreto no es tan evidente, pero sí apreciable. La humedad, especialmente durante la temporada de lluvias, ha demostrado ser un factor que incrementa el riesgo de corrosión (Mehta & Monteiro, 2014). Por lo tanto, es importante considerar estrategias de mantenimiento para mitigar estos efectos, incluyendo el sellado de fisuras y la aplicación de recubrimientos protectores. Un programa de inspección post-construcción ayuda a identificar y corregir cualquier detalle que se presente en las primeras etapas de la vida útil de la estructura (Bertolini et al., 2013). Las reparaciones tempranas pueden evitar que los pequeños defectos se conviertan en problemas mayores, lo que podría comprometer la durabilidad de la estructura en el largo plazo. La instalación de fitters y el uso de técnicas electroquímicas para el monitoreo continuo han demostrado ser herramientas valiosas para evaluar la durabilidad de la estructura. La recopilación sistemática de datos permite no solo detectar áreas de riesgo, sino también optimizar los planes de mantenimiento y realizar intervenciones correctivas de manera oportuna.

5. CONCLUSIONES

El proyecto de los palafitos y su monitoreo ha demostrado que las estructuras prefabricadas son una solución viable y sostenible en entornos marinos donde se presentan fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, siempre que se sigan prácticas de diseño, construcción y mantenimiento rigurosas. Los datos obtenidos ofrecen una base sólida para mejorar el diseño de futuras generaciones de palafitos y optimizar las estrategias de mantenimiento para garantizar su durabilidad a largo plazo.

Aunque los defectos detectados en la subestructura de los palafitos fueron localizados, su presencia resalta la importancia de la supervisión estricta durante las etapas de colado, compactación y ensamblaje.

6. AGRADECIMIENTOS

A la M.C. Alexia Zozaya, a la M.C. Jasset Puc y al Ing. Ricardo Martín por su apoyo en la recolección de datos

7. REFERENCIAS

- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- Angst, U. M. (2019). Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides. *Cement and Concrete Research*, 115, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.007>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete - Prevention, Diagnosis, Repair* (2nd ed.). Wiley-VCH.

<https://doi.org/10.1002/3527603379>

Bouteiller, V., Cherrier, J. F., L'Hostis, V., Rebolledo, N., Andrade, C., & Marie-Victoire, E. (2012). Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(3–4), 471–480. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.668004>

Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>

Cao, Y., Gehlen, C., Angst, U., Wang, L., Wang, Z., & Yao, Y. (2019). Critical chloride content in reinforced concrete — An updated review considering Chinese experience. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 117, pp. 58–68). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.020>

Chauhan, A., & Sharma, U. K. (2019). Influence of temperature and relative humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete. *Structures*, 19, 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.016>

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (2nd ed.). Pearson Education.

NMX-C-495-ONNCCE-2015 (reapproved 2021). (2021). *Industria de la construcción–Durabilidad de estructuras de concreto reforzado–Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto–Especificaciones y método de ensayo.*

NMX-C-501-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la construcción–Durabilidad de estructuras de concreto reforzado–Medición de velocidad de corrosión en campo–Especificaciones y método de ensayo.*

NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la construcción–Resistividad eléctrica del concreto hidráulico–Especificaciones y método de ensayo.*

Ramón, J. E., Castillo, & Martínez, I. (2021). On-site corrosion monitoring experience in concrete structures: Potential improvements on the current-controlled polarization resistance method. *Materiales de Construcción*, 71(344). <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11221>

Pacheco-Torgal, F., Vittoria Diamanti, M., Nazari, Ali., Goran Granqvist, Claes., Pruna, Alina., & Amirhanian, Serji. (2019). *Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications* (2nd ed.). Woodhead Publishing.

Villagrán Zaccardi, Y. A., Bértora, A., & Di Maio, A. A. (2013). Temperature and humidity influences on the on-site active marine corrosion of reinforced concrete elements. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(9), 1527–1535. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9994-z>

Xia, D. H., Deng, C. M., Macdonald, D., Jamali, S., Mills, D., Luo, J. L., Strebl, M. G., Amiri, M., Jin, W., Song, S., & Hu, W. (2022). Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: A critical review. In *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 112, pp. 151–183). Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.004>



PATOLOGÍA

DE LAS CONSTRUCCIONES



SECCIÓN 2

PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES (PC)

Diseño teórico de una antena RF para la evaluación de materiales porosos. <i>E. A. Téllez-Guzmán, A. Villarreal, J. López-Aparicio, S. E. Solís-Nájera</i> (PC-232-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)	1
Evaluación actual de corrosión de probetas de concreto expuestas a medio ambiente de la ciudad de Oaxaca. <i>O. V. Santiago-Revilla, Visairo-Méndez, G. Quero-Ramírez, S. O. Ramírez-Martínez, R. F. de B. Pérez-Chávez, M. A. Maldonado-García, E. López-Vazquez</i> (PC-296-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA).	9
Efecto de las contracciones por secado y por carbonatación en estructuras de concreto en servicio. <i>A. A. Torres Acosta</i> (PC-336-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)	16
Parámetros Ultrasónicos para la Estimación de las Propiedades de Durabilidad de Concretos. <i>V. A. Franco-Luján, P. Montes-García, M. A. Maldonado-García</i> (PC-375-MX, CONFERENCIA TEMÁTICA INVITADA)	33
Evaluación por durabilidad de mezclas de mortero y concreto con sustitución de ceniza volante tipo F natural (CV) y Micropartículas de Ceniza Volante (MCV). <i>A. López Miguel, S. F. Gonzalez Gonzalez, J. T. Pérez Quiroz, J. A. Cabello Mendez, A. Moreno Valdez</i> (PC-233-MX)	46
Evaluación de la condición de puentes de concreto reforzado localizados en la costa caribe colombiana. <i>W. Urango, M. Dugarte</i> (PC-244-MX)	58
Análisis del efecto de la adición de fibra de henequén sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado. <i>T. Torrez-Pérez, T. Pérez-López, T. Torrez-Pérez, P. F. J. Cano-Barrita, A. Bacelis-Jiménez</i> (PC-248-MX)	77
Relación entre el tiempo de vida de la señal de RMN y el ancho de grieta en pastas de cemento: un enfoque de resonancia magnética nuclear de campo bajo. <i>F. Díaz-Díaz, P. F. J. Cano-Barrita, F. M. León-Martínez</i> (PC-262-MX)	91
Formación de magnetita in situ en el acero de refuerzo para aumentar la vida útil del concreto armado. <i>R. Sánchez-Torres, E. Onofre-Bustamante, A. C. Espíndola-Flores</i> (PC-264-MX)	98

PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES (PC)

Desarrollo de nanocompuestos híbridos de ZnO, CuO y SiO ₂ para la creación de superficies biocidas e hidrofóbicas en morteros de cemento <i>M. A. Torres-Guzmán, M. Z. Figueroa-Torres, M. Á. Guerra-Cossío, J. R. González-López (PC-268-MX)</i>	107
Efecto del óxido de grafeno en las propiedades de durabilidad del concreto. <i>J. A. Cabello Méndez, J. T. Pérez Quiroz, A. López Miguel, I. C. Castillo Arteaga, A. Moreno Valdes (PC-276-MX)</i>	122
Análisis de daños en estructuras de concreto hidráulico de edificios en ambiente costero del Golfo de México. Estudio de caso. <i>P. Martínez, F. A. Ramírez-Montes, Y. Y. Martínez López, J. L. Borges Cú, A. A. Bacelis-Jiménez, T. Pérez López (PC-288-MX).</i>	133
Estudio de una nueva tipología de estribos de acero embebidos en concreto frente a la corrosión inducida por cloruros. <i>A. Capistrano-García, G. Fajardo-San-Miguel, J. Álvarez-Pérez, R. Orozco-Cruz (PC-303-MX)</i>	143
Análisis de la aplicación de un nanomaterial mesoporoso de partículas de óxido de silicio sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado. <i>T. Torrez Pérez, T. Torrez Pérez, A. Bacelis-Jiménez, W. Talavera-Pech, P. F. J. Cano Barrita, T. Pérez López (PC-316-MX)</i>	162
Análisis de corrosión en estructuras de concreto en una industria de alimentos y deterioro de concretos. <i>A. A. Carreño Avila, P. Vera Verde, L. D. López León, F. Almeraya Carderon, J. Cabral Miramontes, L. G. Lizarraga Mendiola, O. Areu Rangel, O. Caballero Garatachea, I. E. Castañeda Robles, F. J. Olguin Coca (PC-352-MX)</i>	175
Estudio de la durabilidad del concreto modificado con PET-reciclado, mediante la determinación de la resistividad por el método Wenner. <i>A. C. Espíndola Flores, E. Onofre-Bustamante (PC-393-MX)</i>	188



Diseño teórico de una antena RF para la evaluación de materiales porosos

E. A. Tellez-Guzman¹, A. Villarreal^{2,3}, J. López-Aparicio³, S. Solis-Najera^{3*}

*Autor de Contacto: solisnajera@ciencias.unam.mx

¹ Posgrado en Ciencias (Física Médica), Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México.

² Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, 71230 Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

³ Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México.

RESUMEN

La evaluación de materiales mediante ensayos no destructivos (END) con resonancia magnética (RM) ha emergido como una técnica crucial en aplicaciones biomédicas, como injertos óseos y sistemas de liberación de fármacos, así como en el análisis de defectos en la edificación estructural y sus materiales. La RM ofrece información detallada sin dañar las muestras, permitiendo su reutilización y reduciendo costos. Esta técnica revela la microestructura, distribución de fases y posibles defectos de los biomateriales, esenciales para asegurar su calidad, además, caracteriza propiedades físicas y mecánicas a través de técnicas avanzadas como la elastografía, y evalúa la porosidad y la interconectividad de los poros, importantes para la ingeniería de tejidos. La RM también permite estudiar la difusión de líquidos y la permeabilidad, proporcionando información sobre el comportamiento a largo plazo de los biomateriales. Este trabajo tiene como objetivo el diseño de antenas de radiofrecuencia (RF) para sistemas de campo magnético ultra bajo (ULF MRI), maximizando el factor de calidad (Q) y la uniformidad del campo magnético B₁. Para poder optimizar el diseño de la antena RF, se realizó un análisis numérico, validando el diseño de la antena y asegurando su compatibilidad con el sistema de RMN. Este enfoque integral en el diseño de antenas, mediante su análisis numérico previo, mejora la calidad de la señal y minimiza pérdidas y ruido, contribuyendo significativamente al avance en el diseño de antenas RF para la caracterización de materiales y biomateriales.

Palabras clave: Magnética; Biomateriales; Antenas de Radiofrecuencia; Campo Magnético Ultra Bajo; Evaluación No Destructiva.

1. INTRODUCCION

Los efectos de las cargas mecánicas y los efectos ambientales sobre las estructuras de hormigón a menudo conducen al desarrollo de microfisuras, lo que reduce la resistencia y rigidez general de las estructuras al tiempo que aumenta su permeabilidad a agentes agresivos como los iones de cloruro y el dióxido de carbono (CO₂). El agua que transporta agentes agresivos puede viajar a través de estos pequeños caminos para llegar al acero de refuerzo y provocar corrosión.

La demanda de ensayos no destructivos fiables (END) para investigar la calidad del hormigón en estructuras nuevas o existentes ha aumentado drásticamente en las últimas décadas, no solo en el análisis de materiales de edificación estructural, sino también en la evaluación de biomateriales mediante ensayos no destructivos con la técnica de resonancia magnética nuclear (RMN) o simplemente resonancia magnética (RM), por lo que ha emergido como una herramienta altamente beneficiosa debido a su capacidad para proporcionar información detallada de la microestructura sin dañar las muestras (A. M. Neville, 1995). Se puede obtener información adicional sobre la presencia de grietas en materiales utilizando relaxometría de RMN de protones debido a su capacidad de detección de agua evaporable, también se puede emplear para la detección de grietas gracias al agua y gel alojados en poros capilares del material, debido a que los tiempos de relajación son relativamente largos (relajación espín-red (T₁) y de relajación espín-espín (T₂)) (E. Marfisi et al, 2005 y J. J. Young et al, 2004).

Los biomateriales, esenciales en aplicaciones biomédicas como injertos óseos, andamiajes para regeneración tisular y sistemas de liberación de fármacos, requieren una caracterización exhaustiva para asegurar su funcionalidad y biocompatibilidad. La RM ofrece una combinación única de ventajas que la hacen particularmente adecuada para esta tarea (Schaeffers & Melzer, 2011).

La RM permite la preservación completa de las muestras, posibilitando su reutilización en múltiples pruebas y reduciendo costos. Además, proporciona imágenes detalladas de la estructura interna, revelando su microestructura, distribución de fases y posibles defectos, lo cual es esencial para asegurar la calidad y la homogeneidad del material. La técnica también permite la caracterización de propiedades físicas y mecánicas, como la elasticidad y la rigidez, a través de técnicas avanzadas como la elastografía por RM. Asimismo, facilita la evaluación de la porosidad y la interconectividad de los poros, características cruciales para aplicaciones en ingeniería de tejidos, facilitando el estudio de la interacción del biomaterial con el tejido circundante, evaluando la integración y la respuesta biológica, así como la cinética de liberación de fármacos (Aragón Fernández et al., 2010; Kang, 2019; Smith et al., 2015).

2. METODOLOGIA

Los sistemas de resonancia magnética nuclear de campos ultra-bajos operan a frecuencias del orden de Hz para realizar experimentos con campos magnéticos. Sin embargo, estos sistemas enfrentan el desafío de una magnetización insuficiente de la muestra (Halse et al., 2006). El diseño de antenas de radio frecuencia (RF) para sistemas de campo magnético ultra bajo (ULF MRI) requiere una serie de consideraciones específicas debido a la naturaleza y los desafíos únicos de estos sistemas. Algunas consideraciones generales para tener en cuenta son la sensibilidad, la geometría de la antena RF, la compatibilidad con ULF MRI, eficiencia de acoplamiento, consideraciones de seguridad, materiales y diseño del circuito de ajuste de impedancia (Kraus et al., 2014). En los sistemas ULF, la señal recibida es muy débil, por lo que es crucial maximizar el factor de calidad



(Q) y la uniformidad de campo en el área de interés de la antena RF. Un Q alto mejora su sensibilidad, esto se consigue con la forma geométrica de la antena la cual deberá ser optimizada para el tamaño del objeto o la región de interés que se va a estudiar. El uso de técnicas de optimización iterativa con programas especializados en el diseño de antenas puede ayudar a un diseño exitoso, aunque esto puede requerir múltiples iteraciones, ajustando la geometría, los materiales y los componentes del circuito para lograr el mejor desempeño.

Las antenas RF tipo solenoides y tipo Helmholtz son las más comunes para las aplicaciones a ultra bajos campos magnéticos (Buckenmaier et al., 2018), por lo que, para este proyecto se analizó el diseño de una antena tipo solenoide con las siguientes especificaciones técnicas: un campo magnético estático de operación (B0) de 33 μT , una frecuencia de operación de 1403.82 Hz, una longitud de 20 cm y un diámetro de 13 cm.

3.1 Diseño de la antena RF

Como primer paso en el diseño de un solenoide como antena RF para RM es el cálculo de su capacitancia e inductancia. La inductancia L se define como (Ginsberg, 2007):

$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad (1)$$

donde A es el área de la sección transversal ($\pi \cdot r^2$), r es el radio del solenoide (0.06 m) y N es el número de vueltas. Para determinar el número de vueltas, se puede hacer uso de la siguiente expresión derivada de las ecuaciones de Biot-Savart (Taylor, 2021):

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2L} \left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + a^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + a^2}} \right) \quad (2)$$

donde B es el campo magnético, μ_0 es la permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$), I es la corriente en amperes y L es la longitud de la antena en metros. El campo magnético se calcula en función de la posición x con respecto a un punto de referencia situado en el centro del solenoide. Analizando la ecuación 2, y considerando un número de vueltas N igual a 6.12 con corriente unitaria, se realizó la gráfica de campo magnético a lo largo del eje longitudinal o eje z del solenoide (Figura 2):

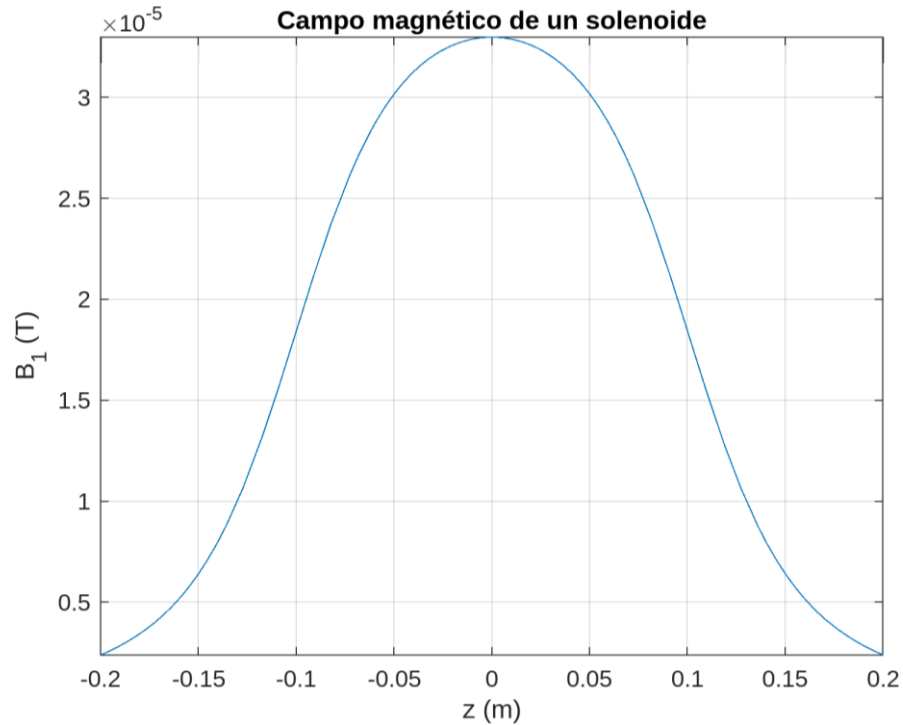


Figura 1. Campo magnético en el eje z del solenoide. En el origen del solenoide se observa una intensidad de campo magnético máximo de 35 micro tesla.

4

Considerando el $N = 6.12$ en la ecuación 1, se puede obtener la inductancia del solenoide:

$$L_m \approx \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 6.12^2 \cdot \pi \cdot (0.06)^2}{0.2} \approx 2.66 \times 10^{-6} \text{ H} \quad (3)$$

La frecuencia de resonancia f_0 de una antena de radio frecuencia está determinada por la inductancia (L) y la capacitancia (C), y se obtiene con la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Lo que permite calcular la capacitancia en función de la frecuencia de operación y de la inductancia del solenoide, por lo que, si se quiere tener una frecuencia de 1403.82 Hz, es necesario tener una capacitancia $C = 4.83$ mF.

En el diseño de antenas RF hay otros factores que pueden modificar la frecuencia de operación, como el cable, la placa de cobre, etc. es una recomendable modificar L o C para poder conseguir un ajuste de la frecuencia. Como L está asociada al factor geométrico, es más común variar C , de tal forma que se pueda realizar este ajuste de frecuencia. Un análisis al variar la capacitancia en la ecuación 4 se observa en la Figura 2.

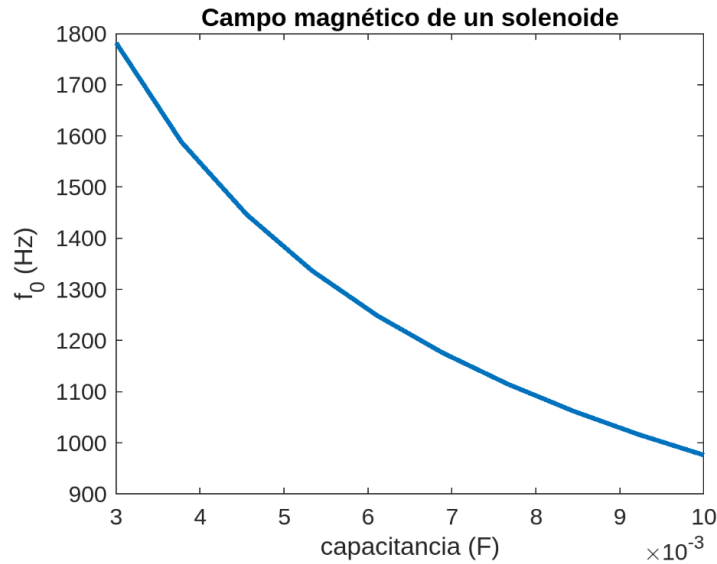


Figura 2. Frecuencia de operación al evaluar el elemento capacitivo.

Estas consideraciones forman la base para el diseño de bobinas de RF eficaces y eficientes en sistemas de ULF, asegurando que se maximice la calidad de la señal y se minimicen las pérdidas y el ruido.

3. MODELADO COMPUTACIONAL

Para poder validar la uniformidad de campo producida por la antena, se realizó una simulación en Matlab (Figura 3 y Figura 4). Para la muestra se consideró el modelo del hueso sintético en base a vóxel, con las siguientes propiedades: tamaño = 0.05 m de diámetro, Permitividad relativa (hueso sintético) = 11.6 y conductividad (hueso sintético) = 0.02. Además, se graficó el campo vectorial en 3 dimensiones, el cual se puede observar en la Figura 5.

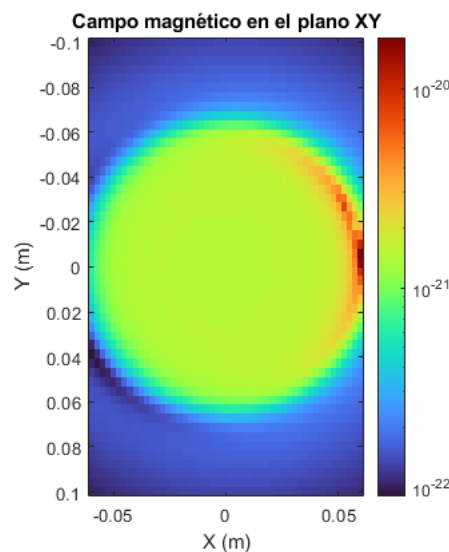


Figura 3. Simulación del campo magnético B1 dentro de un solenoide.

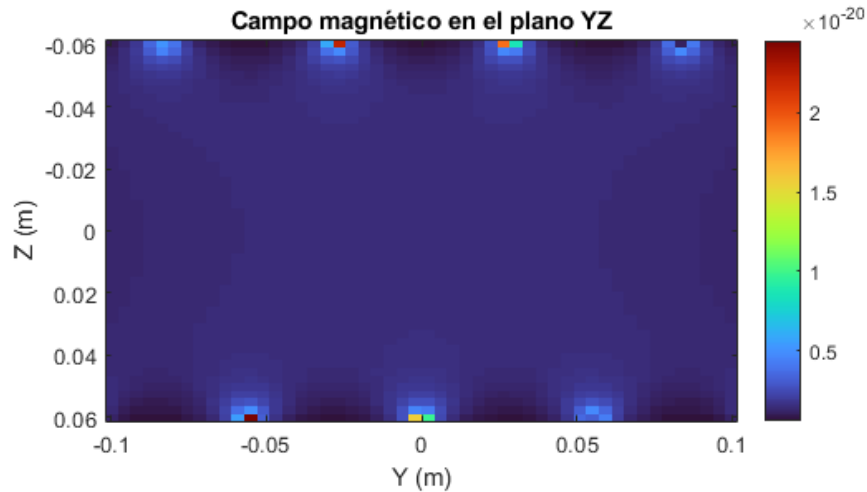


Figura 4. Simulación del campo magnético B1 dentro de un solenoide.

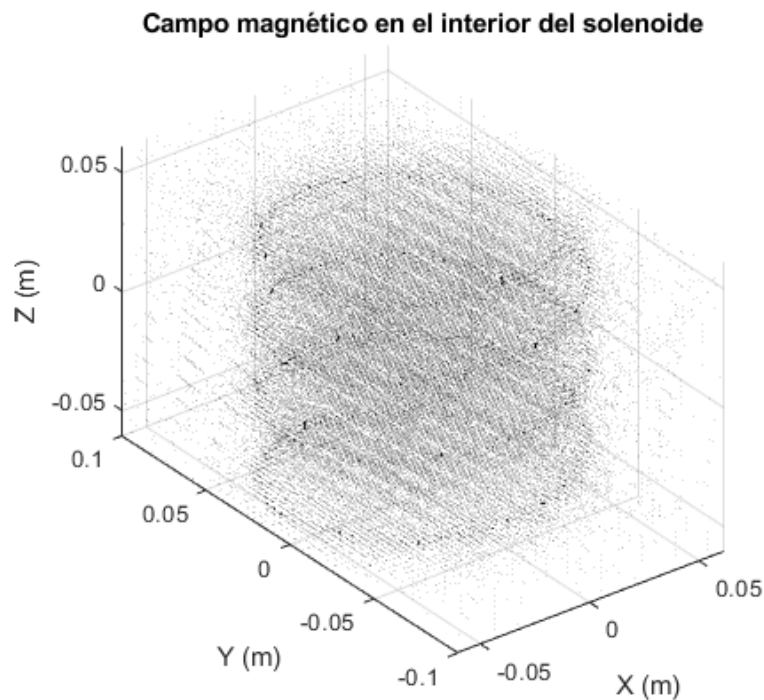


Figura 5. Simulación del campo magnético B1 dentro de un solenoide.

4. RESULTADOS

Con el análisis de la frecuencia de resonancia en función de la capacitancia, se pudo validar el modelo teórico, obteniendo un valor de $C=4.83$ mF que corresponde a una frecuencia de resonancia de 1403.82 Hz. Este resultado no solo confirma la precisión del modelo teórico en predecir las condiciones necesarias para alcanzar la resonancia deseada, sino que también remarca la importancia de una calibración adecuada de los componentes del circuito. La precisión en la

capacitancia es vital para asegurar que la frecuencia de resonancia del sistema sea la adecuada para optimizar el rendimiento del dispositivo.

Por otro lado, el análisis del campo magnético B1, especialmente su uniformidad dentro del solenoide como se muestra en la Figura 3, es significativo. Esta uniformidad es indicativa de un campo magnético bien distribuido, lo que es fundamental para aplicaciones que requieren un campo magnético consistente y homogéneo a lo largo de un eje específico. La representación del campo B1 en las tres direcciones y su máxima intensidad cuando la corriente I es máxima aporta una comprensión más profunda de las dinámicas del campo dentro del solenoide. La Figura 5, que ilustra una gráfica vectorial en 3 ejes del campo B1, ofrece una visualización directa de cómo el campo se mantiene constante a lo largo de aproximadamente 8 cm en el eje z. Esta constancia demuestra que el área efectiva de influencia del campo magnético es adecuada para experimentos que requieran una región de uniformidad para interactuar con las muestras. Este aspecto es especialmente importante si el solenoide se utiliza para experimentos de resonancia magnética, donde la homogeneidad del campo magnético a lo largo de un volumen significativo asegura la calidad y la confiabilidad de los datos obtenidos.

Como se puede observar, estos resultados no solo validan el modelo teórico utilizado, sino que también proporcionan una base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas del dispositivo. La capacidad para predecir y manipular la frecuencia de resonancia y el campo magnético con tal precisión abre nuevas vías para explorar aplicaciones en física experimental e ingeniería biomédica.

5. CONCLUSIONES

El modelo teórico de la antena propuesta demuestra ser capaz de ajustarse a una frecuencia de resonancia $\omega_0 = 1403.82$ Hz, proporcionando una base para aplicaciones en sistemas de resonancia magnética de campo ultra bajo. Las gráficas de campo B1 obtenidas indican una uniformidad adecuada del campo magnético en el interior del solenoide, lo cual es importante para la calidad de las imágenes y la precisión en la evaluación de biomateriales. No obstante, se sugiere que en futuras investigaciones se incorporen aproximaciones numéricas más detalladas utilizando software especializado, lo que permitiría obtener información más precisa sobre los campos eléctricos generados y la distribución de energía en la muestra. Estos avances potenciales podrían mejorar significativamente la eficacia de la antena y su aplicabilidad en diversas áreas biomédicas, fortaleciendo así el uso de técnicas de evaluación no destructiva en la caracterización de biomateriales. Además, la implementación de pruebas experimentales complementarias sería fundamental para validar y optimizar aún más el diseño de la antena, asegurando su compatibilidad y rendimiento en aplicaciones prácticas.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a DGAPA UNAM PROYECTO PAPIME PE103924 por el financiamiento proporcionado, E. Téllez agradece al programa de becas UNAM y A. Villarreal a Conahcyt por la beca otorgada.



7. REFERENCIAS

- Aragón Fernández, J., González Santos, R., & Esteves Gastón, F. (2010). Estudio in vitro de liberación de fármacos desde un biomaterial compuesto. *Revista CENIC*, 41, 1–8.
- Buckenmaier, K., Rudolph, M., Fehling, P., Steffen, T., Back, C., Bernard, R., Pohmann, R., Bernarding, J., Kleiner, R., Koelle, D., Plaumann, M., & Scheffler, K. (2018). Mutual benefit achieved by combining ultralow-field magnetic resonance and hyperpolarizing techniques. *Review of Scientific Instruments*, 89(12), 125103.
- Ginsberg, J. (2007). Inductance of a solenoid. *Physics for Science & Engineering II*. Recuperado de: <https://pages.charlotte.edu/physics/inductance-of-a-solenoid/>
- Halse, M. E., Coy, A., Dykstra, R., Eccles, C., Hunter, M., Ward, R., & Callaghan, P. T. (2006). A practical and flexible implementation of 3D MRI in the Earth's magnetic field. *Journal of Magnetic Resonance*, 182(1), 75–83.
- Kang, C. (2019). Applications of in-cell NMR in structural biology and drug discovery. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(1), 139.
- Kraus, R., Espy, M., Magnelind, P., & Volegov, P. (2014). *Ultra-Low Field Nuclear Magnetic Resonance: A New MRI Regime*. Oxford University Press.
- Marfisi, E., Burgoyne, C. J., Amin, M. H. G., & Hall, L. D. (2005). The use of MRI to observe fractures in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 57, 111-121.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). Prentice Hall.
- Schaefers, G., & Melzer, A. (2011). Devices and materials in MRI. En *Springer Berlin Heidelberg* (pp. 503–521). Berlin, Heidelberg.
- Smith, M. J., Marshall, C. B., Theillet, F.-X., Binolfi, A., Selenko, P., & Ikura, M. (2015). Real-time NMR monitoring of biological activities in complex physiological environments. *Current Opinion in Structural Biology*, 32, 39–47.
- Taylor, R. (2021). The On-Axis Magnetic Field for a Single, Helical Turn Coil. *The Physics Teacher*, 59(6), 455-458.
- Young, J. J., Szomolonyi, P., Bremner, T. W., & Balcom, B. J. (2004). Magnetic resonance imaging of crack formation in hydrated cement paste materials. *Cement and Concrete Research*, 34, 1459-1466.



Evaluación actual de corrosión de probetas de concreto expuestas a medio ambiente en la ciudad de Oaxaca

O.V. Santiago-Revilla¹, R. Visairo-Mendez², G. Quero-Ramírez², S.O. Ramírez-Martínez³,
R. F. de B. Pérez-Chávez⁴, M.A. Maldonado-García⁵, E. López-Vázquez^{3*}

*Autor de Contacto: elopez@itoaxaca.edu.mx

¹ Estudiante de Maestría en Construcción, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

² Departamento de Ciencias de la tierra, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México, Oaxaca, México.

³ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México, Oaxaca, México.

⁴ Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México, Oaxaca, México

⁵ Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de Oaxaca, Tecnológico Nacional de México, Oaxaca, México

RESUMEN

El concreto reforzado es uno de los materiales mayormente empleados en infraestructura. Sin embargo, este puede sufrir deterioro debido a diversas causas, entre ellas la corrosión del acero embebido. Los factores climáticos son una variable muy importante en dicho proceso. Considerando lo anterior, en esta investigación se ha evaluado el riesgo actual de corrosión de probetas de concreto reforzado expuestas a medio ambiente en la ciudad de Oaxaca durante 20 años. Para los experimentos se consideraron tres distintos recubrimientos de concreto y dos relaciones agua/cemento. Se realizaron pruebas de resistencia la polarización lineal transcurrido este periodo de tiempo. Se encontró que las probetas actualmente presentan corrosión leve a moderada. Existe diferencia al comparar resultados considerando los distintos recubrimientos y relaciones agua/cemento. Se considera que la investigación, aun en curso, es de gran relevancia puesto que no existe una normatividad completa que considere el deterioro por corrosión en el estado de Oaxaca.

Palabras clave: Durabilidad; Concreto; Corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es ampliamente utilizado en todo el mundo para cumplir con las demandas de vivienda de la sociedad. No obstante, el concreto puede sufrir deterioro prematuro y por ende el decremento de su durabilidad ocasionado por diversos factores, uno de estos factores es la corrosión del acero de refuerzo.

La corrosión es considerada una patología en el concreto reforzado la cual ocasiona problemas de deterioro en estructurales. Normalmente las varillas embebidas en el concreto se encuentran pasivadas por una capa delgada de óxido de fierro, es decir, no tienen corrosión activa. Sin embargo, cuando esta capa pasivante se rompe puede iniciar el proceso de corrosión activa y ocasionar el daño estructural. Este proceso de despasivación es ocasionado por el ingreso de sustancias “agresivas” que favorecen el proceso de corrosión una vez que migran desde el exterior hasta alcanzar la superficie del acero de refuerzo embebido, entre estas sustancias y que pueden encontrarse en las zonas costeras, urbanas e industriales están los iones cloruro, el CO₂ y óxidos de azufre, respectivamente (Liu, 2016). La velocidad y cantidad de dichas sustancias que causan corrosión en el concreto reforzado dependerá de diversos factores tales como el tipo de concreto, diseño de mezcla, los agregados, tipo de cemento y de los factores climáticos ambientales.

Una vez que la corrosión ocurre, los años de vida de la estructura de concreto pueden verse reducidos, a esto se conoce como decremento de la durabilidad. Las variables ambientales como la temperatura, la humedad relativa, precipitación pluvial, CO₂ y la dirección del viento que están asociadas a dicho proceso de deterioro por corrosión (López-Vázquez, 2006), por tanto, deben evaluarse regionalmente. Esta investigación, aún en curso, forma parte del proyecto DURACON el cual lleva 20 años evaluando la influencia de los parámetros ambientales en la corrosión del concreto reforzado en diversos ambientes, teniendo estaciones de monitoreo en diversas localidades de México e Iberoamérica.

Estudios reportados del proyecto DURACON, en los cuales se han evaluado probetas de concreto reforzado en diversos medios ambientes (distintas localidades), indican que el medio ambiente influye directamente en el riesgo de corrosión y por ende en la probabilidad de que esta ocurra. No obstante, el factor tiempo también es de gran importancia. Por ejemplo, en una primera publicación se observó bajo riesgo de corrosión (Ecorr) en las probetas evaluadas durante 4 meses en la estación de Xalapa Veracruz, en donde predomina un clima semicálido húmedo (Baltazar, 2007). En otra publicación, en la cual expusieron probetas del proyecto DURACON en Yucatán a 30km de la costa, se menciona que el efecto de la carga ambiental aún no es patente después de 4 años de evaluación, así mismo reportan que las altas concentraciones de cloruros se deben al tipo de material pétreo empleado y no al ingreso de iones cloruro desde el exterior (Moreno, 2009).

En 2012 se presentaron resultados de otra estación de monitoreo DURACON (Estación Morelia) em donde las probetas fueron expuestas en ambiente urbano, se reporta que la mayoría de las probetas se encuentran en riesgo moderado de corrosión (Camacho Turrubiates, 2012). El monitoreo realizado en 2018 de todas las estaciones mexicanas del proyecto DURACON indica que las probetas de concreto en estudio se encuentran pasivos después de 15 años de exposición a excepción de dos estaciones en donde al parecer puede existir corrosión activa debido a época de lluvias (De Valle Moreno).

En este artículo solamente se evalúa el riesgo de corrosión de las probetas de concreto correspondientes a la estación de monitoreo de la ciudad de Oaxaca. Los resultados reportados corresponden a la evaluación realizada después de 20 años en que las probetas de concreto han sido



expuestas. La investigación es de suma importancia puesto que existen pocos estudios en los cuales se evalúa la influencia de los parámetros ambientales en la durabilidad del concreto reforzado expuesto en condiciones reales, es decir, la mayoría de los estudios reporta condiciones ambientales controladas en laboratorio y procesos de deterioro por corrosión acelerados (Chauhan, 2021). Lo anterior hace que el estudio se de gran relevancia al evaluarse el deterioro por corrosión de probetas de concreto en condiciones naturales.

2. METODOLOGÍA

Se elaboraron 6 probetas de concreto reforzado de las cuales 3 probetas fueron elaboradas con una relación agua/cemento de 0.65 (P1, P2 y P3, respectivamente) y las otras 3 con una relación de 0.45 (P4, P5 y P6, respectivamente). El experimento también consideró 3 profundidades de recubrimiento para varillas de refuerzo de 3/8 de pulgada, los cuales fueron 15, 20 y 30 mm como se muestra en la Tabla 1. Las dimensiones de las probetas fueron 15cm de ancho, 15cm de altura y 30cm de largo. Los detalles del diseño de las probetas reforzadas se ilustran en la Figura 1.

Tabla1. Diseño experimental para probetas de concreto reforzado

Probeta	a/c	Recubrimiento (mm)	Probeta	a/c	Recubrimiento (mm)
P-1	0.65	15	P-4	0.45	15
		20			20
		30			30
P-2		15	P-5		15
		20			20
		30			30
P-3		15	P-6		15
		20			20
		30			30

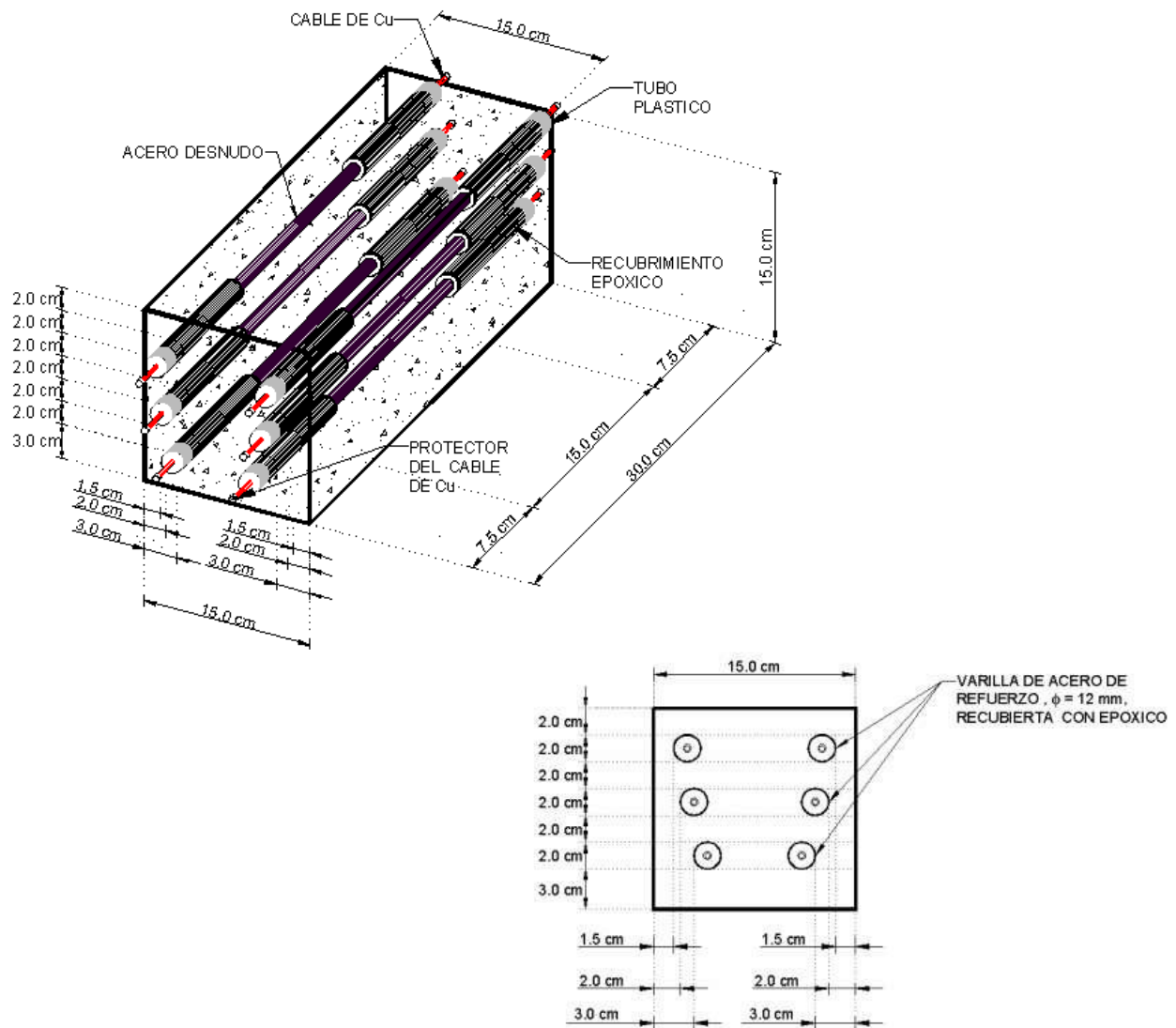


Figura 1. Detalle de distribución del acero de refuerzo en probetas de concreto (López-Celis, 2006).

Para la preparación de las probetas se utilizó Cemento Portland tipo I CPO-30RS Apasco, grava triturada de 19mm, arena de río con densidad de 2.5, aditivo reductor de agua de rango medio-plastificante de corto retardo (Sikament 190CR) al 0.3% vs cemento y agua potable. El diseño de mezclas se realizó conforme la norma ASTM C 192. Los agregados cumplen con las especificaciones de la norma ASTM C 33. Se consideró un revenimiento de $10\text{cm} \pm 1\text{cm}$ y curado por inmersión por 28 días. Posteriormente las probetas fueron expuestas al medio ambiente colocadas en soportes metálicos con una de sus caras orientada hacia los vientos predominantes (Figura 2). Las probetas se han utilizado para realizar el monitoreo por corrosión mediante pruebas electroquímicas de potencial de corrosión (E_{corr}) y de resistencia a la polarización lineal (I_{corr}), conforma a las normas AST C-876 y ASTM G-59. Se realizaron las pruebas de E_{corr} e I_{corr} utilizando un electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 . En este estudio se reportan los resultados de E_{corr} e I_{corr} correspondientes al monitoreo realizado después de 20 años de exposición.



Figura 2. Exposición al medio ambiente de las probetas de concreto reforzado

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hasta la fecha ninguna de las probetas presenta deterioro físico alguno tales como agrietamiento o manchas de productos de corrosión.

Los resultados de las pruebas de Ecorr e Icorr después de 20 años de ser expuestas las probetas de concreto en ambiente natural se muestran en la tabla 2. Los resultados en la tabla 2 corresponden al promedio de Ecorr e Icorr de 6 varillas para cada profundidad de recubrimiento y relación a/c.

En general se observa menor riesgo de corrosión en aquellas probetas con una relación a/c menor, así mismo se tiene un potencial de corrosión menos negativos conforme se tiene mayor recubrimiento de concreto de las probetas para ambas relaciones a/c.

Los resultados de Ecorr muestran que el acero de refuerzo en las probetas con a/c = 0.65 y recubrimiento de 15 y 20 mm se encuentran en un estado de probabilidad de corrosión intermedia. Para las probetas con esta misma relación a/c y recubrimiento de 30 mm se observa que el riesgo de corrosión es bajo. Las probetas con relación a/c de 0.45 muestran potenciales de corrosión que indican un riesgo intermedio de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876.

Los resultados de Icorr muestran que las varillas con 15 y 20 mm de recubrimiento en probetas con relación a/c de 0.65 y la varilla con 15mm y en la probeta con a/c de 0.65 tienen una alta velocidad de corrosión. Mientras que las varillas con recubrimiento de 30mm en la probeta con a/c = 0.65 y las varillas con 15 y 20mm en la probeta con a/c = 0.45 tienen una velocidad de corrosión moderada a alta de acuerdo con los criterios de evaluación de la Red DURAR (Red Durar, 1997). De acuerdo con las estimaciones de la Red Durar se estima que aquellas probetas con mediciones de Icorr mayor a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ presenten fisuración entre 1 y 2 años más. No obstante, los resultados son valores obtenidos al instante, los cuales pueden variar conforme el tiempo transcurre debido a la propia naturaleza del fenómeno de corrosión el cual depende diversos factores como los climáticos. Los resultados expuestos en este documento fueron obtenidos entre los meses de junio y julio cuando hay época de lluvias por lo cual las probetas se encuentran con un mayor contenido de humedad.

Tabla 2. Resultados de Ecorr e Icorr de probetas de concreto reforzado expuestas a medio al medio ambiente.

Probeta	a/c	Recubrimiento (mm)	Ecorr (mV)	Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
P-1	0.65	15	-237	1.57
P-2		20	-231	1.72
P-3		30	-171	0.80
P-4	0.45	15	-175	1.25
P-5		20	-140	0.51
P-6		30	-152	0.55

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados experimentales reportados (después de 20 años) de la estación DURACON Oaxaca se pueden escribir las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Se estima que existirá deterioro por corrosión en las probetas de concreto reforzado expuestas en ambiente urbano entre 1 y 2 años más de monitoreo, cuando se tiene 15mm de espesor de recubrimiento en las probetas. No obstante, se deberá realizar un monitoreo del potencial de corrosión con mayor frecuencia a fin de tener resultados en todas las estaciones del año, lo cual mostrará el mayor efecto de los parámetros climáticos.

Se prevé que las probetas con una menor relación a/c presenten algún deterioro por corrosión entre 1 y 2 años más de exposición en ambiente natural. Sin embargo, esto dependerá de diversos factores tales como las variaciones climáticas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca por las facilidades económicas a través del proyecto 19734.24-P.

6. REFERENCIAS

Baltazar Miguel, Nieves Demetrio, Sánchez Ángel, Romero Rabindranarth, Galicia Miguel, Álvarez René, Castillo Saúl, Torres Andres, (2007), *Influencia del medio ambiente en el comportamiento electroquímico del hormigón armado – Proyecto DURACON*. Scientia et Technica 36.

Camacho Turrubiates R.R., Torres Acosta A.A., Pérez Quiroz J.T., Martínez Molina W., Alonso Guzmán E., Tobias Jaramillo R., (2012), *Monitoreo de probetas expuestas a diferentes ambientes en México – Proyecto DURACON*. V Congreso Nacional ALCONPAT, 137-145.

Chauban A., Sharma U.K (2021), *Crack propagation in reinforced concrete expose to non-uniform corrosion under real time*. Engineerig Fracure Mechanics 248:107719.

De Valle Moreno A., Torres Acosta A., Pérez Quiroz J.T., Lomelí González María G., Martínez Madrid M., Gómez Hernández B.Y., De la Cruz Montufar A., Gante Salinas B., Castro Borges P., Balacan M., Martínez Molina W., Alonso Guzmán E.M., López E., López Celis R., Ramírez Martínez S.O., Pérez Chávez F de B., López Sánchez A., Ariza Aguilar L.E., Nieves D., Baltazar M., Genescá Llongueras J., Arganis Juárez C.R., Díaz Sánchez A., Robles E., Camacho Turrubiates



R.R. (2019), *Monitoreo 2018 de las estaciones Mexicanas del proyecto Iberoamericano DURACON*, Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

López-Celis R., Pérez Quiroz J.T., Torres-Acosta A.A., Martínez-Madrid M., Martínez-Molina W., Ariza Aguilar L.E., Zamudio Cintoa E., Genescá Llongueras J., Valdez Salas B. (2006), *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

López-Vázquez E. (2006), *Concreto hidráulico, calidad de vida y medio ambiente en la construcción de vivienda de interés social en la zona metropolitana de la ciudad de Oaxaca*, Tesis Doctoral; Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Moreno E.I., Ayuso-Blanco F., Torres-Acosta A.A., Troconis-Rincón O. (2009), Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (Proyecto DURACON). *Ingeniería* 13(3), 53-60.

Red Durar, (1997). *Manual de inspección y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED program.



Efecto de las contracciones por secado y por carbonatación en estructuras de concreto en servicio

A. A. Torres Acosta^{1*}

*Autor de Contacto: atorresa@tec.mx

¹ Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Querétaro, Querétaro, México.

RESUMEN

El presente trabajo muestra algunas evidencias de patología de daños, en edificaciones que a edades muy tempranas de estar en servicio (< 10 años) vemos: grietas en un patrón azaroso y con eflorescencias de carbonato de calcio exudando de ellas. Primero se realizó una investigación bibliográfica sobre el tema de contracción por carbonatación de materiales base cemento para encontrar una hipótesis inicial del proceso de degradación. Después, cuatro propiedades que mostraban este patrón de grietas azaroso y lixiviaciones de carbonato de calcio en las mismas grietas fueron inspeccionadas. Se realizó un plan de inspección detallada, incluyendo la extracción de núcleos y levantamiento de grietas para determinar el estado del concreto en una de estas estructuras dañadas. Se caracterizó el concreto por durabilidad para determinar la profundidad de carbonatación y otros parámetros. Se determinó que el concreto estaba carbonatado y que este proceso químico generó una contracción excesiva del mismo concreto que a su vez formó estas grietas. Se espera que estos ejemplos servirán a los diseñadores, principalmente a los estructuristas, para reflexionar en el cómo deben de especificarse los materiales cementosos, diseñarse y construirse edificaciones de concreto, esperando evitar el que sigan apareciendo estos problemas que generan costos inesperados de mantenimiento correctivo a este tipo de obras.

Palabras clave: Carbonatación; Concreto; Contracción; Durabilidad; Levantamiento de daños.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es el pilar de las economías de muchos países, por lo que el índice de desarrollo de los países puede medirse en función de la inversión en construcción que en éste se realiza cada año. Últimamente se ha estado desarrollando de manera acelerada la tecnificación de los procesos constructivos, al grado de que ya se habla de la Industria de la Construcción 4.0, en donde nuevas tecnologías están transformando la manera de construir la infraestructura en varios países.

Entre las transformaciones que la industria de la construcción está considerando, para convertirse en estos procesos definidos como Industria 4.0, se encuentran: 1) el internet de las cosas (IoT con sus siglas en inglés); 2) análisis de grandes datos (en inglés Big Data Analysis); 3) computaciones en la nube para manejo de muchos datos; 4) robótica; 5) gemelos digitales; 6) manufactura aditiva; 7) uso de drones o LIDAR para supervisión virtual en tiempo real; 7) BIM; 8) inteligencia artificial; 9) escaneo 3D; 10) materiales más sustentables. Podría haber más puntos, ya que las tecnologías van surgiendo de una manera vertiginosa, por lo que esta lista pudiera cambiar año con año, inclusive hasta en menos tiempo.

De entre todos estos puntos listados de la transformación de la Industria de la Construcción hacia la definida como 4.0, está la transformación hacia una industria más sustentable con el medio ambiente. Esta sustentabilidad se pueda lograr planeando que los recursos que se utilizan en la construcción tengan una componente hacia el considerar que las generaciones futuras puedan tener los recursos para satisfacer sus necesidades de vivienda, infraestructura, etc.

La sustentabilidad de la industria de la construcción define la necesidad de reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a lo largo de la vida útil de la construcción: “desde la cuna hasta la tumba.” Esto ha planteado la necesidad de reducir los GEI desde modificar los materiales que se utilizan en la construcción de los proyectos, diseñar éstos considerando extender su vida útil a valores > 60 años, darle al proyecto un mantenimiento preventivo para alcanzar la vida útil de diseño y, por último, reutilizar/reciclar los materiales del proyecto cuando se vuelva obsoleto técnica o económicamente para sí aprovechen las generaciones futuras los materiales del mismo y, de esta manera, evitar carestía o falta de insumos para los proyectos de construcción futuros.

Para lograr la sustentabilidad en la industria de la construcción, se ha trabajado mucho en los últimos 20 años en a la extracción y transformación de la materia prima en materiales de construcción, principalmente la industria del cemento. Esta industria ha logrado reducir las emisiones de GEI mediante las modificaciones en la formulación de los cementos, reduciendo el principal compuesto de su línea de producción que es el clínker (CANACEM 2023).

Se sabe que el cemento Portland está compuesto por clínker y yeso, con porcentajes de 90-95% para el clínker y 3-5% para el yeso (para alcanzar el 100% de esta ecuación, la diferencia corresponde a elementos minoritarios). En estudios recientes se demostró que esta reducción del contenido de clínker en los cementos se logra mediante la inclusión de adiciones en los cementos Portland, que podrían ser materiales que también son cementantes (como las puzolanas naturales, la ceniza volante, el humo de sílice, la escoria granulada de alto horno) o los rellenos inertes como la caliza (Villagrán-Zaccardi 2022).



Las adiciones cementantes que pudieran ser añadidas a las formulaciones de los nuevos cementos Portland conocidos en muchos países como cementos Portland compuestos, o CPC por sus siglas (NMX-C-414-ONNCCE-2017), generan que éstos sean binarios (si se le añade una sola adición) o ternarios (si se le añade dos adiciones). Estas nuevas composiciones de los CPC's han generado desempeños tan variados en los concretos que utilizan a estos cementos, demostrándose en varios trabajos presentados en la literatura mundial (estos trabajos fueron analizados en las referencias Torres Acosta et al. 2023, Torres Acosta et al. 2024). Cambios en el comportamiento mecánico, o en la contracción por secado de los concretos fabricados con estos CPC's, han demostrado que el desconocimiento de las composiciones de estos cementos ha impedido un control adecuado del concreto en obra, por lo que un mayor número de obras importantes han alcanzado el fin de su vida de servicio en menos de 15 años (Torres Acosta 2022).

Los fabricantes de cementos han comentado que no es el material el que ha causado esta reducción en la vida de servicio de las obras, sino que una mala ejecución en los trabajos o falta de un control de calidad adecuado en la colocación de los materiales en el lugar. Sin embargo, si los usuarios conocieran que sus concretos deben de ser dosificados, colocados y curados de manera diferente que lo que regularmente se hace en concretos fabricados con cementos con alto contenido de clínker, la cantidad de fallos que ahora se observan se podrían reducir dramáticamente.

Esta investigación muestra ejemplos de este tipo de fallas que se han presentado en estructuras de concreto que, en tan solo dos a cinco años de haberse puesto en servicio, mostraron grietas principalmente en losas reforzadas las cuales muestran un patrón muy similar en los casos mostrados. A la fecha, solo en dos de estas estructuras (un puente y un edificio educativo) se lograron obtener los planos estructurales para revisar la distribución del acero de refuerzo y con ellos descartar la posibilidad de que las grietas fueron generadas producto de una inadecuada cuantía de acero de refuerzo.

Por último, se presenta el avance de otra aplicación que promueva la Industria de la Construcción 4.0 que es el uso de escáner 3D para el levantamiento de daños de una de las estructuras que se están evaluando. Con esta tecnología se logró ubicar las grietas en las plantas de las losas, dimensionarlas y obtener la dirección de su propagación para así determinar si éstas fueron producidas por efectos diferentes al de inadecuada cuantía de acero, como sería el caso de que hayan aparecido por una contracción por secado del concreto.

2. ESTADO DEL ARTE EN CONTRACCIÓN DEL CONCRETO DEBIDO AL SECADO Y A LA CARBONATACIÓN

Se ha encontrado en la literatura varios trabajos que evalúan el efecto de la carbonatación en el concreto, en su contracción y la formación de grietas por los procesos químicos que esta carbonatación produce en la matriz de la pasta de cemento hidratado dentro del concreto.

Finalizando los años 90 del siglo pasado, Houst (1997) presentó resultados de experimentos realizados con pastas de cemento colocadas dentro de cámaras de carbonatación acelerada. Las pastas de cemento se prepararon con cuatro diferentes relaciones agua/cemento (a/c): 0.3, 0.4, 0.5 y 0.8. En el interior de las cámaras de carbonatación se mantuvieron constantes la concentración de CO₂ a 2% y la temperatura a 30°C. En estas cámaras se manejaron tres humedades relativas en



su interior: 30%, 48% y 76% (una humedad relativa por cada cámara). Las barras de pasta de cemento fueron utilizadas para medir la contracción de éstas producido por la carbonatación del material.

Los resultados obtenidos por Houst (1997) demostraron que en las humedades de 30% y 48%, las contracciones por carbonatación alcanzaron valores hasta de 2 mm/m de barra de pasta con las cuatro diferentes relaciones a/c, a los 100 días de exposición. También se observó que los valores de contracción por carbonatación fueron mayores en la cámara de carbonatación con una humedad interna de 76%, llegando a los 100 días de exposición a una contracción de 3.5 mm/m en la pasta con la relación a/c de 0.8. Las demás pastas en esta cámara con humedad de 76% tuvieron contracciones entre 0.2, 1.5 y 2 mm/m para las pastas de relación a/c de 0.3, 0.4 y 0.5, respectivamente.

Estos resultados demostraron la existencia de contracciones en pastas de cemento debido a la carbonatación del mismo material, y que la humedad relativa que más contracción se genera es la de 76%. Las humedades menores demostraron que podrían estar escasos de agua en el interior de las pastas para generarse la carbonatación y la subsecuente contracción del material.

Pearso (1998) por su lado, realizó también estudios en concretos con relaciones a/c de 0.25 a 0.37. Fabricó especímenes prismáticos con el mismo tipo de agregado y fue variando estas relaciones a/c para los diferentes prismas fabricados. Realizó con ellos mediciones de contracción por secado, contracción autógena y por carbonatación. En sus resultados se observó que las mayores contracciones medidas en su experimentación fueron las producidas por contracción por secado, seguido por contracción autógena y la menor de todas fue la contracción por carbonatación. Sin embargo, esta baja contracción por carbonatación comentó Pearso (1998) que se debió a que solo se carbonataron los concretos unos pocos milímetros en su superficie, por lo que la contracción fue mínima.

Ya en el año 2006, Chen y su grupo (2006) de nuevo evaluó la contracción por carbonatación en especímenes prismáticos de pasta de cemento. De nuevo utilizó una relación a/c de 0.5 en los especímenes cilíndricos de 5x10 cm fabricados. La contracción se midió de manera radial y no longitudinal. Los valores obtenidos de contracción radial fueron entre 0.1% y 0.8%. Este fenómeno de contracción radial fue explicado por los autores, que fue debido a la descalsificación de los productos de hidratación del cemento, principalmente por los cambios estructurales del CSH en su polimerización. Estos cambios estructurales propiciaron la formación de contracciones internas y hasta micro fisuración de la pasta.

Kovler y Zhutovsky (2006) presentaron en su trabajo un análisis de los diferentes fenómenos que generan en el concreto contracciones, desde las producidas por cambios de humedad interna (secado y autógenos principalmente) y por cambios químicos (hidratación, térmico, o carbonatación). La relacionada por carbonatación argumenta lo siguiente:

“La reacción de carbonatación tiene lugar sólo en presencia de dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera. Así, la carbonatación procede desde la superficie del concreto hacia el interior. Dependiendo de la calidad del concreto y de las condiciones del ambiente, la profundidad de carbonatación puede variar de varios milímetros a varios centímetros. Por lo tanto, la



contracción por carbonatación se limita únicamente a las zonas de la superficie.”

Esta afirmación es válida si el material base cemento (mortero o concreto) se carbonata unos pocos milímetros desde afuera. Sin embargo, con las evidencias obtenidas de la carbonatación en morteros presentados por el estudio de Méndez y colaboradores (2024) se observan que las formulaciones de los cementos compuestos, con contenidos de clínker entre 50% y 65% y de relleno inerte de caliza entre 20% y 35%, los nuevos concretos se carbonatarán más que solo unos pocos milímetros, por lo que las contracciones por carbonatación se podrían potenciar.

El siguiente estudio realizado por Zavija y Lukovic (2016) muestra el estado del arte de la carbonatación de materiales base cemento y su efecto en varias propiedades físicas y químicas de éstos una vez carbonatados. Presentaron datos de pastas de cemento que, al ser carbonatadas, mostraron una mayor difusividad de cloruros reduciéndose así la resistencia a ambientes marinos. Situación un tanto diferente a lo que se ha manejado en cuanto a que la carbonatación reduce la porosidad de los materiales base cemento por formarse sólidos de carbonato de calcio que taponan los poros del material antes de carbonatarse.

Zavija y Lukovic (2016) encontraron también que, durante el proceso de carbonatación, el hidróxido de calcio no es el único producto de hidratación que reacciona con el CO₂. Otras fases en la pasta de cemento, como CSH, etringita y cemento no hidratado todos reaccionan con el dióxido de carbono. También concluyeron que la carbonatación de la pasta de cemento hidratada provoca un cambio en la porosidad y distribución del tamaño de los poros. Sin embargo, la carbonatación no puede ser visto como un proceso continuo que tapa la porosidad, incluso en pasta de cemento Portland: en etapas posteriores, la porosidad aumenta, probablemente debido a la carbonatación de CSH y su descalcificación. Por último, concluyen que estos cambios estructurales por la continua carbonatación del CSH, y no solo del hidróxido de calcio (CH), es lo que produce la pérdida de más agua molecularmente combinada en CSH, por lo que se producen las contracciones y agrietamientos de una manera más frecuente.

Un siguiente estudio realizado por Bataev y colaboradores (2019) en concretos demostró que la carbonatación del concreto bajo la influencia del dióxido de carbono atmosférico afecta su resistencia, coeficiente de elasticidad, contracción y fluencia. También explicaron que provoca, con un aumento en el grado de carbonatación, el desarrollo de esfuerzos de tensión en las capas superficiales de las envolturas externas de los edificios, resultando en la disminución de su durabilidad debido a la formación de grietas por contracción. También argumentaron que la formación de estas grietas se debió a la descomposición del gel CSH por la descalcificación de éste y la pérdida de agua de este compuesto de hidratación del clínker.

Drouet y colaboradores (2019) fabricaron dos pastas de cemento endurecidas hechas con CEM I (sin adiciones) y CEM V/A (adicionados con ceniza volante) fueron carbonatados a tres temperaturas que oscilaban entre 20 y 80°C. Las pruebas se realizaron a diferentes humedades relativas con 50% de CO₂ usando un dispositivo que fue configurado específicamente para este propósito. Lo interesante de este estudio fueron las fotografías tomadas de los especímenes luego de su exposición a la cámara de carbonatación acelerada, ya que mostraron las fisuras en las pastas en las zonas carbonatadas, sin encontrarse fisuras en la porción de las pastas sin carbonatar. Esto



corroborar el que la carbonatación constante en el material genera los cambios volumétricos en las zonas carbonatadas que a su vez genera la formación de fisuras o grietas en el material.

El siguiente estudio encontrado en la literatura fue realizado en pastas de cemento por Suda y colaboradores (2021). Se fabricaron muestras de cemento Portland ordinario (CPO) y de escoria de alto horno (EGAH) al 50% de remplazo de CPO. Estas muestras se colocaron dentro de una cámara de carbonatación acelerada con concentración de $\text{CO}_2 < 3\%$, a diferentes HR del 11% al 85%. Encontraron que la carbonatación de la pasta de 50% CPO/50% EGAH fue mayor que la pasta de solamente CPO. La humedad relativa que generó mayor contracción por carbonatación fue la de 43%, seguido por la de 66%. Las humedades de 11% y 85% no generaron contracciones por carbonatación de consideración.

Kangni-Foli y colaboradores (2021) realizaron una investigación experimental con pastas de cemento y CSH, con una relación de a/c de 0.5. Los especímenes se colocaron en cámaras de carbonatación acelerada a $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$, $55\% \text{ RH} \pm 1\%$ y $3.0\% \text{ CO}_2 \pm 0.2\%$, durante un periodo de 1 año. En este estudio realizado en los dos tipos de pasta se corroboró que la descalsificación del gel CSH fue el proceso que motivó la modificación volumétrica de las pastas, generándose contracciones e inclusive fisuración de las dos pastas por la continua carbonatación del CSH.

Por último, Li y colaboradores (2023) realizaron un estudio del estado del arte obtenido de trabajos previos presentes en la literatura sobre los cambios microestructurales, físicos y químicos de las pastas de cemento por el proceso de la carbonatación en las mismas. Encontraron que el cambio en las estructuras de microporos de la pasta del cemento por su carbonatación depende principalmente de la competencia entre la obstrucción de los poros capilares llenos de carbonato de calcio y la formación de poros capilares adicionales inducida por la descalsificación de CSH. En general, encontraron que las adiciones de cementos suplementarios como sustitutos del clínker en la pasta de cemento, comprometen la estabilidad del volumen, lo que resulta en una contracción por carbonatación significativa.

Mostraron también una gráfica muy interesante de los datos de otra referencia en su trabajo en donde muestra los cambios de volumen por carbonatación de concretos fabricados con CPO (sin adiciones), con adiciones de ceniza volante al 35% y con cemento tipo LC3 que posee 15% de caliza, 35% de arcilla calcinada y 50% de clínker. De estas tres mezclas de concreto, el fabricado con CPO solo tuvo una contracción del 5% por carbonatación; el concreto con 35% de ceniza volante se contrajo un 10%; en cambio el concreto fabricado con LC3 tuvo una contracción del 15%. Esto corrobora que, a mayor cantidad de adiciones, es más factible que el concreto se contraiga por la carbonatación de éste.

3. EVIDENCIAS DE AGRIETAMIENTOS EN LOSAS

Desde los años 2014 se tiene el registro de losas de puentes y muelles que han presentado grietas, tanto en un patrón transversal a la dirección más larga de la losa como también en dirección diagonal. En un estudio previo se mostraron estas evidencias en donde se planteaba la hipótesis de que éstas se presentaron por un inadecuado curado y que con el tiempo estas grietas se fueron haciendo más grandes e inclusive se presentaban manchas por lixiviaciones generadas por el lavado del agua de lluvia que se transportaba a través de las mismas grietas (Torres Acosta 2022a, 2022b).



Dos años después de que se publicaron estas referencias, se han encontrado más evidencias de esta aparición de grietas en losas, pero no solo en puentes y muelles sino ahora en edificaciones. Al menos dos edificios ubicados en el estado de Querétaro han mostrado un patrón de grietas muy similar: grietas en diagonal con manchas por lixiviación de los productos de hidratación del cemento. Las tipologías de las grietas observadas de estos edificios se muestran en las Figuras 1 y 2.

Las fotografías de la Figura 1, y tomadas a finales del año 2023, corresponden a un estacionamiento de una plaza comercial que se inauguró a finales del año 2019, es decir, a tan solo cuatro años de que el edificio inicie sus funciones. Las grietas, como pueden observarse en la Figura 1, muestran un patrón unas transversales a las vigas de rigidización de las mismas, como también en diagonal. Se observó también que algunas de las grietas formadas ya presentan manchas de lixiviación, principalmente aquellas que se encuentran en zonas cercanas al exterior o en donde existe una fuente de agua (como el caso de baños o locales con preparación de alimentos).

Por último, se observó que la aparición de las grietas fue mayor en losas que estaban a una altura libre de 2.7 m, mientras que en losas que tenían una altura libre de 3.9 m para paso de vehículos, la cantidad de grietas fue menor. Esto permite plantear la hipótesis de que la formación de las grietas en lugares más cerrados, y con menos ventilación, pudieran generarse debido a un ambiente con mayor concentración de CO₂, tema que se explicó anteriormente.



Figura 1. Patología de las grietas observadas en un estacionamiento de una plaza comercial inaugurada a fines del 2019. Fotos tomadas por autor en noviembre 2023.

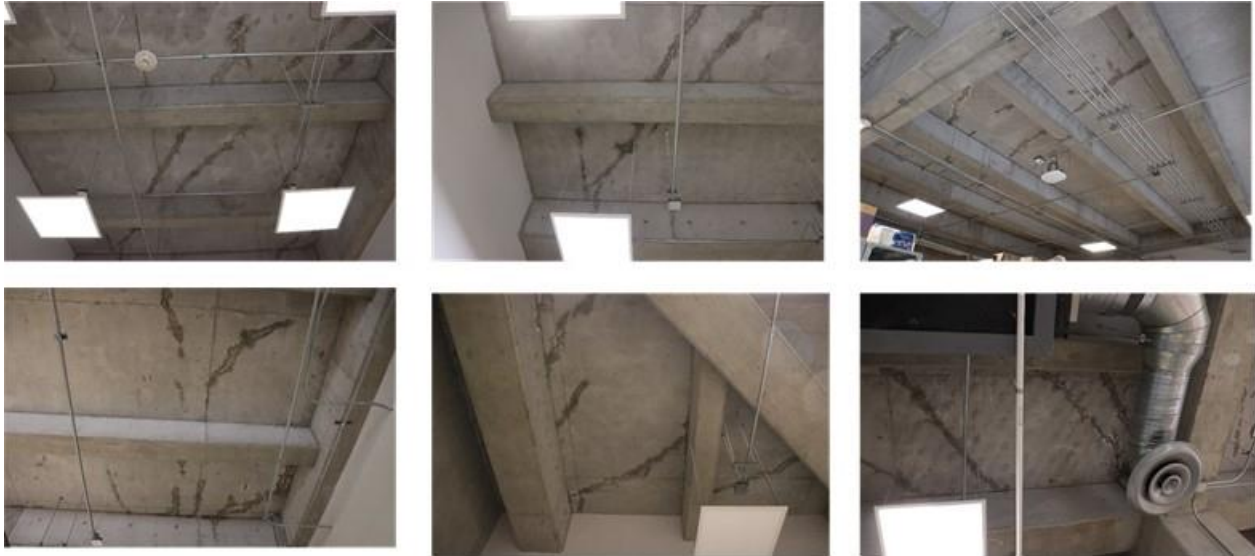


Figura 2. Patología de las grietas observadas en un edificio educativo inaugurado a fines del 2019. Fotos tomadas por autor en febrero 2024 en el sótano del edificio.

Las fotografías de la Figura 2 son de un edificio educativo, el cual inició su construcción a principios del año 2018 y finalizó en octubre de 2019. Las fotos fueron tomadas en febrero de 2024, aunque los daños se empezaron a manifestar en el año 2021 cuando se iniciaron las visitas para inspección preliminar al edificio. Como se observa en esta figura, el patrón de grietas es muy similar al observado en el estacionamiento de la plaza comercial: grietas transversales o en diagonal a la dirección larga de la losa.

Las fotos de esta figura corresponden a la losa del sótano, que por arriba es una zona de descanso (cafetería y zona de estudio o reunión) abierta, y que podría tener contacto directo con la lluvia. Por ello se observó el día del levantamiento fotográfico se observó un goteo de agua, a pesar de que no había llovido en al menos un mes de la fecha de esta visita al lugar. Es probable que esto se debe a que el agua de lluvia se acumula, entre el piso de cantera gruesa y la losa de concreto sin poderse evaporar, por lo que se tenía este goteo por varias semanas o meses antes de que se lograra secar por completo y dejara de tenerse este goteo al interior del sótano.

La Figura 3 muestra otras fotografías tomadas al edificio educativo en los pasillos que se encuentran a la intemperie en los tres niveles superiores. De nuevo se observan grietas en dirección diagonal a la dirección larga de la losa, sin embargo, muestra más manchas blancas producto de la lixiviación de productos de hidratación y el agua de lluvia que, al estar estos pasillos en la intemperie, es más común el lavado de estos productos de hidratación y su transformación a carbonato de calcio una vez en contacto con el CO_2 ambiental.

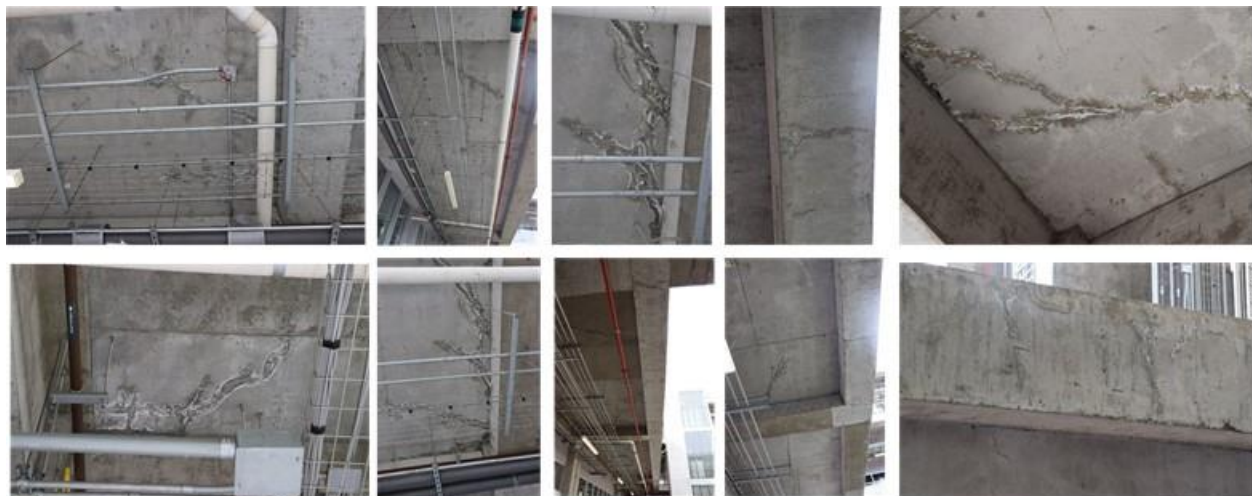


Figura 3. Patología de las grietas observadas en un edificio educativo inaugurado a fines del 2019. Fotos tomadas por autor en febrero 2024 en los pasillos expuestos a la intemperie.

Al momento de la preparación del presente documento se han podido registrar dos nuevas edificaciones que muestran mismo patrón de grietas en cuanto a la dirección y lixiviación de productos afuera de las mismas. Uno de estos edificios se encuentra en construcción, observándose este tipo de grietas en algunos de las nervaduras de la losa, como lo muestran las fotografías de la Figura 4: grietas en diagonal aún pequeñas en longitud y ancho de apertura y sin lixiviaciones aún.



Figura 4. Patología de las grietas observadas en un edificio en construcción con losa a base de nervaduras. Fotos tomadas por autor en abril 2024.

El otro edificio es un estacionamiento vehicular de una sola planta, que está en funcionamiento desde el año 2012, observándose un proceso de degradación más grave que los edificios ya

mostrados por el hecho de que está en funcionamiento poco más de 12 años y no se ha podido erradicar el problema, aunque se hayan hecho ya varias reparaciones al edificio, tanto estructurales (refuerzo externo con perfiles metálicos o con fibras de carbón) como cosméticas. La Figura 5 muestra fotografías de los daños observados en este edificio.

El programa incluyó el obtener el levantamiento de daños en los elementos estructurales (losas, travesaños, vigas, columnas y muros) de todo el edificio de estacionamiento, con una superficie total aproximada de 8,350 m². La altura libre de este edificio de estacionamiento es de 2.50 m. En lo que respecta a su estructuración, el edificio tiene un sistema de vigas de sección rectangular de 25x90 cm espaciadas a cada 2.25 metros, centro a centro; dichas vigas se apoyan sobre marcos continuos de concreto reforzado. La sección de las travesaños sobre las cuales se apoyan las vigas que sostienen la losa es de 30x90 cm o 40x90 cm dependiendo de su ubicación dentro de la estructura.

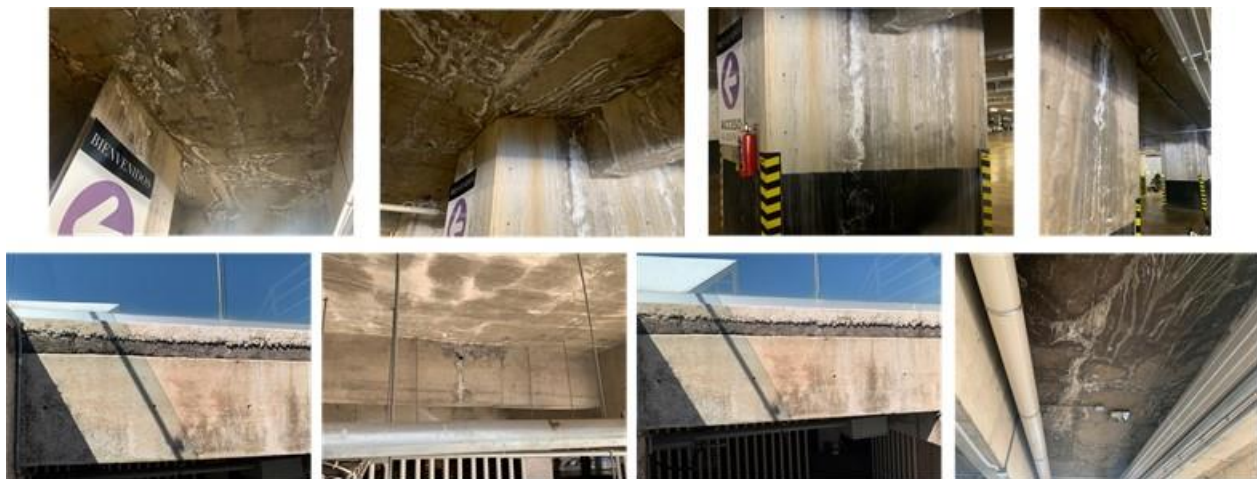


Figura 5. Patología de las grietas observadas en un edificio de estacionamiento que está en servicio desde el año 2012. Fotos tomadas por autor en abril 2024.

Para este edificio en específico (Figura 5) se inició un programa de inspección detallada de los elementos estructurales de concreto reforzado, para determinar el porqué de la formación de estas grietas y verificar si fueron generadas por cargas excesivas aplicadas a la estructura o si son generadas por contracción por secado y/o carbonatación del concreto luego de estar en servicio por poco más de 12 años (Torres Acosta 2024).

En lo que respecta a losa, esta tiene un espesor de 12 cm y se caracteriza por tener acero de refuerzo continuo solamente en la parte inferior (acero positivo), mientras que en la parte superior cuenta solamente con acero de refuerzo en las secciones que se encuentran sobre las vigas (acero negativo). Las columnas del edificio son de sección rectangular de 50x80 cm, encontrándose orientadas en su eje fuerte en la dirección Norte-Sur. Por último, en el módulo 2 se encuentra una rampa de acceso de vehículos, la cual tiene en su perímetro un muro de concreto reforzado de 25 cm de espesor; dicho muro actúa como apoyo para las travesaños y vigas en esa zona (Torres Acosta 2024).

El programa de inspección incluyó las siguientes actividades (Torres Acosta 2024):

- Levantamiento geométrico utilizando la técnica de escaneo 3D

- Diagnóstico estructural con base a la respuesta de vibraciones del edificio, calibración del modelo estructural con las vibraciones obtenidas y determinación de la capacidad de carga del edificio
- Inspección preliminar siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C-505-ONNCCE-2016
- Inspección en detalle siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C-520-ONNCCE-2016
- Determinación de los potenciales de corrosión del acero de refuerzo, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C-495-ONNCCE-2015
- Extracciones de los núcleos de concreto, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-236-ONNCCE-2010
- Determinación de la resistencia compresión, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C 169-ONNCCE-2009
- Determinación de la resistividad eléctrica saturada del concreto, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-514-ONNCCE-2019
- Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-275-ONNCCE-2020
- Determinación de la resistencia a la compresión del concreto utilizando la prueba de rebote o esclerometría, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-192-ONNCCE-2018
- Determinación de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C-501-ONNCCE-2015
- Determinación de la penetración del ion cloruro, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, utilizando la técnica del AgNO_3
- Determinación de la profundidad de carbonatación del concreto, en varios de los cinco elementos estructurales del edificio, siguiendo el procedimiento de la Norma mexicana NMX-C-515-ONNCCE-2015

Con la información obtenida de la inspección y diagnóstico realizado a esta estructura, se pudo demostrar que la especificación solicitada para el concreto no fue adecuada para la exposición ambiental que el edificio ha tenido desde su puesta en servicio (Torres Acosta 2024).

Según las especificaciones del concreto en el proyecto ejecutivo del estacionamiento, éste debía alcanzar una resistencia a la compresión a los 28 días de 250 kg/cm^2 (25.5 MPa). Sin embargo, los resultados obtenidos de resistencia a la compresión, por medio de núcleos extraídos, se observan que entre un 30% y un 50% estuvieron por debajo de los 200 kg/cm^2 (20.4 MPa), y un 70% por debajo de los 250 kg/cm^2 (25.5 MPa). Esto significa que el concreto usado es deficiente desde el punto de vista estructural y más aún de durabilidad (Torres Acosta 2024).

Esta situación en el concreto permitió que la penetración de la carbonatación del concreto alcance valores más allá del espesor de recubrimiento, que se estima es de 20 mm (valores medidos entre 16 mm y 26 mm, con promedio de 20.5 mm) en todos los elementos estructurales evaluados. Esto implica que, si hubiera la cantidad suficiente de agua en el concreto, el acero de refuerzo estuviera corroyéndose (Torres Acosta 2024).

Con base a los resultados obtenidos de la carbonatación de los elementos estructurales del edificio, se demostró que la profundidad de carbonatación en todos los elementos estuvo por arriba de los 20 mm que es el valor promedio de los espesores de recubrimiento del concreto de los mismos elementos estructurales. Esta penetración de la carbonatación en el concreto permitió la formación de micro fisuras en la superficie de concreto en las columnas, trabes, vigas y muros como se muestra en la Figura 6, donde se aprecian las cuatro caras de cuatro de las columnas del edificio.



Figura 6. Imagen de compuesta generada de las cuatro caras de una columna para ubicar posición de las grietas presentes (Torres Acosta 2024).

La patología mostrada en la Figura 6 se repite en las cuatro caras de las poco más de 80 columnas del edificio. Al obtenerse espesores de carbonatación en las columnas inspeccionadas de 19.3 mm de media y 13.6 mm de desviación estándar en los resultados medidos, implica que el concreto más allá del espesor de recubrimiento del acero está carbonatado. Esta zona carbonatada del concreto en columnas pudo haberse contraído por el proceso de carbonatación de las fases de hidratación de los silicatos cálcicos del cemento Portland, y por ello la formación de este patrón de grietas que se repitió en todas las columnas del edificio. Lo que corrobora la hipótesis que las fisuras fueron

generadas por estos cambios químicos en la matriz de pasta de cemento en los concretos de las columnas (Torres Acosta 2024).

Para el caso de las losas se observó una patología diferente a las columnas, ya que en las losas se formaron primero fisuras y/o grietas por cargas excesivas presentes en la etapa de construcción del edificio contiguo al estacionamiento. Estas grietas estructurales luego del paso del tiempo permitieron el paso de agua de lluvia en el interior de las losas, generándose así reacciones químicas producto del lavado por el agua de lluvia y lixiviaciones de estos productos de reacción. La Figura 7 muestra ejemplo de una zona en donde las losas mostraban mayor cantidad de grietas (Torres Acosta 2024).

De la misma figura se pueden observar grietas con la misma dirección aleatoria en diagonal al sentido longitudinal/transversal de la losa, que las presentes en los otros edificios de las Figuras 1 a la 4, además de las típicas grietas estructurales en losas que pudieran ser transversales al ser una losa esbelta o en diagonal que aparecen en las esquinas de éstas. Cabe aclarar que de los resultados de profundidad de carbonatación obtenidos en la losa el promedio y la desviación estándar fue de 25.2 mm y 3.8 mm, respectivamente. Esto implica que la profundidad de carbonatación alcanzada en las losas está más allá que el recubrimiento de 20 mm que estos elementos poseen, corroborando que también el acero de refuerzo en las losas está corroyéndose cuando la cantidad de agua en el interior del concreto es suficiente para mantener la reacción de corrosión del acero de refuerzo.

Además de las grietas que pudieron formarse por exceso de carga durante la construcción del edificio principal, o ya estando en servicio el estacionamiento, o por contracción por secado o carbonatación en la Figura 7 se observa la gran cantidad de productos de lixiviación que salen de estas grietas. Algunas de ellas muestran pocos productos lixivándose en las mismas, por lo que se deduce que son de reciente creación y que, si permanecen tal cual, tendrán más productos lixivándose de dentro de ellas hacia la superficie exterior de la losa (Torres Acosta 2024).

El trabajo realizado por Torres Acosta (2024) está en proceso y los resultados se presentarán en una publicación futura. Sin embargo, la información que hasta ahora se ha obtenido y que se presenta a manera de resumen en la presente publicación, sirve como preámbulo para reconocer la existencia de este problema que será cada vez más recurrente. Este pronóstico se base en que los concretos actuales, fabricados con las nuevas formulaciones de cementos CPC con contenidos bajos de clínker, tendrán una mayor carbonatación que los fabricados con cementos con altos contenidos de clínker.

Todo lo anterior nos demuestra que vemos con mayor frecuencia, edificios o estructuras recientemente construidas (quizá hasta con menos de 5 años de construcción) con manifestaciones visibles de grietas y lixiviaciones, por lo que es necesario hacer una revisión de lo que está sucediendo y manifestarlo a los profesionistas en el ramo de diseño y construcción de estructuras de concreto. Este trabajo pretende realizar este análisis de las posibles causas de lo que está sucediendo, considerando a la contracción por secado y por carbonatación del concreto a los principales catalizadores de la formación de esta forma de grietas transversales o en diagonal, que no eran tan frecuentes hasta unos 10 años y que, últimamente, se ha presentado más frecuentemente (Torres Acosta 2024).





Figura 7. Imagen compuesta de una porción de losa utilizada para marcar sobre ella las grietas formadas, como capa de imagen sobre el archivo AutoCAD (Torres Acosta 2024).

4. COMENTARIOS FINALES

Con la información recabada en la literatura y las evidencias observadas en edificios en servicio ubicados en zonas urbanas, se deduce que la carbonatación genera contracciones plásticas una vez que el material base cemento se ha endurecido. Estas contracciones se deben a que una vez que se haya consumido el calcio del CH presente en la matriz de la pasta de cemento, el CO_2 sigue carbonatando al siguiente producto de hidratación del clínker, el gel CSH, al haberse acabado el primer producto CH. Este cambio químico del CSH hace que se pierda agua en el material y se

descalsifique el mismo, lo que genera cambios volumétricos y hasta fisuras o grietas en la matriz de la pasta.

Con el conocimiento que hasta ahora se ha generado, en donde se demuestra que los morteros o concretos fabricados con cementos de bajo contenido de clínker y con altos contenidos de caliza inerte (entre 15% y 35%) hace aún más acelerado la descalsificación y pérdida de agua de la pasta de la matriz de cemento dentro del mortero y/o concreto. Estos cambios químicos generan los cambios de estabilidad volumétrica por lo que se inicia el proceso de agrietamiento del mortero o concreto, pudiéndose formar patologías de daño a las mostradas en las fotografías tomadas en varios edificios construidos relativamente nuevos (< 5 años) en donde el cemento usado fue un CPC y pudiera éste tener altos contenidos de adiciones en el mismo, especialmente caliza.

Las evidencias mostradas de los daños en cuatro edificios ubicados en zonas urbanas, principalmente losas de estacionamientos en donde la concentración de CO₂ se incrementa mientras más cerradas son estas áreas del edificio, muestran que su patología de daños es muy similar: grietas en diagonal localizadas de manera aleatoria tanto en el centro como en los extremos de las losas, y que presentan lixiviaciones de productos blanquecinos que regularmente es carbonato de calcio.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo recibido por parte del Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Campus Querétaro por las facilidades brindadas para la generación de este documento y la presentación de éste en el evento al que se participó.

6. REFERENCIAS

- Bataev, Apkarov, Gaziev, Mazhiev, Goitemirov (2019). “Revisiting the mechanism of carbonation shrinkage of autoclaved aereated concrete,” SP-107 4th CANMET/ACI Conference on Durability of Concrete, DOI: 10.14359/14210.
- CANACEM (2023). “Hoja de ruta México Industria del Cemento: Hacia una economía baja en carbono,” Cámara Nacional del Cemento-CANACEM, Ciudad de México, México, <https://canacem.org.mx/site/wp-content/uploads/2023/03/Folleto-Hoja-de-Ruta-CANACEM.pdf>
- J.J. Chen, J.J. Thomas, H.M. Jennings (2006). “Decalcification shrinkage of cement paste,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 801 – 809.
- E. Drouet, S. Poyet, P. Le Bescop, J.M. Torrenti, X. Bourbon (2019). “Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature,” *Cement and Concrete Research*, 2019, 115, pp. 445-459.
- H.Y. Houst (1997). “Carbonation shrinkage of hydrated cement paste,” SP-107 4th CANMET/ACI Conference on Durability of Concrete, DOI: 10.14359/14210.
- E. Kangni-Foli, S. Poyet, P. LeBescop, T. Charpentier, F. Bernachy-Barbé, A. Dauzères, E.L. 'Hôpital, J.B. D'espinoze de Lacaillerie (2021). “Carbonation of model cement pastes: The mineralogical origin of microstructural changes and shrinkage,” *Cement and Concrete Research*, Vol.144,pp.106446.



- K. Kovler, S. Zhutovsky (2006). "Overview and future trends of shrinkage research," *Materials and Structures*, Vol.39, pp.827–847.
- L. Li, Q. Liu, V. Dao, M. Wu (2023). "Dimensional change of cement paste subjected to carbonation in CO₂ sequestration and utilization context: A critical review on the mechanisms," *Journal of CO₂ Utilization*, Vol.70, pp.102444.
- R. Méndez Páramo, A.A. Torres Acosta, C. Arista Perrusquía y E.S. Herrera Sosa (2024). "Desempeño de pastas y morteros a base de cemento Portland con altos contenidos de adiciones de caliza," Congreso Nacional del ALCONPAT México, Oaxaca, Oaxaca, septiembre.
- NMX-C-169-ONNCCE-2009. *Industria de la Construcción - Concreto - Extracción de Especímenes Cilíndricos o Prismáticos de Concreto Hidráulico Endurecido*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-192-ONNCCE-2018. *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del Número de Rebote Utilizando el Dispositivo Conocido como Esclerómetro - Método de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-236-ONNCCE-2010. *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Práctica para Examinar y Muestrear el Concreto Endurecido en el Sitio de Colado*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-275-ONNCCE-2020. *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasonico a Través del Concreto - Método de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-414-ONNCCE-2017. *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-C-495-ONNCCE-2015. *Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Potenciales de Corrosión del Acero de Refuerzo sin Revestir, Embebido en Concreto - Especificaciones y Método de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-C-501-ONNCCE-2015. *Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-C-505-ONNCCE-2016. *Industria de la Construcción - Inspección Preliminar de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad - Procedimientos*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.
- NMX-514-ONNCCE-2019. *Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.



NMX-C-515-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Durabilidad - Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico - Especificaciones y Método de Ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

NMX-C-520-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Durabilidad - Inspección Detallada de Daños en Estructuras de Concreto Hidráulico con Criterios de Durabilidad - Procedimientos, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., Ciudad de México, México.

B. Person (1998). “Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete,” *Cement & Concrete Research*, Vol.28, No.7, pp.1023-1036.

Y. Suda, J. Tomiyama, T. Saito and T. Saeki (2021). “Phase Assemblage, Microstructure and Shrinkage of Cement Paste during Carbonation at Different Relative Humidities,” *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 19, pp. 687-699.

A.A. Torres Acosta (2022). “¿Por qué la infraestructura vial de concreto en el país sufre daño en tan pocos años?,” *Vías Terrestres*, Número 78, Año 13, julio-agosto, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 23-31.

A.A. Torres Acosta, R.A. Méndez Páramo y E.S. Herrera Sosa. (2023). “Evidencias en el desarrollo de resistencia a la compresión y contracción plástica de concretos fabricados con cemento portland compuesto (CPC),” *Vías Terrestres*, Número 86, Año 16, noviembre-diciembre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 17-22.

A.A. Torres Acosta, R.A. Méndez Páramo y E.S. Herrera Sosa. (2024). “Desempeño de concretos fabricados con cementos portland compuestos, CPC: Evidencias de su durabilidad en ambientes marino, urbano o industrial,” *Vías Terrestres*, Número 87, Año 16, enero-febrero, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 9-15.

A.A. Torres Acosta (2024). “Estudio de la integridad estructural y durabilidad de un edificio de estacionamiento ubicado en una zona urbana del bajío,” reporte final de investigación, SAT 008/24, SATELSA SA de CV, Querétaro, Querétaro, junio.

Y. Villagrán-Zaccardi, R. Pareja, L. Rojas, E. Irassar, A.A Torres-Acosta, T. Tobón, V.M. John. (2022). “Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality,” *RILEM Technical Letters* 7, pp.30-46, <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.155>.

B. Zavija, M. Lukovic (2016). “Carbonation of cement pastes: Understanding, challenges and opportunities,” *Construction and Building Materials*, Vol.117, pp.285-301.



Parámetros ultrasónicos para la estimación de las propiedades de durabilidad de concretos

V. A. Franco Luján^{1*}, P. Montes-García², M. A. Maldonado-García³

*Autor de Contacto: victor.fl@itvalletla.edu.mx

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Etna, Oaxaca, México.

² Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Grupo de Materiales y Construcción, Oaxaca, México.

³ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar parámetros ultrasónicos para estimar propiedades de durabilidad de concretos de ocho años. Se fabricaron cilindros de concreto que contienen 100% cemento Portland (CP), 80%CP+20% de ceniza volante (CV), 70%CP+20%CV+10% de ceniza de bagazo de caña sin tratamiento (CBC-st) y 60%CP+20%CV+20%CBC-st. Los cilindros se curaron en solución de hidróxido de calcio durante ocho años. Posteriormente se realizaron pruebas ultrasónicas para obtener parámetros de velocidad, atenuación temporal y espacial y contenido energético de las ondas P y S. A continuación, se correlacionaron los parámetros ultrasónicos con pruebas de difusión de cloruro, resistividad eléctrica y corrosión total reportadas en previas investigaciones. Los resultados no mostraron diferencias significativas en la velocidad, atenuación temporal y espacial y contenido energético de la onda P. Sin embargo, diferencias significativas en la atenuación temporal y espacial y el contenido energético de las ondas S indican cambios en la propagación de ondas ultrasónicas en concretos que contienen CV y CBC-st. Finalmente, los resultados también sugieren que las correlaciones se pueden utilizar para evaluar las propiedades de durabilidad de los concretos con CV+CBC-st.

Palabras clave: Concretos ecológicos; Procesamiento de señales; Propagación de ondas ultrasónicas; Durabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la demanda creciente de cemento Portland (CP) para la edificación de obra civil ha ocasionado el uso de materiales alternativos al CP, no solo para satisfacer dicha demanda, sino que también para mitigar las emisiones de CO₂ ocasionadas por la producción de CP, ya que esta industria es responsable de aproximadamente el 9% de las emisiones globales de CO₂ (Benhelal et al., 2021). En este contexto, los materiales cementantes suplementarios (MCSs) como ceniza volante (CV), humo de sílice, escoria granulada de alto horno, ceniza de cascara de arroz, ceniza de bagazo de caña (CBC) ha sido empleados como sustituto parcial del CP para la manufactura de concretos más amigables con el medio ambiente (Berenguer et al., 2021; Saraswathy & Song, 2007; Sivakrishna et al., 2020; Tangchirapat et al., 2009). Ante la producción de estos nuevos tipos de concretos, es de vital importancia la evaluación de sus propiedades microestructurales, mecánicas y de durabilidad a largo plazo para obtener materiales de construcción no solo de menor impacto ambiental, sino que a su vez con las mismas propiedades ya mencionadas o superior que aquellos elaborados solo con CP.

Diversas normas internacionales han establecido los parámetros y requerimientos que los concretos deben de tener para asegurar su calidad y desempeño, los cuales son obtenidos mediante pruebas destructivas. Sin embargo, existen una amplia variedad de pruebas no destructivas que incluyen la emisión acústica, acústico-ultrasónico, líquido penetrante, resistividad eléctrica y ondas guiadas por ultrasonido (Franco-Luján et al., 2023; Gholizadeh, 2016; Sun & Zhu, 2020). Todas estas técnicas han sido empleadas para evaluar las propiedades microestructurales, mecánicas y de durabilidad de concretos (Helal et al., 2015).

Respecto a las ondas guiadas por ultrasonidos, existen tres tipos, las ondas de compresión u ondas P, las ondas de corte u ondas S y las ondas de superficie (Mutlib et al., 2016). De estas, el parámetro de velocidad de ondas P (VPU-p) es el más empleado para la evaluación o predicción de ciertas propiedades de concretos como la relación agua/cemento, tiempos de fraguados, resistencia a la compresión, carbonatación entre otras (Jain et al., 2013; Laureti et al., 2018; Shen et al., 2023). En lo que se refiere a las ondas S, estas se propagan únicamente por sólidos, a diferencia de las ondas P que se propagan por líquidos y gases. Lo anterior ocasiona que información más detallada sobre el medio sólido pueda ser obtenida mediante las ondas S. Por ejemplo, la velocidad de ondas S (VPU-s) ha sido empleada para evaluar la porosidad, módulos de elasticidad y relación de Poisson de pastas, morteros y concretos (Bezerra et al., 2023; Trtnik & Gams, 2014). Además de las VPU, otros parámetros como atenuación espacial, temporal y contenido energético de las ondas P y S pueden ser obtenidas cuando las señales ultrasónicas son procesadas, y con ello, evaluar otras propiedades microestructurales, mecánicas y de durabilidad de los materiales basados en CP (Molero et al., 2017; Valdeon et al., 1996).

Con base en lo mencionado anteriormente, se puede concluir que la medición simultánea de las ondas P y S puede ser empleada para la evaluación de las propiedades de materiales basados en CP, específicamente en aquellos donde MCS han sido adicionados. En este contexto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo emplear los parámetros ultrasónicos de las ondas P y S para estimar las propiedades de durabilidad de concretos adicionados con ceniza volante y ceniza de bagazo de caña.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales cementantes y preparación de las mezclas de concreto

Los materiales cementantes para emplear fueron cemento Portland compuesto (CPC-30R), el cual cumple con los requerimientos de la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, además se empleó ceniza volante comercial y ceniza de bagazo de caña, la cual fue tamizada por la malla ASTM No 200 (CBC-st). Se realizaron cuatro mezclas de concreto, una control con 100%CP, una binaria (T0) con 80%CP+20%CV y dos ternarias, una con 70%CP+20%CV+10%CBC-st y la última con 60%CP+20%CV+20%CBC-st. Con las mezclas de concreto se fabricaron especímenes cilíndricos y prismáticos de 50 x 150 x 300 mm. En los prismas se embebieron dos varillas de acero al carbón No 3. Después de 24 h, los especímenes se desmoldaron y los cilindros se curaron en una solución de hidróxido de calcio por ocho años, mientras que los prismas se sumergieron en una solución al 3.5% de cloruro de sodio (NaCl) por el mismo periodo de tiempo que los cilindros.

2.2 Pruebas ultrasónicas a las mezclas de concreto

La prueba de ondas guiadas por ultrasonido a los especímenes cilíndricos se realizó en condiciones saturadas. Se emplearon dos pares de transductores de generadores de ondas P X1021 Panametrics® con una frecuencia de 50 kHz y otro par de transductores de generadores de ondas S V1548 Panametrics® con una frecuencia de 0.1 MHz. Para la generación de las señales ultrasónicas se empleó un generador de pulsos ultrasónicos 5058PR Olympus® con un voltaje de 200 V y la adquisición de datos se realizó con un osciloscopio digital Tektronix® TDS 3014C. Posteriormente las señales ultrasónicas de las ondas P y S fueron procesadas para obtener los parámetros de velocidad de pulso ultrasónico, atenuación temporal, atenuación espacial y contenido energético. Lo anterior fue realizado con base en lo propuesto por Martínez-Martínez et al., (2011), empleando el software Matlab®.

2.3 Propiedades de durabilidad

2.3.1 Resistividad eléctrica

Después de ocho años en la solución de NaCl, a los prismas de concreto se les realizó pruebas de resistividad eléctrica (RE) en condición de saturado superficialmente seco con base en la norma AASTHO (2014) empleando una sonda Wenner Resipod modelo 38 mm de Proceq®. A cada espécimen prismático se les realizaron 10 lecturas, tres en cada una de las caras superior e inferior y dos más en las caras laterales. Las lecturas de RE fueron corregidas por tamaño máximo de agregado acorde con lo establecido por Morris et al., (2004).

2.3.2 Corrosión total integrada

La corrosión total integrada a las varillas de acero embebidas en los prismas de concreto se realizó con base en la norma ASTM G 109-21 mediante la técnica de resistencia a la polarización lineal con un potencióstato/galvanostato Gamry®, un electrodo de referencia Ag/AgCl y una varilla de acero de inoxidable como contraelectrodo. El acero de refuerzo fue polarizado a ± 20 mV frente vs Ag/AgCl y a una velocidad de escaneo de 0.075 mV/s.

2.3.3 Coeficientes de difusión

Después de las pruebas de RE y corrosión total, los prismas de concreto fueron seccionados en pequeños especímenes de 35 x 100 x 180 mm, de donde se obtuvieron polvos concretos a cada tres



mm de profundidad. El contenido total de cloruros fue estimado por fluorescencia de rayos X con base en la norma ASTM E1621, usado un espectrómetro PANalytical® Epsilon3-XL. Con los datos obtenidos se estableció un perfil de cloruros totales y a partir de éste se determinó los coeficientes de difusión (C_D) basándose en la solución de la función de error de la segunda ley de Fick utilizando el software Table Curve 2D versión 5.01®.

3. RESULTADOS

3.1 Velocidad de pulso ultrasónico de las ondas P y S

La Figura 1 ilustra la VPU de las ondas P y S, donde se observa que la sustitución parcial de CV (T0) y CV+CBC-st (T1 y T2) no tiene un efecto sobre la VPU-p de las mezclas de concreto. Además, las VPU-p de las cuatro mezclas fue superior a 4100 m/s (línea horizontal punteada), valor mínimo propuesto para un concreto de buena calidad (Demirboğa et al., 2004; Shariq et al., 2013). En lo que refiere a los valores de VPU-s, éstos fueron ligeramente menores a los de VPU-p; así mismo se observa que la mezcla C presentó el valor más bajo, mientras que las mezclas con CV y CV+CBC-st obtuvieron valores de VPU-s más altas. Lo anterior es interesante de mencionar, que las ondas S solo viajan por medio sólidos; por lo tanto, se puede inferir que la microestructura de las mezclas T0, T1 y T2 presentan un mayor refinamiento y menor cantidad de poros. Lo anterior concuerda con resultados previos (Franco-Luján et al., 2022), donde los concretos con CV+CBC obtuvieron porosidades menores que la mezcla control.

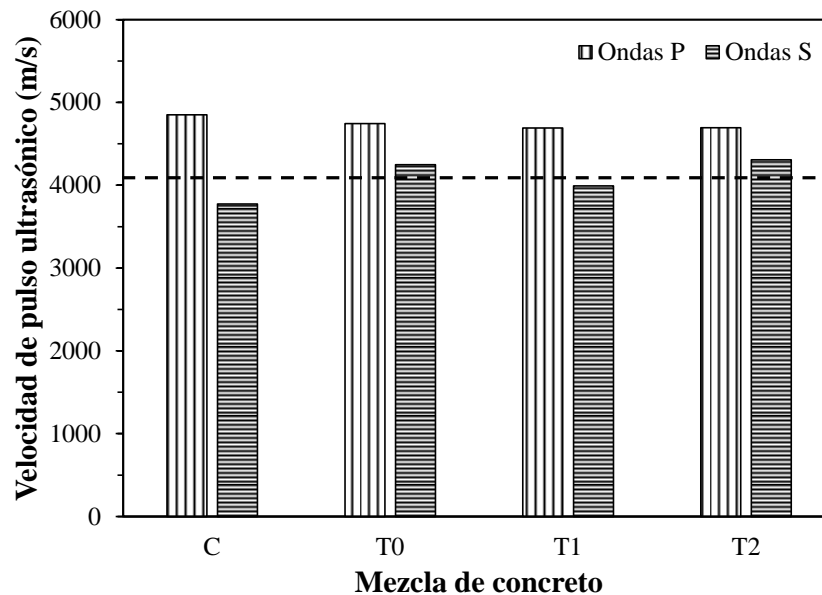


Figura 1. Velocidad de pulso ultrasónico de las ondas P y S de las mezclas de concreto.

3.2 Atenuación temporal de las ondas P y S

La atenuación temporal de las ondas P y S de las mezclas de concreto es mostrada en la Figura 2. Los resultados indican la atenuación temporal de las ondas P no fueron afectadas significativamente por la sustitución parcial de CP por CV y CV+CBC-st, donde las cuatro mezclas de concreto presentaron valor de entre 10000 and 15000 dB/s. Sin embargo, se aprecia una reducción importante en los valores de atenuación temporal de las ondas S con la sustitución parcial

del CP por CV y CV+CBC-st, donde la mezcla T2 presentó el valor más bajo. Lo anterior es de destacar ya que de acuerdo con Hussein et al., (2022) y Cheng et al., (2019) la atenuación temporal de un material es influenciada por su porosidad, esto quiere decir que la adición de CV y CV+CBCst reduce la porosidad e interconectividad de la red de poros de las mezclas T0, T1 y T2.

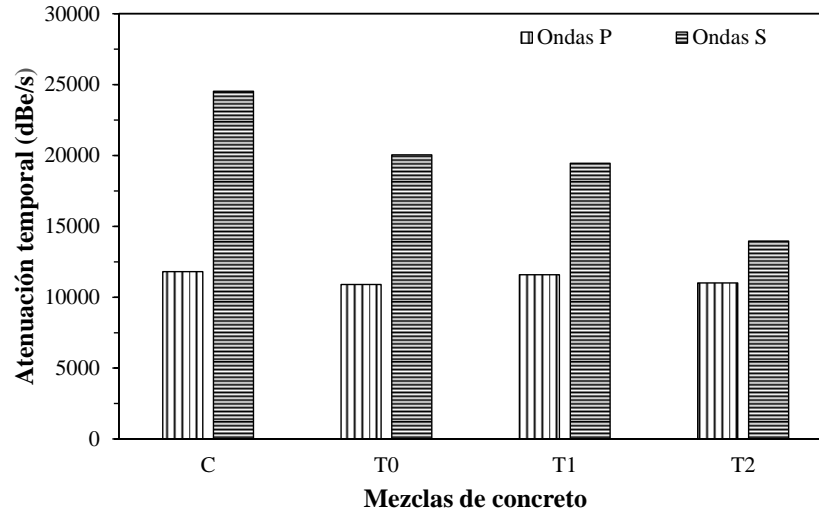


Figura 2. Atenuación temporal de las ondas P y S de las mezclas de concreto

3.3 Atenuación espacial de las ondas P y S

El efecto de la adición de CV y CV+CBC-st por CP en la atenuación espacial de las mezclas de concreto es ilustrado en la Figura 3. Se observa que dicha adición no tiene un efecto en la atenuación espacial de las ondas P, donde los valores de las mezclas C, T0, T1 y T2 estuvieron dentro del rango del 4.25 a 4.32 dB/cm. En lo que refiere a la atenuación espacial de las ondas S, se observa un ligero decremento en el valor de la mezcla con 20%CV+20%CBC-st, mientras que las demás presentan valores similares a la mezcla C.

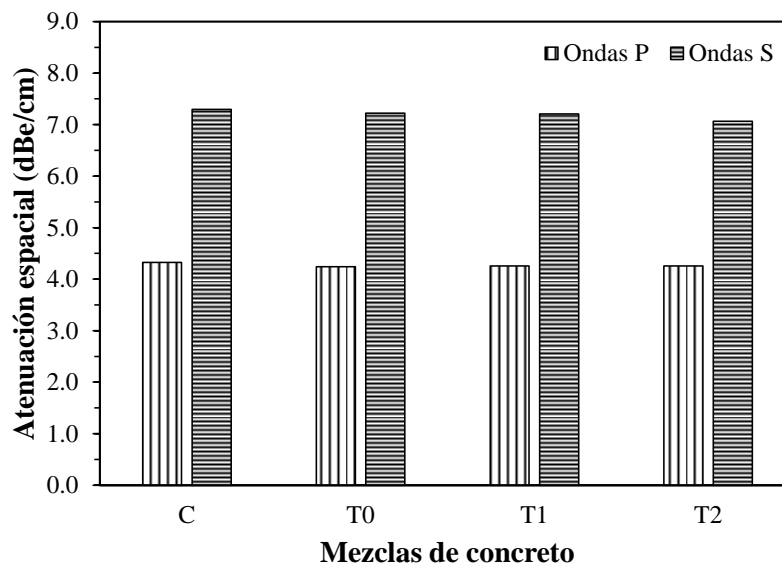


Figura 3. Atenuación espacial de las ondas P y S de las mezclas de concreto.

Al igual que el parámetro de atenuación temporal, la atenuación espacial es sensible a la porosidad de los materiales basados en CP; sin embargo, Lafhaj et al., (2006) mencionan que este parámetro ultrasónico también es sensible a cambios microestructurales. Lo anterior da lugar a mencionar que la sustitución de CP por 20%CV+20%CBC-st produce un concreto con una microestructura más compleja y refinada, lo cual fue demostrado por imágenes de microscopía electrónica de barrido en investigaciones previas (Franco-Luján et al., 2019).

3.4 Contenido energético de las sondas P y S

La Figura 4 muestra el contenido energético de las ondas P y S de las mezclas de concreto. En lo que se refiere a las ondas P, la sustitución parcial del CP por CV y CV+CBC-st no tiene un efecto en el contenido energético, ya que las cuatro mezclas de concreto presentaron valores de entre 2.40×10^6 y 2.60×10^6 J. Sin embargo, dicho parámetro ultrasónico de las ondas S incrementa ligeramente cuando el CP es sustituido por 20%CV (T0) y 20%CV+10%CBC-st (T1). Este incremento es mayor cuando dicha sustitución fue de 20%CV+20%CBC-st, lo que indica que la adición de CBC-st tiene un efecto importante en el contenido energético de las ondas S. Lo anterior concuerda con los datos de atenuación espacial de las ondas S; no obstante, los resultados muestran que el contenido energético es un parámetro ultrasónico más sensible a los cambios microestructurales ocasionados por la sustitución del CP. Lo anterior puede ser debido a la reacción puzolánica de la CBC-st, así como el efecto de relleno de sus partículas. En el primer caso, C-S-Hs secundarios son creados, los cuales no son iguales a aquellos producidos en la hidratación del CP (Kunther et al., 2015). Respecto a las partículas de la CBC-st, Ríos-Parada et al., (2017) menciona que su morfología es completamente diferente que las partículas de CP. Estos factores no solo reducen la porosidad; sino que también, producen concretos con una microestructura más compleja y como consecuencia un contenido energético de las ondas S mayor.

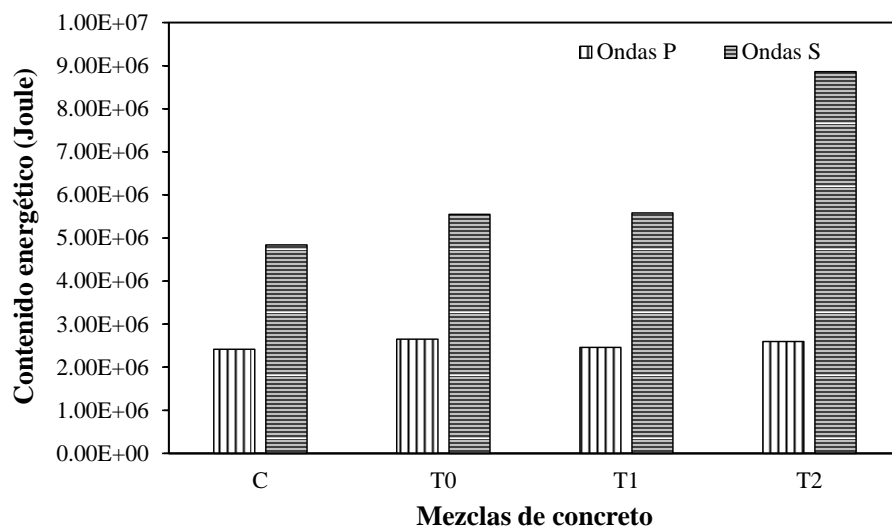


Figura 4. Contenido energético de las ondas P y S de las mezclas de concreto.

3.5 Propiedades de durabilidad de los concretos

Las propiedades de durabilidad de los prismas de concreto se muestran en la Figura 5, donde se observa que la sustitución parcial de CP por CV y CV+CBC-st tiene un efecto positivo en la corriente total de corrosión (CT) y coeficientes de difusión (C_D). Lo anterior puede ser explicado

por la refinación de la matriz cementante de los concretos T0, T1 y T2 como consecuencia de la reacción puzolánica y efecto de relleno de las partículas de CV+CBC sin reaccionar (Ahmad et al., 2021; Toutanji et al., 2004). Este refinamiento ocasiona una reducción en la porosidad e interconectividad de la red de poros y, por lo tanto, la penetración de los iones cloruro (Cl^-) es menor comparado con la mezcla con solo CP. Al existir una reducción de Cl^- en la matriz cementante de T0, T1 y T2, la actividad corrosiva del acero embebido también se reduce y como consecuencia también la TC. Así mismo, la menor concentración de Cl^- también explica el incremento de la RE de las mezclas de concretos, ya que esta propiedad de durabilidad es fuertemente influenciada por la concentración iónica en la solución de poro de la matriz cementante (Andrade et al., 2014).

Estos resultados evidencian la clara influencia de la adición de CV y CV+CBC en las propiedades de durabilidad de los concretos estudiados, además en la sección anterior se mostró que dicha adición también influyó en la atenuación temporal, espacial y contenido energético de las ondas S. Lo anterior permite realizar una correlación entre los parámetros ultrasónicos ya mencionados, la cual se analiza en la siguiente sección.

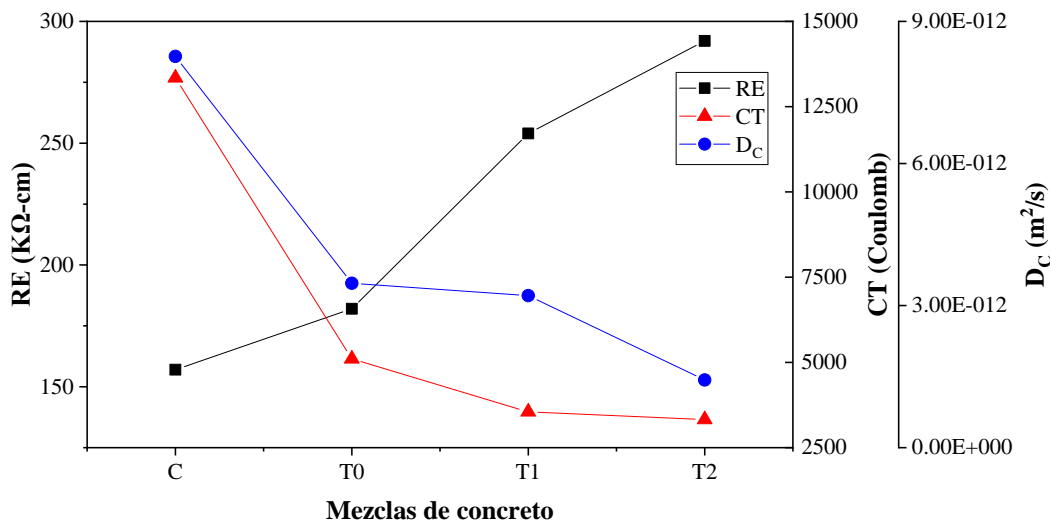


Figura 5. Propiedades de durabilidad de los concretos con CV y CV+CBC-st.

3.6 Correlación entre los parámetros ultrasónicos y de las propiedades de durabilidad de los concretos

La Figura 6 ilustra las correlación entre los parámetros ultrasónicos de atenuación temporal (A_t -s), atenuación espacial (A_e -s) y contenido energético (E -s) de las ondas S con las propiedades de durabilidad de las mezclas de concreto. En lo que se refiere a los C_D se observa una correlación logarítmica y directamente proporcional con los parámetros de A_t -s y A_e -s, donde el incremento de la sustitución de CP por CV y CV+CBC-st produce concretos con menores C_D y atenuaciones más bajas. En el caso de E -s vs C_D , la correlación fue potencial e inversamente proporcional, es decir que la sustitución de CP produjo concretos con menores C_D y mayor E -s.

Respecto a la RE de los concretos estudiados, se observa una correlación lineal e inversamente proporcional con los parámetros de A_t -s y A_e -s, mientras que E -s, la correlación también es lineal pero directamente proporcional. Lo anterior concuerda con los C_D , es decir que el remplazo parcial de CP por CV y CV+CBC produce concretos con mayores valores de RE, menores atenuaciones y

con mayor E-s. Estas correlaciones pueden ser explicadas por refinamiento de la matriz cementantes consecuencia de la reacción puzolánica de la CV y CV+CBC-st, la cual produce C-S-Hs secundarios que son depositados en la matriz de concreto reduciendo su porosidad e interconectividad de los poros y por último incrementando su tortuosidad (Franco-Luján et al., 2022). Lo anterior ocasiona que las señales ultrasónicas de las ondas S tengan una menor atenuación y mayor contenido energético y que a su vez la concentración de Cl⁻ en los concretos T0, T1 y T2 decrezca y por consiguiente la RE aumente.

Continuando con el análisis, se observa que la correlación entre TC con At-s y Ae-s son logarítmicas, mientras que aquella entre TC y E-s es potencia e inversamente proporcional. Además, los coeficientes de determinación (R²) son menores respecto a las correlaciones de los parámetros ultrasónicos con D_c y RE. Lo anterior puede ser debido a que el proceso de corrosión es un fenómeno complejo, donde además de la concentración de agentes agresivos como Cl⁻, también existen otros factores tales como la temperatura, humedad, ligado de Cl⁻, concentración de oxígenos (Hornbostel et al., 2013; Hu et al., 2022).

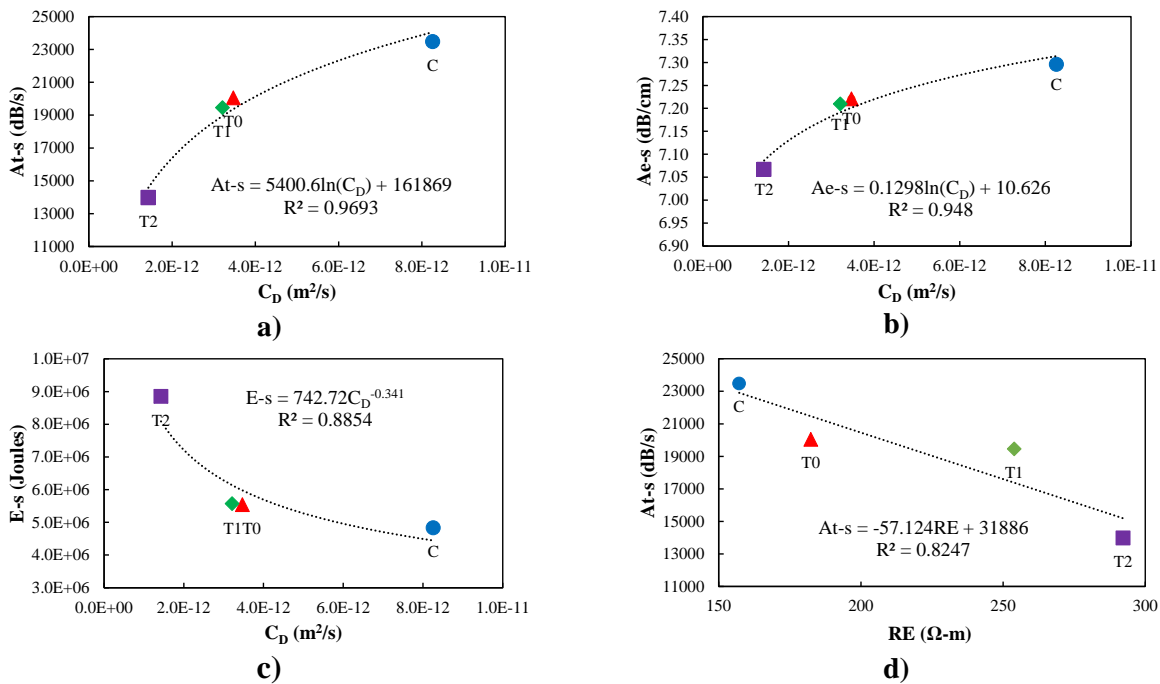


Figura 6a. Correlación entre los parámetros ultrasónicos de las ondas S y las propiedades de durabilidad de los concretos



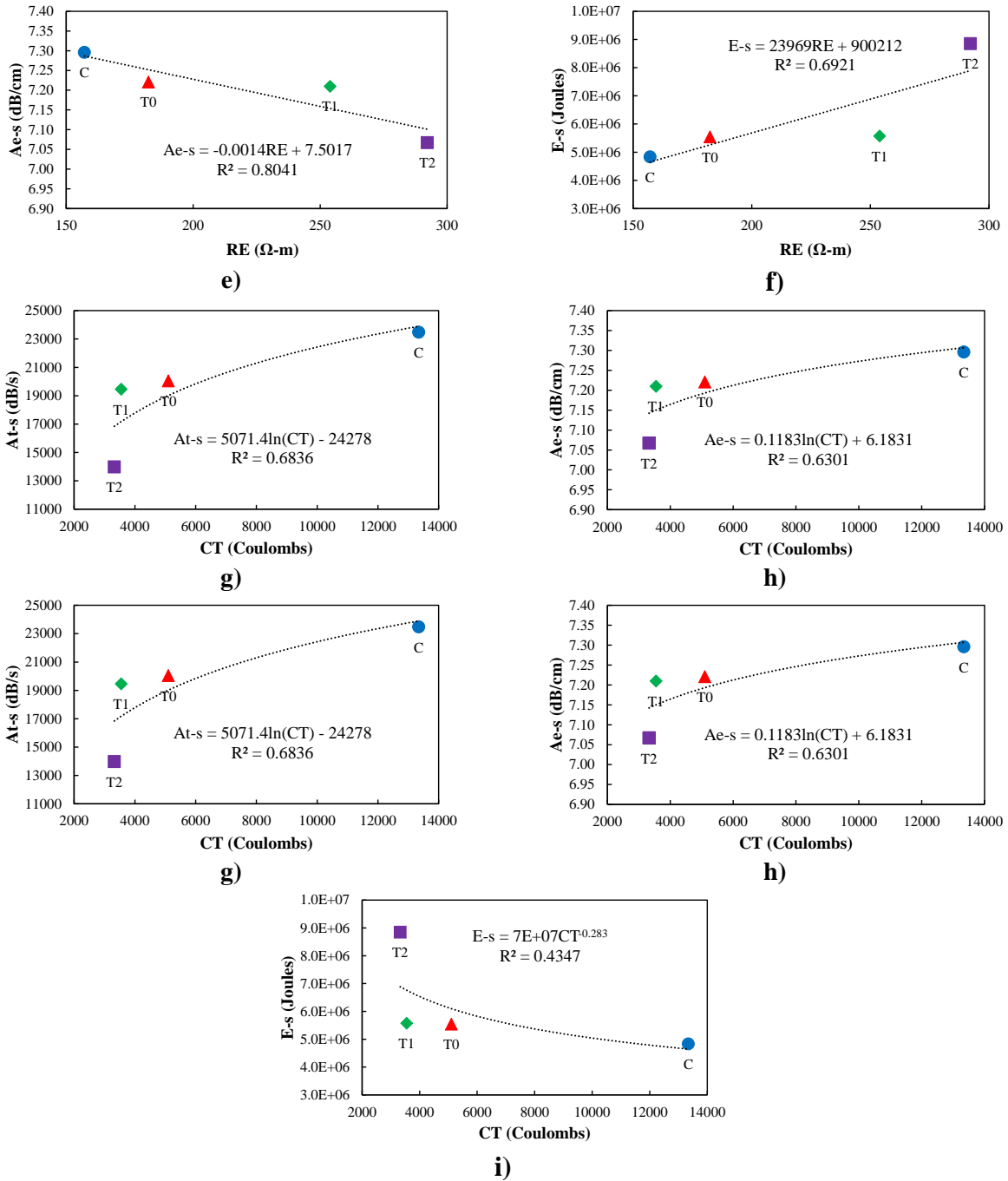


Figura 6b. Correlación entre los parámetros ultrasónicos de las ondas S y las propiedades de durabilidad de los concretos.

La correlación entre los parámetros ultrasónicos de la Todos los factores mencionados previamente provocan que la corrosión sea un proceso no lineal; sin embargo, se debe de destacar que las correlaciones de los parámetros ultrasónicos con la TC de los concretos son acordes con las correlaciones de C_D y RE , ya que una menor difusividad dentro de los concretos con CV y $CBC-st$, ocasiona una menor cantidad de Cl^- se encuentre libres en la solución de poro y por consiguiente una menor actividad corrosiva en el acero de refuerzo de los concretos T_0 , T_1 y T_2 .



Los resultados de la presente investigación permiten mencionar que el uso de señales guiadas por ultrasonido de las ondas S, específicamente las atenuaciones temporal y espacial, así como el contenido energético pueden ser empleadas para estimar las propiedades de durabilidad de concretos donde el CP fue sustituido por CV y CV+CBC-st.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de los parámetros ultrasónicos de las mezclas de concreto y su relación con las propiedades de durabilidad permiten mencionar las siguientes conclusiones:

- El efecto de la sustitución parcial de cemento Portland por ceniza volante y ceniza de bagazo de caña no tienen un efecto en las velocidades de pulso ultrasónico de las ondas P y S.
- Los parámetros ultrasónicos de atenuación temporal, atenuación espacial y contenido energético de las ondas S mostraron diferencias cuando del cemento Portland fue sustituido por CV y CV+CBC-st.
- El parámetro ultrasónico de contenido energético de las ondas S fue más sensible a los cambios microestructurales ocasionados por la sustitución de cemento Portland por CV y CV+CBC-st en comparación de la atenuación espacial de la onda S.
- Las correlaciones entre la atenuación temporal, atenuación espacial y contenido energético de las ondas S con las propiedades de durabilidad de los concretos con CV y CV+CBC-st mostraron que dichos parámetros pueden ser empleados para estimar la difusividad de iones cloruro, resistividad eléctrica y corrosión total.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Interdisciplinario de Investigación de Desarrollo Regional Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional por las facilidades otorgadas para la realización de la presente investigación.

6. REFERENCIAS

- Ahmad, M. R., Chen, B., & Ali Shah, S. F. (2021). Mechanical and microstructural characterization of bio-concrete prepared with optimized alternative green binders. *Construction and Building Materials*, 281, 122533. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122533>
- American Association of State Highway and Transportation Officials, Estándar Method of Test for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (AASHTO T358-15), AASHTO, Washington, DC, 2014.
- Andrade, C., D'Andrea, R., & Rebolledo, N. (2014). Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. *Cement and Concrete Composites*, 47, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.022>
- ASTM G109-21 Standard Test Methods for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments



- Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 104, 84–101. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2020.11.020>
- Berenguer, R., Lima, N., Pinto, L., Monteiro, E., Povoas, Y., Oliveira, R., & Lima, N. B. D. (2021). Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides. *Journal of Building Engineering*, 41, 102358. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102358>
- Bezerra, A. K. L., Melo, A. R. S., Freitas, I. L. B., Babadopulos, L. F. A. L., Carret, J. C., & Soares, J. B. (2023). Determination of modulus of elasticity and Poisson's ratio of cementitious materials using S-wave measurements to get consistent results between static, ultrasonic and resonant testing. *Construction and Building Materials*, 398, 132456. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132456>
- Cheng, Y., Song, Z., Jin, J., Wang, J., & Wang, T. (2019). Experimental study on stress wave attenuation and energy dissipation of sandstone under full deformation condition. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(23), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S12517-019-4915-X/METRICS>
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., & Karakoç, M. B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2329–2336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Jiménez-Quero, V. G., & Montes-García, P. (2023). Reliability of electrical resistivity on the long-term monitoring of concrete. *Results in Engineering*, 18, 101154. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101154>
- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2019). Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 198, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.004>
- Franco-Luján, V. A., Maldonado-García, M. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Montes-García, P. (2022). Effect of Cl⁻-induced corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel embedded in ternary concretes containing FA and UtSCBA. *Construction and Building Materials*, 339, 127655. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127655>
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50–57. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2016.02.008>
- Helal, J., Sofi, M., & Mendis, P. (2015). Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97–105. <https://doi.org/10.56748/ejse.141931>
- Hornbostel, K., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cement and Concrete Composites*, 39, 60–72. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.03.019>
- Hu, J. Y., Zhang, S. S., Chen, E., & Li, W. G. (2022). A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construction and Building Materials*, 325, 126718. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126718>
- Hussein, M. I., Patrick, I., Banerjee, A., & Adhikari, S. (2022). Metadamping in inertially amplified metamaterials: Trade-off between spatial attenuation and temporal attenuation. *Journal of Sound and Vibration*, 531, 116977. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2022.116977>
- Jain, A., Kathuria, A., Kumar, A., Verma, Y., & Murari, K. (2013). Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. *Procedia Engineering*, 54, 241–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.022>



- Kunther, W., Lothenbach, B., & Skibsted, J. (2015). Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure. *Cement and Concrete Research*, 69, 37–49. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2014.12.002>
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., & Kaczmarek, M. (2006). Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 625–633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>
- Laureti, S., Ricci, M., Mohamed, M. N. I. B., Senni, L., Davis, L. A. J., & Hutchins, D. A. (2018). Detection of rebars in concrete using advanced ultrasonic pulse compression techniques. *Ultrasonics*, 85, 31–38. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2017.12.010>
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., & García-del-Cura, M. A. (2011). Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Engineering Geology*, 119(3–4), 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.002>
- Molero, M., Segura, I., Aparicio, S., Fuente, J. V., Molero, M., Segura, I., & Aparicio, S. (2017). Influence of aggregates and air voids on the ultrasonic velocity and attenuation in cementitious materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 8189(August), 37–41. <https://doi.org/10.3166/EJECE.15.501-517>
- Morris, W., Vico, A., & Vázquez, M. (2004). Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. *Electrochimica Acta*, 49(25), 4447–4453. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.001>
- Mutlib, N. K., Baharom, S. Bin, El-Shafie, A., & Nuawi, M. Z. (2016). Ultrasonic health monitoring in structural engineering: buildings and bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(3), 409–422. <https://doi.org/10.1002/STC.1800>
- NMX-C-414-ONNCCE-2004: Industria de la construcción–cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba, Normas Mexicanas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V. G., Valdez-Tamez, P. L., & Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, 157, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>
- Saraswathy, V., & Song, H. W. (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1779–1784. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.05.037>
- Shariq, M., Prasad, J., & Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 40, 944–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070>
- Shen, J., Xu, Q., & Wang, S. (2023). Characterization of thermal damage and compressive strength during drying at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Journal of Building Engineering*, 75, 107029. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107029>
- Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Kumar, K. R. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54–58. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.08.202>



Sun, H., & Zhu, J. (2020). Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave. *Ultrasonics*, 103, 106096. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2020.106096>

Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2009). Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2641–2646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008>

Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R., & Danson, A. (2004). Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.017>

Trtnik, G., & Gams, M. (2014). Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. *Ultrasonics*, 54(1), 66–75. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2013.07.010>

Valdeon, L., de Freitas, M. H., & King, M. S. (1996). Assessment of the quality of building stones using signal processing procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29(4), 299 LP – 308. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P4.04>



Evaluación por durabilidad de mezclas de mortero y concreto con sustitución de Ceniza Volante tipo F Natural (CVN) y Microceniza Volante (MCV)

A. López Miguel^{1*}, S. F. Gonzalez González², J. T. Pérez Quiroz¹,
J. A. Cabello Méndez¹, A. Moreno Valdez¹.

*Autor de Contacto: Abraham.Lopez@imt.mx

¹ Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México.

² Academia de Ingeniería en Nanotecnología, Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Hidalgo Michoacán, México.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación de la influencia de la Microceniza Volante (MCV) en las propiedades de durabilidad de mezclas de mortero y concreto. La reducción del tamaño de partículas se realizó mecánicamente, se fabricaron cubos de mortero de 5 cm y cilindros de concreto de 10 x 20cm. Se realizó la caracterización de la Ceniza Volante por Microscopía Electrónica de barrido, Energía Dispersiva de Rayos X y Difracción de Rayos X. La evaluación del concreto por durabilidad se realizó mediante la medición de la resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y permeabilidad al ion cloruro. Los resultados evidencian las mejoras significativas de las propiedades de durabilidad (Resistividad Eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico y Permeabilidad al ion cloruro) Vs probetas con ceniza Volante natural y probetas blanco. Esto se atribuye a que se favorece la formación de gel C-S-H en mayor cantidad, gracias al incremento de área superficial de las micropartículas que lo convierten en un material más reactivo químicamente y capaz de formar mayor cantidad de enlaces con el Ca y Si.

Palabras clave: Ceniza Volante; Micropartículas; Durabilidad; Concreto; Mortero.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, debido a su disponibilidad, durabilidad, resistencia mecánica y capacidad de adaptación a diferentes formas y tamaños, sin embargo, las propiedades de durabilidad del concreto son de gran importancia debido a que le atribuyen la capacidad para resistir al deterioro y, mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo bajo las condiciones ambientales y de servicio a las que está expuesto. El concreto es una mezcla de cemento, agua y agregados áridos (grava y arena), siendo el cemento el componente vital en la mezcla de concreto, ya que al entrar en contacto con el agua favorece reacciones químicas de hidratación las cuales forman compuestos cristalinos, creando una pasta pegajosa y plástica que es capaz de endurecer y formar enlaces altamente resistentes de hidrato de silicato de calcio (C-S-H), propiedad que es causada por su composición química que consiste Si, Ca, Al y Fe.

Sin embargo, la producción industrial de cemento impacta directamente al ambiente debido a la enorme liberación de CO₂ que conlleva su proceso de fabricación, es por esto por lo que se han buscado alternativas sustentables para sustituir el cemento y así lograr disminuir la generación de CO₂, al mismo tiempo se busca que el sustituto de este material mejore por un nivel muy alto las propiedades de durabilidad del concreto. Una alternativa que ha sido utilizada desde hace tiempo es el uso de ceniza volante como sustituto del cemento en un porcentaje no mayor al 30% según la normalización ASTM. Las propiedades de los micromateriales mejoran debido al aumento de su área superficial lo que significa que hay una mayor cantidad de átomos o moléculas expuestas en la superficie del material, facilita las interacciones y reacciones químicas con el entorno, llevando así a la mejora continua de las propiedades de durabilidad de mezclas de concreto con 30% de contenido de microceniza volante (MCV).

El este trabajo se evalúa el uso de la ceniza volante molida como sustituto cementante reduciendo el tamaño a partir de molienda mecánica hasta obtener microceniza volante (MCV).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

Tipo I Portland Compuesto 30 R (CPC 30R) según lo definido por la norma ASTM C150. La composición química se da en la tabla 1.

2.1.2 Ceniza volante

La ceniza volante utilizada en este estudio fue obtenida de la central termoeléctrica López Portillo ubicada en Coahuila México, con un tamaño de partícula máximo de 20 μm . La composición química y, además, la distribución y morfología se dan en las figuras #1, #2 y #3. Las fases cristalinas presentes obtenidas a partir del patrón de difracción de rayos x se muestran en la figura #4.

2.1.3 Microceniza volante

Las microceniza volante (MCV) incorporadas en este estudio se obtuvieron a partir de un proceso de molienda mecánica por 14 horas de la ceniza volante natural la cual fue molida en una relación 1:3 material y bolas de acero inoxidable respectivamente el tamaño de partícula final tenía un



tamaño de entre 100 y 600 nm. Las propiedades químicas se muestran a partir de un análisis elemental y EDS en la figura #5 y #6. La morfología de las micropartículas se muestra en la figura #7 y #8. Las fases cristalinas presentes se muestran en el patrón de difracción de rayos x de la figura #9.

2.1.4 Arena

Se utilizó piedra caliza triturada conocida como agregado fino de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C33. Para los morteros la arena se tamizó para controlar y obtener la distribución granulométrica requerida según la norma ASTM C 778, como se muestra en la tabla 2 (tabla de tamices).

2.1.5 Agregado grueso

Se utilizó agregado con un tamaño de 3/4 de pulgada.

2.1.6 Agua de mezcla superplastificante

Agua de grifo con un pH equilibrado neutro de 7.

2.2 Fabricación de morteros

El diseño de mezcla se realizó de acuerdo con el método de ensayo estándar para la fabricación de cubos de mortero de 5 cm, basado en la norma ASTM C 109 (tabla 3). Este método de ensayo proporciona las dosificaciones de cemento y arena, las cuales deberán ser 1 parte de cemento por 2.75 partes por peso de arena estándar graduada, con una relación agua/material cementante de 0.755 para todos los cementos portland. Se fabricaron 3 tipos de mezclas de mortero las cuales contenían 30% de Ceniza volante Natural (CVN), 30% de microceniza volante (MCV) como sustituto parcial de cemento respectivamente y mezclas sin sustituto (blancos) de acuerdo con las cantidades especificadas en la tabla 3 para la fabricación de 9 cubos, posteriormente realizaron los cálculos correspondientes para las mezclas con material cementante sustituto, las cantidades finales se muestran en la tabla 4.

2.3 Fabricación de concreto

Se fabricaron tres diferentes mezclas de concreto las cuales contenían 30% de Ceniza volante Natural (CVN), 30% de microceniza volante (MCV) como sustituto de cemento respectivamente y mezclas sin sustituto (blancos) y relación agua/material cementante = 0.62. El diseño de mezcla se realizó con base al método ACI. 211.1 para la obtención de 3 cilindros de concreto de 10x20 cm de cada mezcla. Posteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes para las mezclas con material cementante sustituto, las cantidades finales se muestran en la tabla 5.

2.4 Ensayos de durabilidad

Se realizaron ensayos de durabilidad a las probetas fabricadas, los ensayos se realizaron siguiendo la normatividad existente para cada uno de ellos. Resistividad eléctrica (NMX-C-514), velocidad de pulso ultrasónico (ASTM -C-597) y permeabilidad ion-cloruro (ASTM-C-1202).

Tabla 1. Composición química del Cemento Portland Compuesto.

Nombre	Nomeclatura	% de contenido
Silicato tricálcico	$3CaOSiO_2$	48
Silicato dicálcico	$2CaOSiO_2$	27
Aluminato tricálcico	$3CaOSiO_3$	12
Aluminoferrito tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	8

Tabla 2. Porcentaje de arena cribada para elaboración de cubos de mortero (ASTM-C-778).

Numero de malla	Porcentaje
600 μm (No. 30)	2%
425 μm (No. 40)	28%
300 μm (No. 50)	45%
150 μm (No. 100)	23%
Pasa malla (No. 100)	2%

Tabla 3. Porcentaje de arena normalizado para la fabricación de morteros (Norma ASTM C 109).

Materiales	Número de cubos	
	6	9
Cemento	500 g	740 g
Arena	1375 g	2035 g
Agua	242 ml	359 ml

Tabla 4. Materiales y cantidades utilizadas para la fabricación de las mezclas de mortero

Material	Mezcla sin sustituto (g)	Mezcla con CVN (g)	Mezclas con MCV (g)
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento	740	518	518
Sustituto	NA	222	222
Agua	559 ml	559 ml	559 ml

Tabla 5. Materiales y cantidades utilizadas para la fabricación de las mezclas de concreto de acuerdo con el método ACI. 211.1.

Material	Mezcla sin sustituto (g)	Mezcla con CVN (g)	Mezcla con MCV (g)
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento CPC 30R	1840	1288	1288
Sustituto	NA	552	552
Agua	1150ml	1150 ml	1150 ml
Arena	3250	3250	3250
Grava	6400	6400	6400

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización

3.1.1 Microscopia electrónica de barrido

Se obtuvieron micrográficas MEB de la ceniza volante natural sin molienda a 1000x y 5000x en las cuales se observa que la morfología de la ceniza volante natural es completamente esférica además de que tiene una elevada dispersión de partículas ya que no se observan aglomeradas.

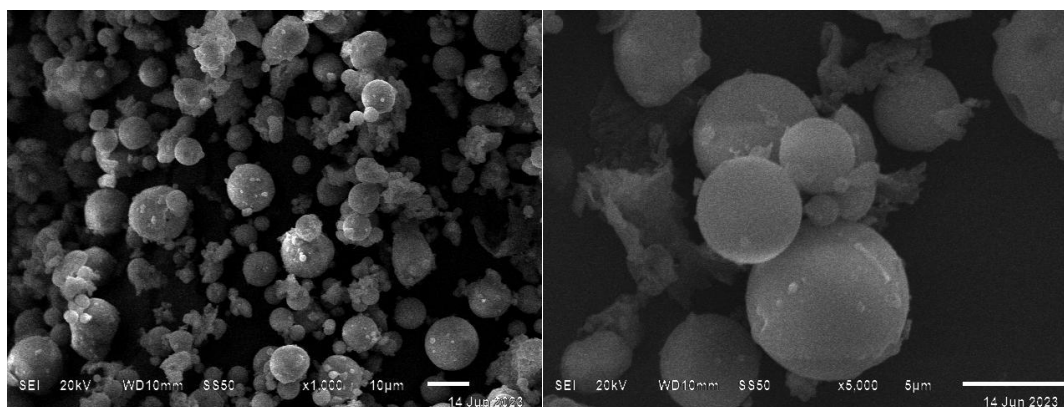


Figura 1. Micrográficas MEB de ceniza volante natural sin molienda.

3.1.2 Mapeo químico elemental

Los resultados del análisis elemental muestran que la ceniza volante natural tipo F utilizada en este trabajo contiene alto contenido de Silicio, Oxígeno, Aluminio, Carbono, Calcio y una cantidad mínima de hierro como se observa en el mapeo químico de la figura 2.

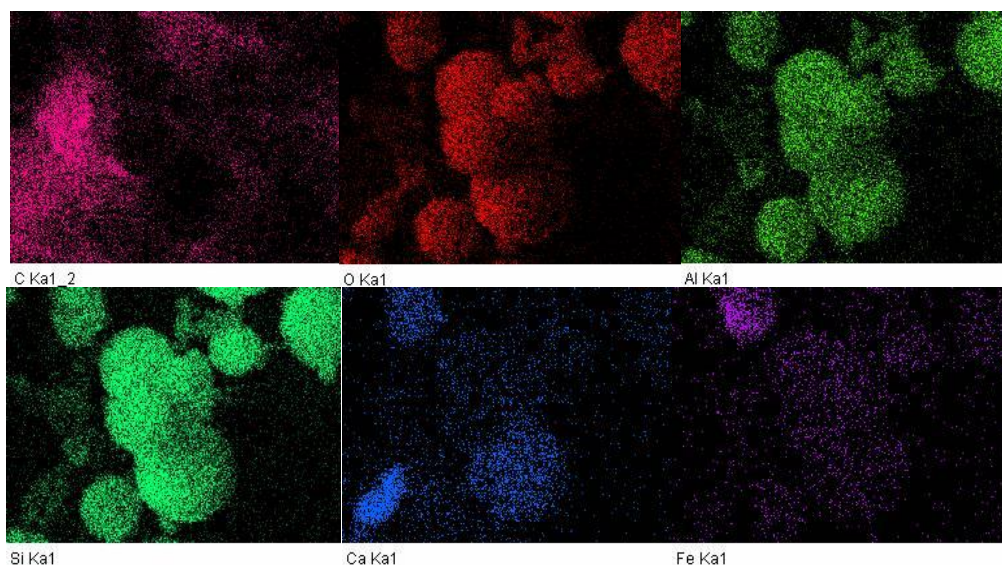


Figura 2. Mapeo químico elemental de la ceniza volante natural sin molienda

3.1.3 Espectroscopia de rayos x de energía dispersiva EDS

El espectro EDS muestra la composición química de la ceniza volante natural tipo F, en este se puede observar de acuerdo con el tamaño de los picos la cantidad de contenido de cada uno de los elementos mostrados en el mapeo químico elemental. El silicio es el elemento más abundante seguido por el oxígeno, calcio y el aluminio. Sin embargo, otros elementos presentes en menor cantidad son el potasio, magnesio, titanio, carbono y hierro (Ver tabla 6).

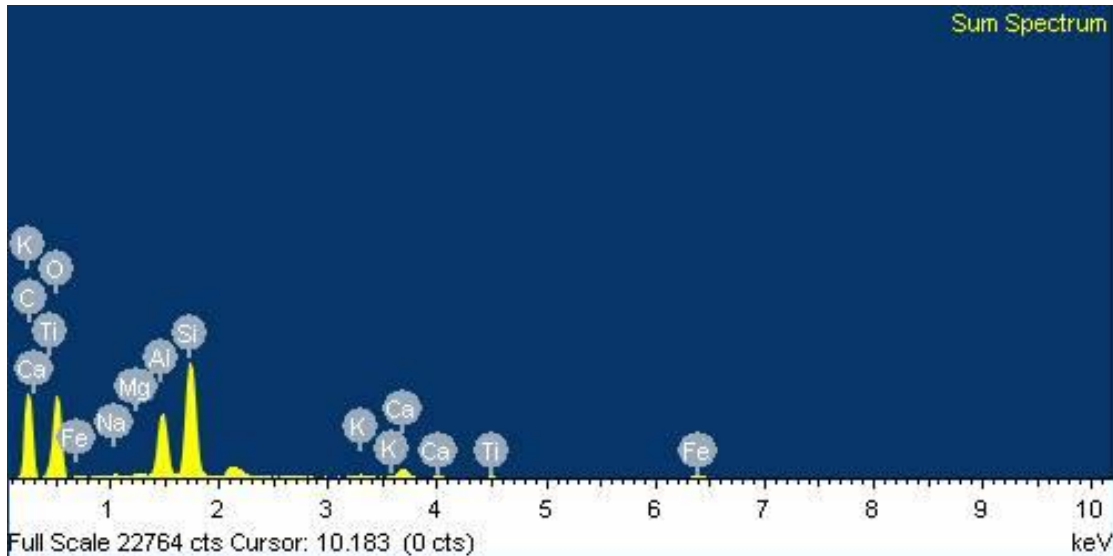


Figura 3. Análisis de composición química EDS de la ceniza volante natural sin molienda.

Tabla 6. Composición química de la CVN y microceniza volante.

Elemento	CV	MCV
	Peso (%)	Peso (%)
C	23.16	48.18
O	26.31	
Mg	1.25	0.54
Al	9.06	5.71
Si	15.08	42.57
K	0.25	1.05
Ca	0.66	0.25
Ti	0.33	0.41
Fe	23.90	1.29

3.1.4 Difracción de rayos X

Los resultados de difracción de rayos x de la ceniza volante natural sin molienda tipo F muestran que los picos característicos están en un ángulo 2θ de que va de 10 a 80 grados, sin embargo, el pico característico se encuentra en un ángulo de 27 y es correspondiente al SiO_2 con una fase cristalina que corresponde al cuarzo siendo la estructura más abundante en el material, de igual manera podemos encontrar otras como la mullita siendo los picos con menor intensidad.

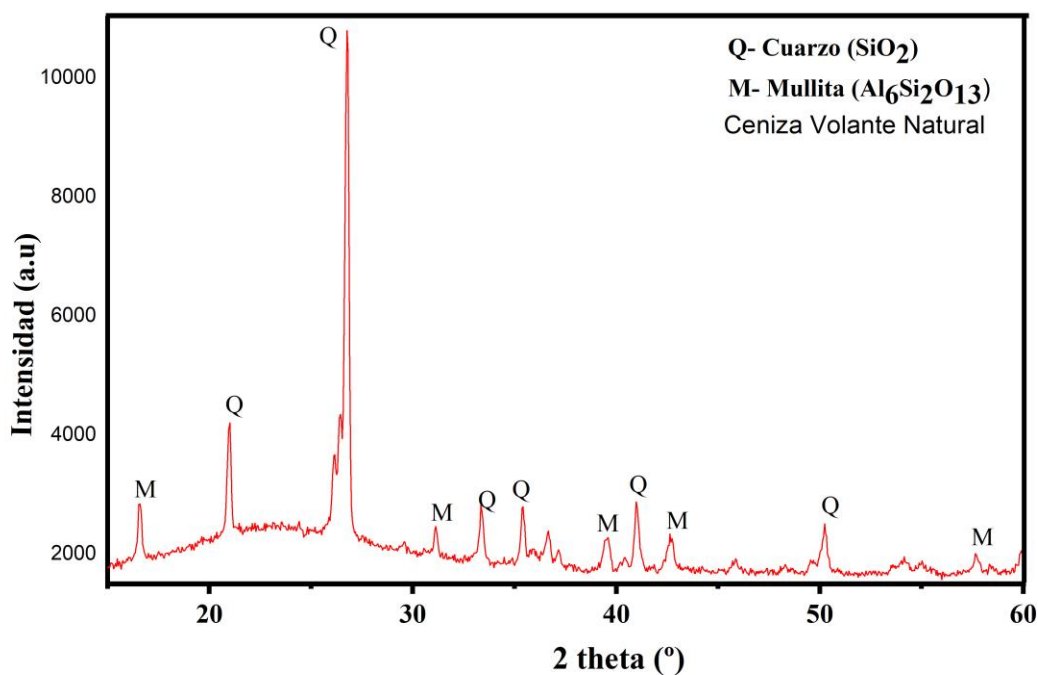


Figura 4. Patrón de Difracción de Rayos X de la ceniza volante natural sin molienda.

3.1.5 Microscopía electrónica de barrido

Se obtuvieron micrografías MEB a 1000x y 5000x las cuales muestran que la molienda mecánica durante 14 horas generó en la mayoría de las micropartículas una morfología amorfa además de que las partículas se muestran aglomeradas debido a la reducción de tamaño.

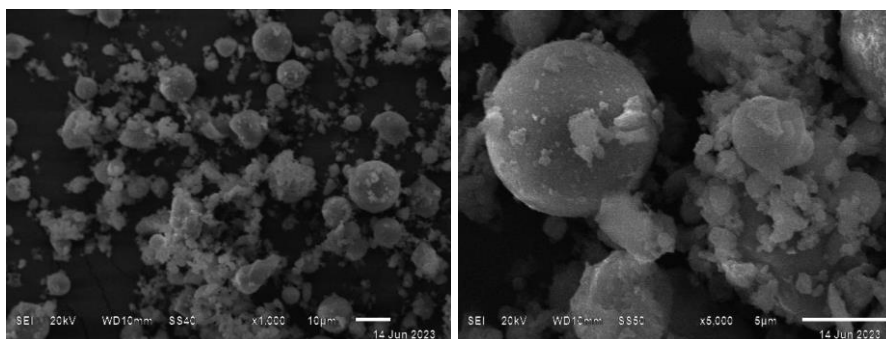


Figura 5. Micrografías MEB de microceniza volante (MCV).

3.1.6 Mapeo químico elemental

El análisis elemental muestra un significativo aumento en el contenido de silicio al igual que de aluminio calcio y oxígeno. Lo cual indica que dentro de las esferas de ceniza volante natural se encontraban atrapadas cantidades de estos elementos y al momento de romperse con la molienda estas fueron descubiertas.

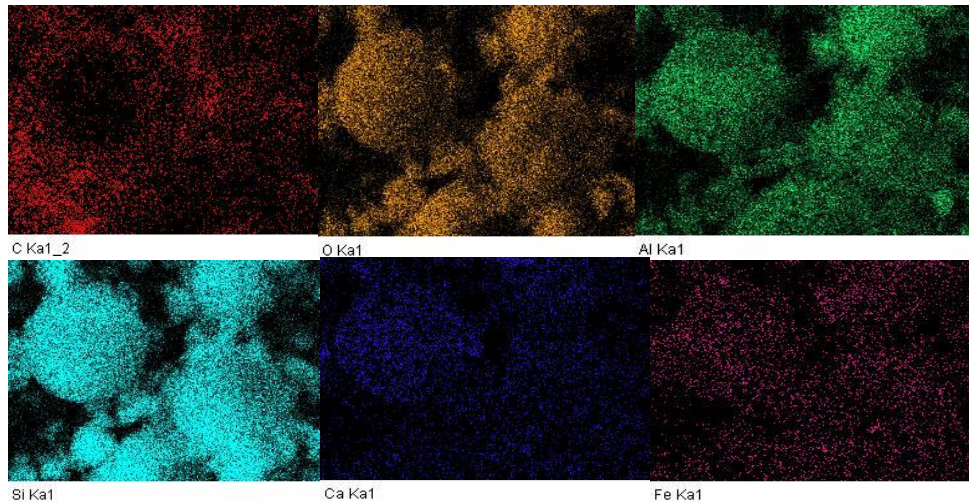


Figura 6. Análisis elemental de microceniza volante (MCV).

3.1.7 Espectroscopia de rayos x de energía dispersiva EDX

El espectro EDS confirma el aumento del contenido de Silicio, Aluminio, Oxígeno y calcio en las microceniza volante, mostrando un significativo desplazamiento en los picos de estos elementos. De igual manera podemos observar otro pico de hierro, lo cual se atribuye al desgaste de las bolas de acero utilizadas en la molienda.

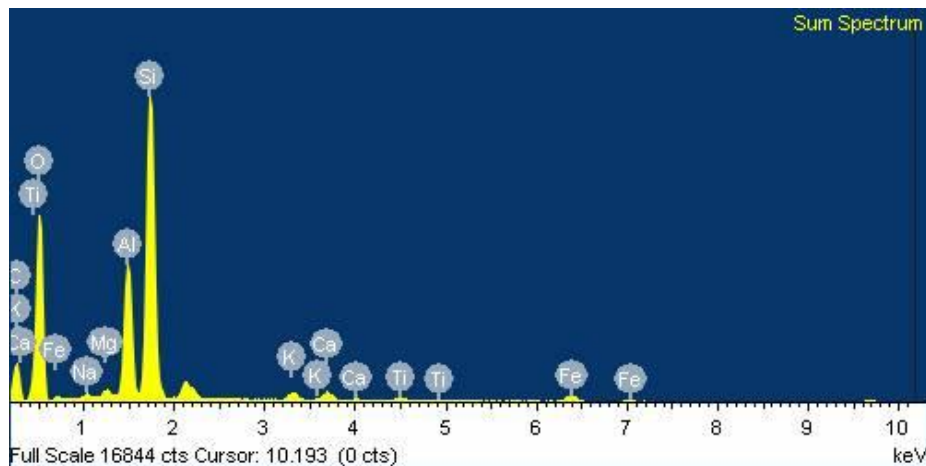


Figura 7. Análisis de Espectroscopia de Energía Dispersiva de microceniza volante.

3.1.8 Difracción de Rayos X

El patrón de Difracción de Rayos X presenta que la intensidad de los picos disminuyo debido al ensanchamiento lo cual es indicativo de la disminución en el tamaño de partícula. La fase cristalina presente es el cuarzo es atribuido al SiO_2 sin embargo también podemos encontrar mullita la cual es atribuida al contenido de aluminio del material.

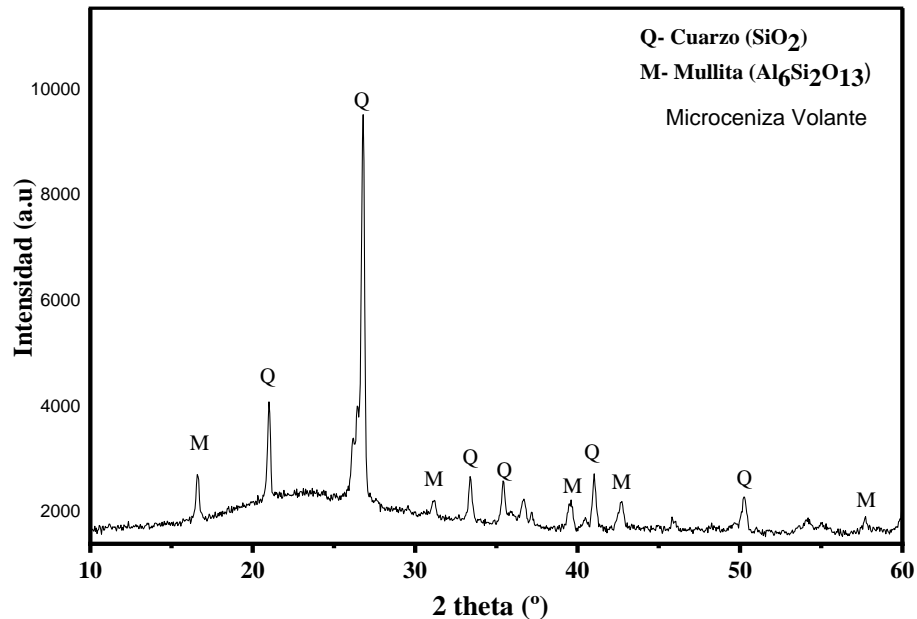


Figura 8. Patrón de Difracción de Rayos X de microceniza volante.

3.1.9 Microscopía electrónica de barrido de mezclas de concreto endurecido

La figura 9 muestra el cambio de morfología de las probetas de concreto de acuerdo con el sustituto cementante utilizado, como se puede observar, la muestra con solo CPC es menos densa debido al alto contenido de huecos, lo cual es asociado a la naturaleza de la reacción rápida del cemento. En cambio, la microestructura con sustitución de CPC por el 30% muestra menor porosidad. Finalmente, la mezcla con 30% de microceniza volante muestra una microestructura evidentemente densa, debido al efecto de relleno que provocan las micropartículas al ser de un menor tamaño, de igual manera el aumento del área superficial de la microceniza volante aumento su reactividad química lo cual proporciono más sitios de nucleación en zonas de transición y poro.

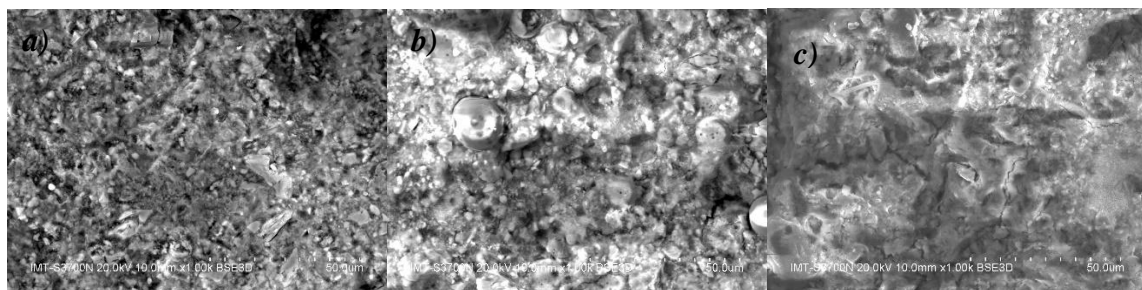


Figura 9. Micrografías MEB de mezclas de concreto endurecido; a) mezcla sin sustituto de cemento, b) mezcla con contenido de 30% de ceniza volante natural y, c) mezcla con contenido de 30% de MCV.

Evaluación de las propiedades de durabilidad

Un factor importante para considerar en esta evaluación de los morteros y concretos, es su relación alta de a/c , esto implica un concreto pobre, o una situación crítica del concreto, por lo que hace más evidente la contribución de la microceniza en las mezclas.

3.1.10 Resistividad eléctrica

La figura 10 muestra el comportamiento de la resistividad eléctrica por el método de ensayo de la norma NMX-C-514, la resistividad eléctrica real de los concretos y morteros con 30% de MCV alcanzan una resistividad eléctrica real de $10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$ al día 30 de su fabricación, lo cual coloca al material en un criterio de durabilidad de riesgo moderado a diferencia de los concretos con CVN y blancos (sin sustituto) los cuales aún se encontraban en el criterio de durabilidad de alto riesgo.

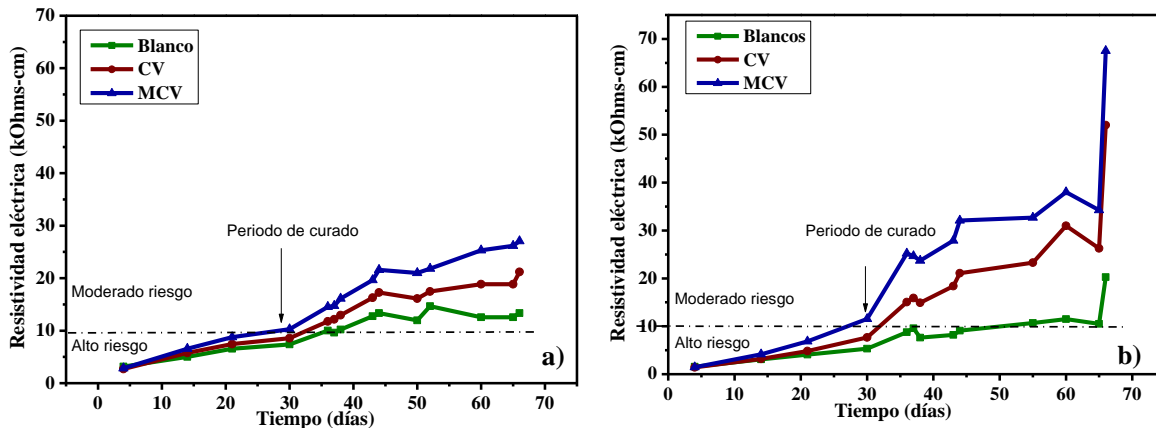


Figura 10. a) resistividad eléctrica en concretos y b) resistividad eléctrica en morteros.

Por lo observado en las gráficas anteriores, a 30 días de edad, las mezcla de concreto y mortero mejora su porosidad, pasando de porosidad interconectada excesiva a interconectada de consideración. En el caso de un acero embebido en esta mezcla de mortero y concreto y de acuerdo con el criterio de la red Durar, tiene moderado riesgo de corrosión en esta mezcla, a pesar de ser un concreto pobre.

3.1.11 Velocidad de pulso ultrasónico

La figura 11 muestra la mejora estructural del concreto y mortero endurecido en función a 30 días de edad de fabricación, como se puede observar la sustitución de cemento por un 30% de MCV favoreció una estructura altamente homogénea colocando al material en el criterio de durabilidad de “bueno”.

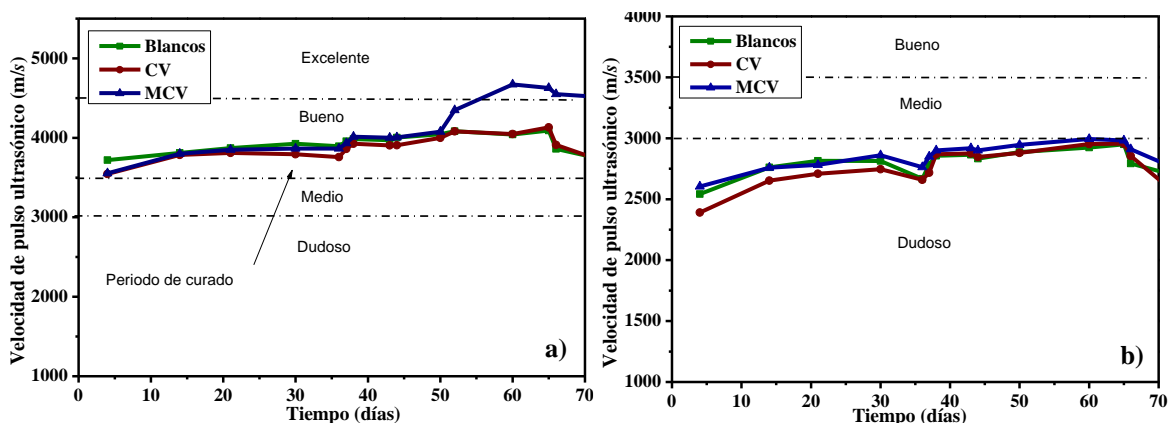


Figura 11. Velocidad de pulso ultrasónico a) concretos y b) morteros.

Por lo que, de acuerdo con los valores observados en las gráficas anteriores, en las mezclas de concreto y mortero la calidad es “buena” y “dudosa” en términos de densidad, homogeneidad y uniformidad respectivamente.

3.1.12 Permeabilidad ion cloruro

La figura 12 presenta los resultados de permeabilidad rápida al ion cloruro, obtenidos durante 6 horas de ensayo. En la gráfica se indica con líneas horizontales punteadas los niveles de permeabilidad de acuerdo con los criterios de la norma ASTM C1202, de acuerdo con estos criterios a las 6 horas, la mezcla de concreto que contiene 30% de sustitución de MCV se localiza en el criterio de permeabilidad baja con un valor penetración de iones cloruro menor que la ceniza volante natural y los concretos blancos sin sustituto.

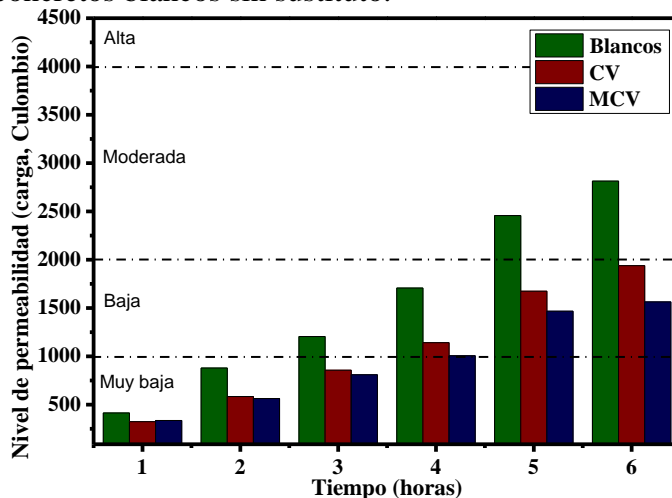


Figura 12. Resultados de permeabilidad rápida al ion cloruro de las tres mezclas de concreto.

En la figura anterior se observa la mejora de resistencia a la permeabilidad del ion cloruro en estas mezclas. En donde se resalta una mejora significativa de hasta un 45% en las mezclas con micro ceniza respecto a la muestra blanco.

4. CONCLUSIONES

- La molienda mecánica favoreció la liberación y disponibilidad de silicio en el material cementante, favoreciendo las reacciones de hidratación. Esto se atribuye al incremento de formación de gel C-S-H gracias a la elevada área superficial de las micropartículas, que lo convierten en un material más reactivo químicamente capaz de formar una mayor cantidad de enlaces con el Ca y el Sí.
- Las propiedades de resistividad eléctrica y permeabilidad al ion cloruro de las mezclas de concreto mejoraron significativamente con la adición de MCV.
- La microceniza mejora significativamente la resistividad eléctrica del concreto hasta en un 38% superior a la mezcla blanco y un 100% en el caso de morteros, disminuye la porosidad interconectada y el riesgo por corrosión de un acero embebido en estas mezclas. La calidad del concreto es “buena” y “dudosa” para los morteros.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Doctora Martha Ramos de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por su apoyo con la molienda mecánica.

A la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo (UCEMICH) por su apoyo con la caracterización de la de CVN y MCV.

6. REFERENCIAS

Troconis et al., *“Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructura de hormigón armado”*, ISBN 980-296-541-3 p. 117.

ASTM International. (2020). “ASTM C150 / C150M-20, *Standard Specification for Portland Cement*”. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-20

ASTM C33 ASTM C33/C33M-18 *Standard Specification for Concrete Aggregates*

ASTM C 778 ASTM C778-21. “*Standard Specification for Standard Sand*”.

ASTM C109. “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*”.

ACI. 211.1 American Concrete Institute (2002) “ACI. 211.1-91: *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*” (Reapproved 2009),1-38

NMX-C-514 (2016) “*Industria de la Construcción Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico Especificaciones y Métodos de Ensayo*”.

ASTM C597-16. “*Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*”.ASTM-C-1202-22. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.



Evaluación de la condición de puentes de concreto reforzado localizados en la costa caribe colombiana

W. Urango^{1*}, M. Dugarte²

*Autor de Contacto: wilmer.urangor@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los puentes son cruciales para el transporte terrestre al conectar regiones y facilitar el flujo de vehículos y personas. La inspección y estudios de patología son fundamentales para priorizar labores de mantenimiento, reparación o sustitución, garantizando la seguridad y funcionalidad de estas estructuras para las agencias de transporte. En este estudio, se evaluaron siete puentes en la costa caribe colombiana utilizando una escala del uno al cuatro, cuya metodología abarca fases desde la inspección mediante tecnología LIDAR hasta la clasificación de la condición global. Se observó que los puentes 2, 3 y 5 presentan deficiencias en algunos elementos estructurales, obteniendo una calificación de dos, indicando un estado regular. En cambio, el puente 1, calificado con tres, muestra deterioros significativos en elementos estructurales primarios. Por otro lado, los puentes 4 y 7, con una calificación de 4, presentan deterioros críticos con riesgo de derrumbe. Los resultados se limitan al levantamiento de daños en búsqueda de posibles causas y consecuencias a corto plazo, relacionadas con la exposición al entorno marino-costero que favorece patologías del concreto relacionadas con ataque por sulfatos y corrosión del acero.

Palabras clave: Patología; Estructuras; Inspección; Puentes; Concreto.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país privilegiado por su extensa costa, con 1,600 km lineales frente al mar Caribe y 1,300 km frente al océano Pacífico, lo que plantea importantes desafíos para la preservación de su infraestructura (Botero et al., 2019). Los puentes de concreto reforzado ubicados en la costa caribe están expuestos a una variedad de factores ambientales y climáticos que afectan significativamente en su condición estructural. La alta humedad, la salinidad, las temperaturas elevadas y la exposición a otros agentes agresivos contribuyen al desgaste y deterioro de estas estructuras. En la costa caribe colombiana se encuentran siete puentes de interés histórico, sin embargo, a pesar de que evaluar la condición es esencial para garantizar la seguridad y la durabilidad, las inspecciones y evaluaciones de este tipo de infraestructura en la región son poco frecuentes.

A menudo, las agencias de transporte o las entidades gubernamentales presentan limitaciones que no permiten rehabilitar o dar mantenimiento a todos ellos simultáneamente. Por lo tanto, se hace necesario priorizar cuáles de estos puentes se encuentran en condiciones más críticas. En este sentido, se requiere llevar a cabo inspecciones visuales exhaustivas de todos los puentes y establecer un orden de prioridad, desde el más crítico hasta el menos crítico, con el fin de optimizar la gestión del mantenimiento de estas estructuras marino-costeras, permitiendo implementar medidas de mantenimiento y reparación oportunas que mitiguen los efectos adversos del entorno. La evaluación de la condición de los puentes de concreto reforzado implica llevar a cabo inspecciones exhaustivas y pruebas técnicas para determinar su estado actual. Esto incluye la identificación y evaluación precisa y completa de los procesos de deterioro, daños y defectos evidentes en las estructuras de concreto reforzado (Abu Dabous & Feroz, 2020). Dichos estudios no solo exponen diagnósticos, sino que también buscan identificar causas, consecuencias y proponer diversas soluciones de intervención, reparación, mantenimiento, prevención y control de daños futuros que podrían comprometer la integridad y seguridad de los puentes.

Para estas estructuras, es esencial contar con planes de inspección periódicos que garanticen su vida útil y correcto funcionamiento, minimizando la necesidad de costosas reparaciones o reemplazos totales. Por ello, es importante emplear metodologías como la presentada en este estudio, que promuevan programas de monitoreo continuo para detectar y abordar problemas a tiempo, garantizando así la seguridad de los puentes a largo plazo. Se debe prestar especial atención a los elementos en contacto directo con el agua de mar y las zonas cercanas al nivel de mareas, especialmente los elementos de subestructura de varios de los puentes evaluados (Pugliese et al., 2022). Además, la edad de algunos puentes y ciertas particularidades de su condición actual (uso indebido, exposición al fuego, entre otras) han condicionado el deterioro progresivo en los elementos de concreto reforzado.

En este contexto, la metodología presentada en este estudio se propone como una herramienta novedosa para la evaluación de la infraestructura marino-costera en Colombia. Por lo tanto, el uso de esta metodología permitirá la priorización efectiva de actividades de mantenimiento y reparación de los puentes en las costas colombianas. Esta metodología mejorada se alinea con los procesos y conclusiones de otras metodologías (FDOT, 2019; Muñoz-Barrantes et al., 2015), sin embargo, en Colombia no se ha desarrollado una herramienta como la planteada, que facilite a las agencias de transporte y entidades gubernamentales la priorización de intervenciones mediante inspección visual. Por tanto, esta metodología se posiciona como una contribución significativa en



el campo, dado que ofrece una solución práctica y eficiente para la gestión del mantenimiento de infraestructuras costeras en el país.

A continuación, se presenta la metodología propuesta para determinar la condición global y priorizar cada uno de los puentes, así como los principales resultados obtenidos a partir del levantamiento de daños y las posibles estrategias de intervención que se pueden emplear. Dada la ubicación geográfica de los puentes en estudio, se identifican diversos factores ambientales y climáticos que pueden afectar su condición global. La constante exposición a agentes agresivos del ambiente, como cloruros, sulfatos, humedad y diferentes eventos climáticos, puede causar deterioro en el concreto y corrosión del acero de refuerzo. En definitiva, la evaluación de la condición de los puentes de concreto reforzado en medio marino es esencial para garantizar la seguridad y funcionalidad de estas estructuras. Mediante inspecciones y pruebas técnicas adecuadas, es posible identificar y abordar problemas potenciales, asegurando así la integridad de los puentes y la protección de las personas que los utilizan.

2. PROCEDIMIENTO

En la Figura 1 se presenta el método utilizado para clasificar la condición global de los puentes. Para desarrollar esta metodología, se tuvieron en cuenta las recomendaciones del manual de inspección visual de puentes y pontones del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS, 2006), la guía de evaluación de puentes del Departamento de Transporte de la Florida (FDOT, 2019) y la guía de determinación de la condición de puentes del laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales de la Universidad de Costa Rica (Muñoz et al., 2015).

En primer lugar, se recopiló información sobre las dimensiones del puente, así como la distribución, tipología y configuración de los elementos que lo componen. La información sobre las deficiencias se utilizó para clasificar la condición de cada uno de los elementos del puente en función de la gravedad y extensión de los daños observados durante la inspección visual, así como de todos los datos recopilados mediante drones y tecnología LIDAR.

Para llevar a cabo esta clasificación, se utilizaron rúbricas con diferentes parámetros, los cuales permitieron valorar cuantitativamente, en una escala del 1 al 4, la condición de cada uno de los deterioros inspeccionados. En la Tabla 1 se muestra la rúbrica utilizada para evaluar los elementos de concreto reforzado correspondientes a la superestructura y subestructura de los puentes analizados y en la Tabla 2 se presentan los parámetros que se tuvieron en cuenta para evaluar la condición de los elementos relacionados con las juntas del tablero. Estas herramientas permitieron identificar cada uno de los deterioros y el grado de gravedad de cada anomalía reportada.

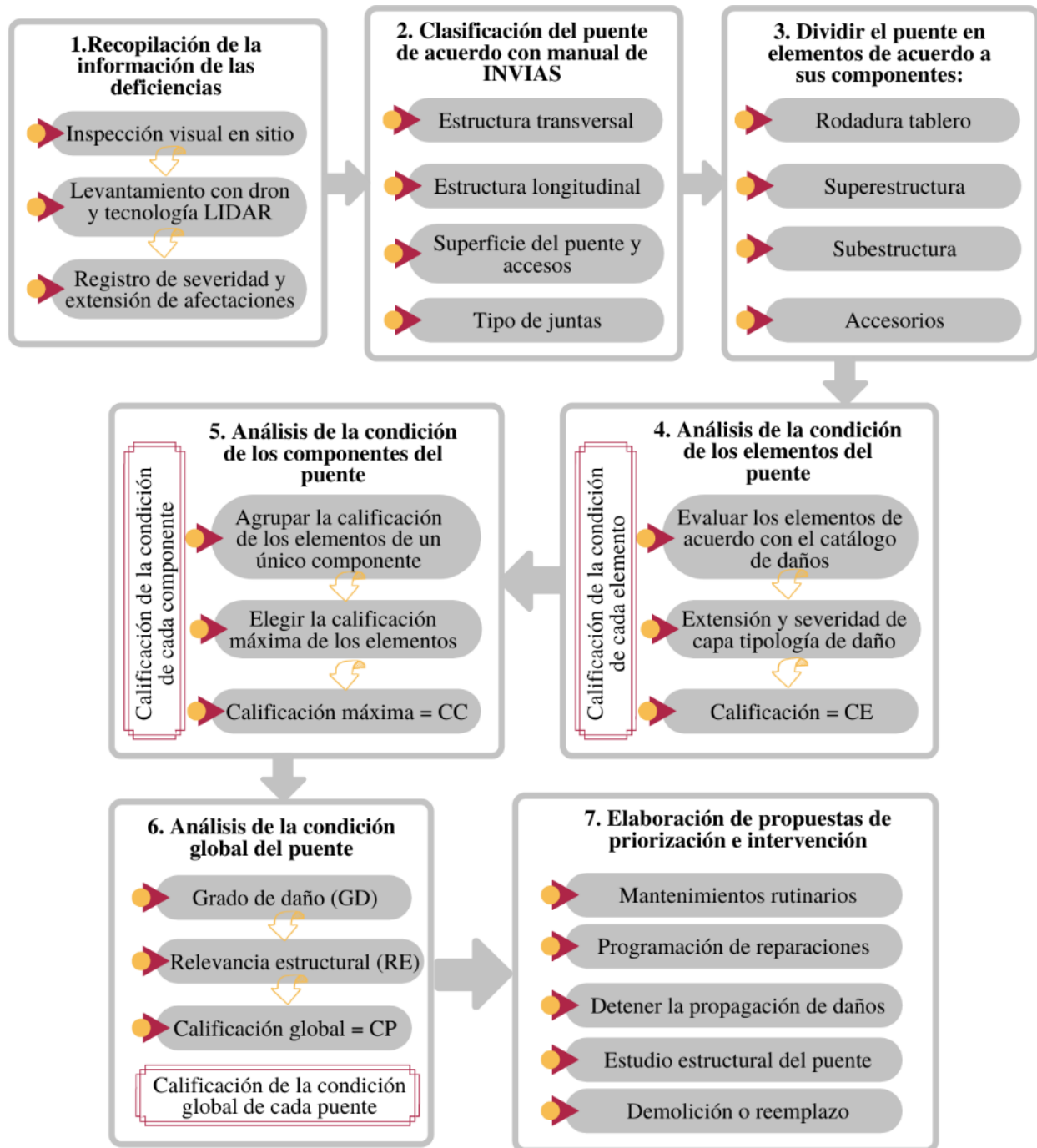


Figura 1. Flujograma de la metodología para evaluar la condición de los puentes.

Tabla 1. Rúbrica para valorar la condición de elementos de concreto reforzado.

PARÁMETROS PARA VALORACIÓN DE LA CONDICIÓN				
<i>Deterioro</i>	<i>Bueno [0-1]</i>	<i>Regular [1-2]</i>	<i>Pobre [2-3]</i>	<i>Grave [3-4]</i>
Delaminación	Ninguna	Delaminado. Desprendimiento ≤ 1 " de profundidad o ≤ 6 " de diámetro.	Desprendimiento ≥ 1 " de profundidad o ≥ 6 " de diámetro. Área parcheada que muestra dificultades. No justifica una revisión estructural.	La condición justifica una revisión estructural para determinar el efecto sobre la resistencia o la capacidad de servicio del elemento o del puente; o se ha completado una revisión estructural y los deterioros afectan a la resistencia o a la capacidad de servicio del elemento o del puente.
Barra de refuerzo expuesta	Ninguna	Presente sin pérdida de sección considerable.	Presenta una pérdida de sección notable, pero no requiere una revisión estructural.	
Eflorescencia	Ninguna	Superficie blanca sin acumulación o lixiviación sin manchas de óxido.	Acumulación pesada con manchas de óxido.	
Agrietamiento	Grietas insignificantes o de anchura moderada que han sido selladas.	Grietas de anchura moderada, sin sellar o agrietamiento.	Grietas anchas o que siguen un patrón o un mapa de grietas.	
Abrasión	No hay abrasión ni desgaste.	La abrasión o el desgaste ha expuesto el agregado grueso pero el agregado permanece seguro en el concreto.	El árido grueso está suelto o se ha salido de la matriz del concreto debido a la abrasión o al desgaste.	

Tabla 2. Rúbrica para valorar la condición de las juntas en el tablero del puente

PARÁMETROS PARA VALORACIÓN DE LA CONDICIÓN				
<i>Deterioro</i>	Bueno [0-1]	Regular [1-2]	Pobre [2-3]	Grave [3-4]
Adherencia de la junta	Adherencia total	Adherido en más del 50% de la altura de la junta.	Adherido en un 50% o menos de la altura de la junta, pero con cierta adherencia.	Pérdida total de adherencia.
Daños en el sello	Ninguno	Abrasión de la junta sin perforaciones.	Perforado, rasgado o parcialmente arrancado.	Perforado de forma competente, arrancado o desaparecido.
Grietas en la junta	Ninguna	Grietas en la superficie.	Grietas que penetran parcialmente en la junta.	Grietas que penetran completamente en la junta.
Daños en el metal	No hay daños	Óxido con pecas, el metal no tiene grietas o daños por impacto. Las conexiones pueden estar sueltas, pero funcionan como es debido.	Pérdida de sección, sujetadores faltantes o rotos, agrietamiento del metal o daños por impacto, pero la junta sigue funcionando.	Agrietamiento del metal, pérdida de sección, daños o fallos de conexión que impiden que la junta funcione como es debido.

2.1 Descripción de la clasificación

La calificación de la condición global del puente tendrá una escala de 1 a 4 como lo muestra la Tabla 3, donde 4 es grave y los deterioros comprometen la estabilidad del puente por lo tanto la estrategia de intervención implica la atención inmediata; mientras si la calificación es 1, el estado es bueno y se requiere de un mantenimiento rutinario y reparaciones programadas. A partir de la calificación de cada elemento y componente del puente, la clasificación global dependerá del grado de daño del componente y su relevancia estructural dentro del sistema. Al analizar por separado los elementos, se obtiene información detallada identificando aquellos componentes con mayores deficiencias donde habrá que proyectar rehabilitación o mantenimiento para mitigar la progresión de los daños asegurando la integridad estructural del puente.

Para la evaluación visual se incluye para cada puente un esquema de su sistema estructural como unidad funcional de análisis. Se aclara que no se consideran aspectos como la capacidad de carga, componentes hidráulicos, o estabilidad de los terrenos contiguos. Por lo tanto, los criterios de calificación aquí propuestos se basan principalmente en el análisis de los deterioros planteados en

la sección anterior, considerando extensión y grado de daño como principales parámetros de estudio.

Tabla 3. Niveles de clasificación propuestos para los puentes en estudio.

Categoría	Condición	Descripción	Necesidad de atención
1	Bueno	Estado bueno. Sin daño, daños leves o ligeros. La estabilidad estructural, seguridad y durabilidad de la estructura están asegurados o algunos deterioros ligeros deben ser tratados por durabilidad o propagación del daño.	Mantenimiento rutinario y reparaciones programadas.
2	Regular	Deficiencia importante, pero los componentes del puente funcionan aún de forma adecuada.	Es necesario programar una reparación y detener la progresión de los deterioros encontrados.
3	Pobre	Deterioro significativo en uno o varios elementos estructurales primarios, o falla en los secundarios. Si no se trata la propagación de los deterioros, estos podrían conducir a una condición grave en el futuro.	Atención oportuna: se debe atender pronto el puente para detener la propagación de los daños.
4	Grave	Deterioros críticos que comprometen la estabilidad del puente. Riesgo de colapso de la estructura. Daños severos extendidos sobre varios elementos principales del puente. Daño irreversible que posiblemente requiera la demolición del puente o sustitución de elementos dañados.	Atención inmediata: cierre del puente o restricción de flujo de vehículos pesados. Estudio estructural y propuesta de reparación/reemplazo.

2.2 Tipologías de daño del concreto en los puentes

Como parte de la metodología, se describen las principales tipologías de daño que se evaluaron para establecer la condición global de cada uno de los puentes:

- Grietas: abertura en el concreto que permiten el paso de agua/aire. El agua puede ingresar por medio de la porosidad capilar del concreto (Mazars & Grange, 2022). Sin embargo, la entrada de agua puede ser más fácil en presencia de grietas, juntas en el elemento y en las zonas de constante exposición a la humedad. De acuerdo con su ancho de abertura, es común diferenciar una grieta de una fisura cuando la abertura es mayor a 0.30 mm. Además, en el caso en que el

daño fragmenta en partes independientes la estructura o partes de esta, se estaría en presencia de lo que generalmente se conoce como fractura (IMCYC, 2011).

- Eflorescencia: es un depósito de sales, que se forma en la superficie de los elementos estructurales, y se produce cuando la sustancia en solución sale del interior del concreto o mampostería, hacia la superficie a través de la acción capilar (Zhang et al., 2020). Se caracteriza por la coloración del concreto con este depósito mineral seco.
- Delaminación: la corrosión del acero de refuerzo es la causa principal de la delaminación en tableros, pilas u otros elementos de puentes en concreto reforzado. En la medida que el acero de refuerzo se corroe, los productos de corrosión ocupan mayor espacio generando expansiones en la masa de concreto (Raja et al., 2022). Lo anterior causa una pérdida de adherencia al crear una fractura dentro del concreto. Las delaminaciones pueden ser detectadas por un sonido hueco cuando se golpea con un martillo la superficie de los elementos estructurales a evaluar.
- Corrosión del acero de refuerzo: la corrosión en el concreto reforzado a menudo ocurre como resultado de iones de cloruro por la cercanía al mar, que a través del viento o por contacto directo alcanzan diferentes elementos de la estructura. Los iones de cloruro penetran a través del concreto de recubrimiento y causan la ruptura de la capa pasiva sobre la superficie de acero causando la corrosión (Rumbayan et al., 2023). En algunos casos la corrosión puede darse por carbonatación del concreto, un proceso más lento pero que también causa la pérdida de la pasividad del acero debido a una reacción química con dióxido de carbono atmosférico (CO₂).
- Abrasión: el impacto constante del agua sobre la superficie del concreto inicia un proceso de desgaste que comienza con la erosión de la pasta de cemento. Posteriormente, este desgaste afecta al árido fino, haciendo que se desprenda, y finalmente, alcanza al árido grueso, lo que provoca la formación de cavidades y huecos en la estructura del concreto (ACI CT-20, 2013).
- Deficiencia de recubrimiento: esta es una deficiencia constructiva que puede causar corrosión en una estructura de concreto. Ocurre cuando el concreto no tiene el recubrimiento suficiente para proteger al acero de refuerzo de la estructura.

2.3 Evaluación de la condición de los puentes

Para la calificación global (CP) de cada puente en las categorías Bueno (verde), regular (amarillo), pobre (rosa) y grave (rojo), se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Condición de los elementos (CE): calificación de la condición de un elemento en particular obtenida a partir de las rúbricas de todas las deficiencias que fueron evaluadas y su grado de severidad: se selecciona la calificación mayor.
- Condición de Componente (CC): condición de cada componente del puente de acuerdo con la calificación del grado de severidad de los daños de cada uno de los elementos que lo conforman (CE). Este es el parámetro de mayor importancia en la metodología y se cuantifica de 1 a 4 empleando las rúbricas para cada uno de los elementos a evaluados y en función del elemento con mayor valor obtenido.
- Relevancia Estructural (RE): condiciona el nivel de importancia del elemento en el sistema global del puente. Se valora tanto para elementos principales como para elementos secundarios. Los valores para esta variable van del 1 al 3.
- Factor de Consecuencia de Falla (FCF): esta variable ajustada a un valor de 0 a 1 y toma en cuenta los efectos de la falla del componente dentro del sistema del puente. El uso de este parámetro se alinea con la filosofía de inspección de estructuras basado en análisis de confiabilidad (NCHRP, 2014).

Para la calificación global (CP) de cada puente, los tres parámetros indicados se combinan para calcular un CPx por componente y la sumatoria permite obtener el CP global, redondeado al valor entero más próximo. Esta aproximación constituye una simplificación de un sistema conformado por elementos independientes, donde la falla global corresponde al componente de mayor importancia. A partir del valor obtenido de CP, se puede finalmente calificar la condición de estado del puente. La calificación de condición se utiliza para recomendar los programas de intervención o acciones que permitan mantener o mejorar la condición para los elementos del puente.

2.4 Estrategias de intervención

Para decidir las estrategias de intervención se emplearon los lineamientos establecidos en la "Guía de preservación de puentes" de Florida Highway Administration (FHWA, 2018) y la "Guía para la Evaluación de Estructuras de Concreto Previa a la Rehabilitación" del American Concrete Institute (ACI Committee 364, 2019). Se pueden definir las siguientes intervenciones a emplear en los puentes con deficiencias:

- Mantenimiento: una estrategia planificada de tratamientos preventivos para un componente y sus elementos y/o accesorios que retardan el deterioro futuro y mantiene o mejoran la condición funcional del sistema.
- Rehabilitación: conjunto de trabajos necesarios para restaurar la integridad estructural de un puente, así como trabajos necesarios para corregir defectos importantes de seguridad.
- Reemplazo: reemplazo total de puente estructuralmente deficiente o funcionalmente obsoleto.

Finalmente, la metodología empleada no solo propone una calificación global del puente, sino que también identifica los elementos con mayores daños en cada uno de ellos, lo que permite establecer medidas de intervención a corto plazo para esos componentes específicos. Por lo tanto, los resultados no deben interpretarse como que un bajo valor de la calificación global (CP) indica que no se requiere intervención. El parámetro CP refleja la condición global o general del puente, pero puede haber elementos particulares que necesiten atención especial independientemente del resultado final de CP.

3. RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra la ubicación de los puentes a los cuales se les realizó un diagnóstico o evaluación de daños tomando como base la metodología descrita en el ítem anterior.

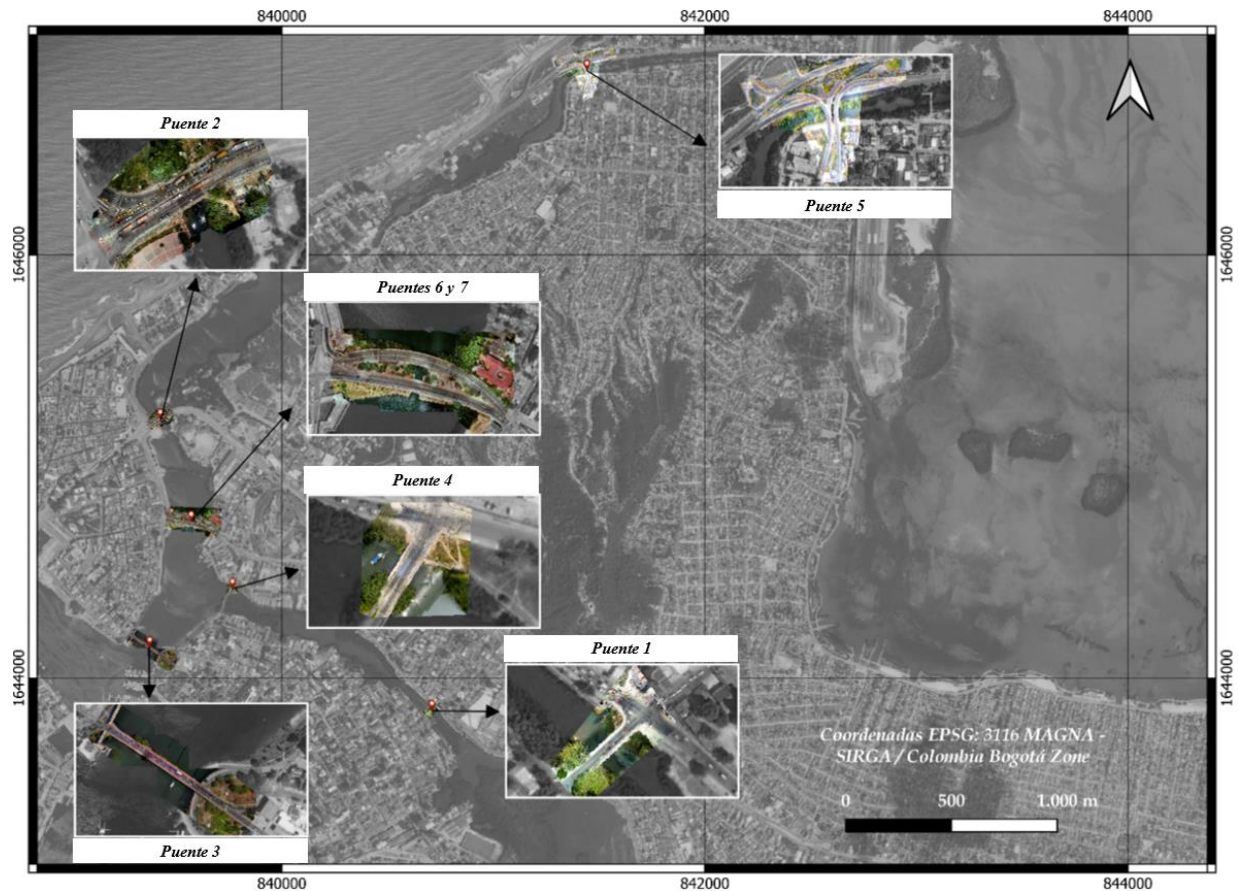


Figura 2. Ubicación de los puentes evaluados.

3.1 Caso de estudio: Puente 1

El puente 1 se construyó en 1948, su diseño inicial fue pensado para vehículos de poco tonelaje y vehículos no motorizados. Sin embargo, debido al cambio de sentido del puente 4, el puente actualmente con aproximadamente 76 años de construido se encuentra sometido a la circulación de vehículos pesados, incluyendo el crecimiento acelerado del parque automotriz y falta de mantenimiento hacen que este puente desde el 2017 se reporten signos de avanzado deterioro y fallas a nivel de subestructura.

Según el Manual para la Inspección Visual de Puentes y Pontones del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS, 2006), el puente 1 tiene una estructuración transversal de código 01 correspondiente a Losa sobre vigas como se evidencia en la Figura 3. En cuanto a la estructuración longitudinal, la Figura 4 muestra que cuenta con viguetas continuas que se apoyan sobre las pilas y muros del puente. La superficie del puente y accesos es tipo 01 (asfalto).

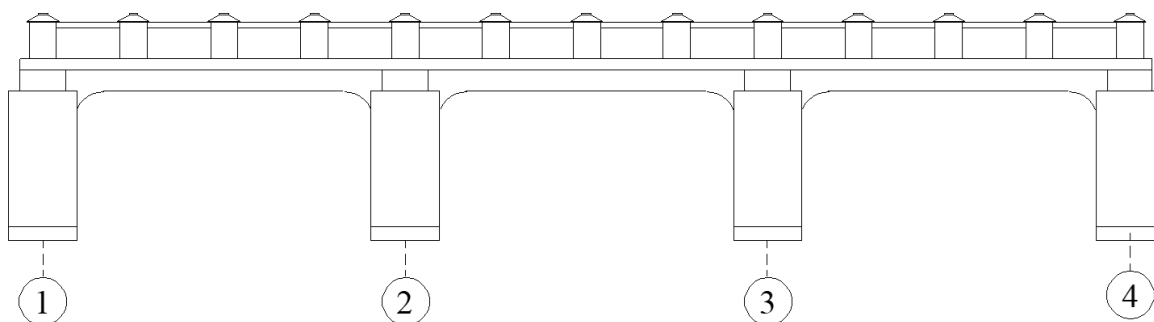


Figura 3. Estructuración transversal del puente. 01 losa sobre vigas.

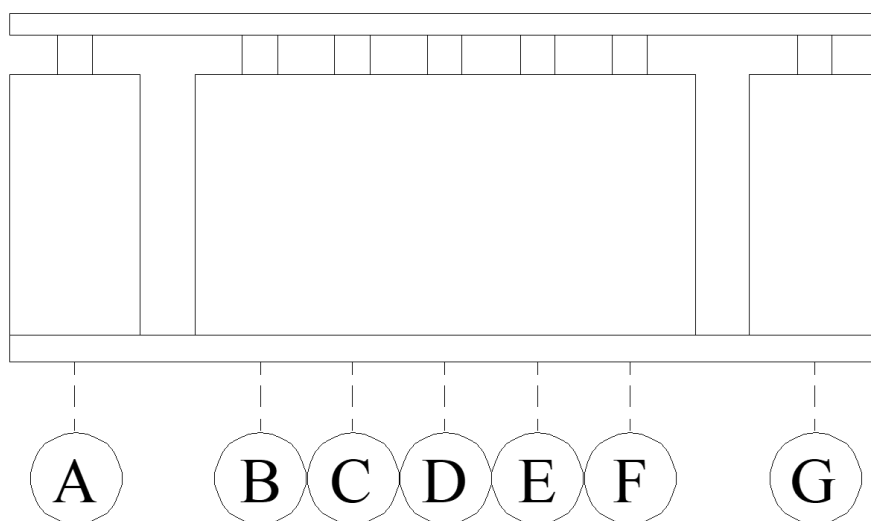


Figura 4. Estructuración longitudinal del puente. 02 vigas continuas.

En la Figura 5 se detalla el levantamiento de daños de la superestructura de este puente, el cual incluye un resumen gráfico de las diferentes tipologías de daño encontradas, haciendo énfasis en que las de las vigas deben atenderse en el corto plazo. El deterioro generalizado puede producir pérdidas de sección considerable ocasionando la progresión de los daños y afectando la integridad estructural del puente.

1. Viga eje D		2. Vigas		3. Losa y viga eje G	
Ubicación	Entre ejes 2 y 3	Ubicación	Ejes A, B y C	Ubicación	Entre ejes 3 y 4
					
Deterioros: Refuerzo expuesto, agrietamiento		Deterioros: Delaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento		Deterioros: Delaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento.	
4. Losa tablero		5. Viga eje G		6. Viga eje G	
Ubicación	Entre ejes 2 y 3	Ubicación	Entre ejes 3 y 4	Ubicación	Entre ejes 3 y 4
					
Deterioros: Delaminación y refuerzo expuesto.		Deterioros: Agrietamiento		Deterioros: Agrietamiento	
7. Vigas ejes D y E		8. Losa tablero		9. Viga eje A	
Ubicación	Entre ejes 2 y 3	Ubicación	Entre ejes A y B	Ubicación	Entre ejes 1 y 2
					
Deterioros: Agrietamiento		Deterioros: Discontinuidad en la losa		Deterioros: Agrietamiento	
10. Vigas ejes B y C		11. Vigas ejes B y C		12. Vigas ejes B y C	
Ubicación	Entre ejes 1 y 2	Ubicación	Entre ejes 1 y 2	Ubicación	Ejes E y F, entre Eje 2.2 y estribo 2
					
Deterioros: Delaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento.		Deterioros: elaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento.		Deterioros: Agrietamiento	
COMP.	CC	ELEMENTO	DEFICIENCIAS PRINCIPALES	CE	
Superestructura	4	Losa concreto	Algunas áreas con delaminación, barra de acero expuesta y corroída. Sección de losa con residuos de madera.	2	
		Vigas en concreto reforzado	Delaminación, agrietamiento generalizado, barra de acero expuesta y corroída en casi todas las vigas.	4	

Figura 5. Clasificación y reporte de inspección de la condición y deficiencias en la superestructura – vigas y losas de tablero.

En la Figura 6 se indican las áreas evaluadas netamente de la carpeta asfáltica, no presentando ningún daño y/o deficiencia considerable.



COMP.	CC	ELEMENTO	DEFICIENCIAS PRINCIPALES	CE
Tablero	1	Carpeta superior	Carpeta asfáltica no presenta daños. Sobrecarpeta indica reparación previa.	1
		Juntas de expansión	No presenta juntas. Carpeta asfáltica continua.	1

Figura 6. Clasificación y reporte de inspección de la condición y deficiencias en el tablero.

En cuanto a los accesorios, en la Figura 7 se muestran los deterioros encontrados.

Componente	Accesorios - Barrandas
Baranda concreto	
Deterioros: Pérdida de concreto	

Figura 7. Reporte de inspección de las deficiencias en los accesorios del puente.

En la Figura 8 se presentan las principales deficiencias en la subestructura, la cual se evaluó a través de los elementos que la componen: pilas y estribos del puente.

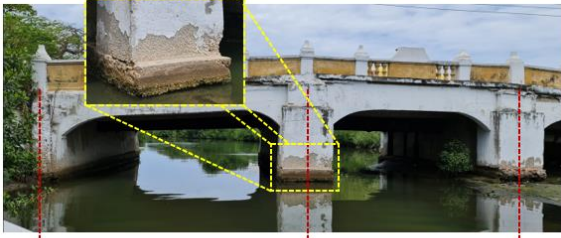



Componente		Subestructura - Pilas y estribos		
		1. Pila 3	2. Pila 3	
Ubicación	Eje G		Ubicación	Entre vigas F y G
				
		Deterioros: Eflorescencia, abrasión.		
		Deterioros: Delaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento, abrasión.		
		3. Pilas eje 2	4. Pila eje 2	
Ubicación	Entre ejes A y B		Ubicación	Entre ejes F y G
				
		Deterioros: Delaminación, refuerzo expuesto, agrietamiento, abrasión.		
		Deterioros: Corrosión eje K. Agrietamiento la base la las pilas de los ejes J, Ky L.		
COMP.	CC	ELEMENTO	DEFICIENCIAS PRINCIPALES	CE
Subestructura	3	Pilas	Delaminación, corrosión y barra de acero expuesta, y agrietamiento en algunas porciones de las pilas 2 y 3. Abrasión del concreto en la parte inferior de las pilas.	3
		Estribos	Barras expuestas corroídas y delaminación en algunas porciones de los estribos 1 y 4. Abrasión en la superficie del concreto y eb la base.	2

Figura 8. Clasificación y reporte de inspección de la condición y deficiencias en la subestructura.

Para la clasificación de cada uno de los componentes del puente y los elementos que los conforman, se hizo uso de las rúbricas de evaluación de la condición de los elementos, se estableció el grado o extensión de los daños en una escala de 1 a 4, donde 1 representaba una condición buena y 4 representaba daños y deficiencias importantes. En la Figura 9, Figura 10 y la Figura 11 se muestra pormenorizadamente este proceso para cada uno de los elementos y componentes del puente en estudio.

Fecha de inspección		Febrero-Marzo 2022								
A. Datos generales del puente										
Nombre del puente		Puente 2								
B. Elementos por evaluar										
ELEMENTOS		LOSA				VIGAS AREAS				
		TIPO				TIPO				
		Concreto reforzado				Concreto reforzado				
C. Aspectos por evaluar		D. Porcentaje de extensión por severidad que presenta la deficiencia								
		1	2	3	4	1	2	3	4	
CONCRETO	(elementos área)	Abrasión	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
		Delaminación	80%	0%	0%	20%	0%	40%	0%	60%
		Grietas	0%	75%	0%	25%	0%	50%	0%	50%
		Barra de acero expuesta	0%	85%	0%	15%	0%	40%	0%	60%
		Eflorescencias	70%	30%	0%	0%	80%	20%	0%	0%

Figura 9. Evaluación cuantitativa de la superestructura: losa y vigas aéreas.

A. Datos generales del puente										
Nombre del puente		Puente 2								
B. Elementos por evaluar										
ELEMENTOS		PILAS				ESTRIBOS				
		MATERIAL				MATERIAL				
		Concreto reforzado				Concreto reforzado				
		No	2	No	2	No	2	No	2	
C. Aspectos por evaluar		D. Porcentaje de extensión por severidad que presenta la deficiencia								
		1	2	3	4	1	2	3	4	
CONCRETO	(elementos lineales)	Delaminaciones	0%	70%	0%	30%	0%	80%	0%	20%
		Acero expuesto	0%	70%	0%	30%	100%	80%	0%	20%
		Eflorescencias	80%	20%	0%	0%	65%	35%	0%	0%
		Asentamiento	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
		Agrietamiento	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
		Abrasión o desgastse	0%	30%	0%	70%	0%	20%	0%	80%

Figura 10. Evaluación cuantitativa de los elementos de la subestructura: pilas y estribos.

UNIDADES DE MUESTREO		TABLERO			
		1			
C. Aspectos por evaluar		D. Porcentaje de extensión por severidad que presenta la deficiencia			
		1	2	3	4
ASFÁLTICA	Grietas	100%	0%	0%	0%
	Corrugación	100%	0%	0%	0%
	Piel de cocodrilo	100%	99%	0%	1%
	Ahuellamiento	100%	0%	0%	0%
	Huecos	100%	0%	0%	0%
	Sobrecarpetas	100%	0%	0%	0%

Figura 11. Evaluación cuantitativa de la carpeta de rodadura: accesos y tablero del puente.

Como resultado de la evaluación del puente, en la Figura 12 se muestra la clasificación de la condición global del Puente Jiménez.

Puente	COMPONENTES	ELEMENTOS	CE	CC	RE	FCF	CP _x	CP
JIMENEZ	TABLERO	CARPETA	1	1	1	0.17	0.17	3
		JUNTAS	1					
	SUPERESTRUCTURA	VIGAS	4	4	2	0.33	1.33	
		LOSA	2					
	SUBESTRUCTURA	PILAS	3	3	3	0.50	1.50	
		ESTRIBOS	2					

Figura 12. Resultados de la condición global del Puente Jiménez.

3.2 Resultados globales

La metodología descrita a detalle en el ítem anterior se realizó para los 6 puentes restantes. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la calificación de la condición global de los siete puentes

Puente	COMPONENTES	ELEMENTOS	C E	C C	R E	C P	RECOMENDACIONES DE INTERVENCIÓN
4	TABLERO	CARPETA	3	3	1	4	· Demolición y construcción de un nuevo puente
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	4	4	2		
		LOSA	3				
	SUBESTRUCTURA	ESTRIBOS	4	4	3		
6	TABLERO	CARPETA	2	2	1	4	· Demolición y construcción de un nuevo puente
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	4	4	2		
		LOSA	2				
	SUBESTRUCTURA	ESTRIBOS	4	4	3		
1	TABLERO	CARPETA	1	1	1	3	· Estudio de patología estructural en muros y cimentación · Diseño estructural de losa nueva sobre los muros existentes · Demolición y construcción de losa estructural nueva · Reparaciones de daños reportados · Reparaciones de barandas, juntas y carpeta de rodadura.
		JUNTAS	1				
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	4	4	2		
		LOSA	2				
	SUBESTRUCTURA	PILAS	3	3	3		
		ESTRIBOS	2				

2	TABLERO	CARPETA	2	3	1	2	· Estudio de patología estructural · Estudio de vulnerabilidad sísmica · Reparaciones de daños reportados · Reparaciones de barandas, juntas y carpeta de rodadura
		JUNTAS	3				
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	1	1	2		
		LOSA	1				
		PILAS	3				
	SUBESTRUCTURA	VIGAS CIMENTACIÓN	2	3	3		
		ESTRIBOS	1				
7	TABLERO	CARPETA	1	1	1	2	· Reparaciones de daños reportados
		JUNTAS	1				
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	2	2	2		
		LOSA	1				
	SUBESTRUCTURA	PILAS	2	3	3		
		VIGAS CIMENTACIÓN	3				
		ESTRIBOS	2				
5	TABLERO	CARPETA	1	1	1	2	· Estudio de patología estructural · Estudio de vulnerabilidad sísmica · Reparaciones de daños reportados
		JUNTAS	1				
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	2	2	2		
		LOSA	2				
	SUBESTRUCTURA	PILAS	3	3	3		
3	TABLERO	CARPETA	1	2	1	2	· Estudio de patología estructural con inspección de pilotes · Estudio de vulnerabilidad sísmica · Reparaciones de daños reportados · Reparaciones de barandas, juntas y carpeta de rodadura · Reemplazo de neoprenos
		JUNTAS	2				
	SUPERESTRUCTURA A	VIGAS	2	2	2		
		LOSA	2				
	SUBESTRUCTURA	PILAS	3	3	3		
		VIGAS CIMENTACIÓN	3				
		ESTRIBOS	1				

4. CONCLUSIONES

La evaluación de la condición global de los puentes de concreto reforzado es de vital importancia para garantizar la seguridad y la durabilidad de este tipo de estructuras. Cuando el ambiente de exposición corresponde a una región costera, el estudio continuo del estado del concreto reforzado



en los diferentes componentes estructurales juega un papel importante, puesto que es inevitable que pueda ocurrir corrosión inducida por los cloruros o sulfatos del agua del mar y demás compuestos y fenómenos climáticos.

Los puentes evaluados presentan diferentes niveles de afectación y deterioro. Los puentes 1 y 4 muestran condiciones muy deterioradas, con daños significativos en las vigas, pilas y otros elementos estructurales, lo que compromete su integridad y requiere atención inmediata. Los puentes 2 y 5 tienen deficiencias importantes en pilas y vigas, pero algunos componentes aún funcionan adecuadamente. Los puentes 3 y 7 presentan condiciones regulares, pero con deterioros en pórticos, vigas de cimentación y pilas. El puente 6 está en estado grave, con deterioros críticos en estribos y vigas. Se recomienda realizar estudios estructurales y tomar medidas de reparación, reforzamiento o reemplazo de este puente, según sea necesario para garantizar su seguridad y funcionamiento adecuado.

A pesar de los desafíos de la evaluación de puentes en sitio, la metodología presentada en este estudio se confirma como una herramienta innovadora y eficaz para la evaluación de la infraestructura marino-costera en Colombia. El enfoque de inspección/evaluación presentada demostró que es posible establecer un panorama sobre la necesidad de intervención de las estructuras que permitan priorización de las actividades a realizar de manera razonable, ofreciendo un avance significativo en la gestión del mantenimiento y la toma de decisiones informadas por parte de las agencias de transporte y las entidades gubernamentales del país.

En definitiva, la evaluación de la condición de los puentes de concreto reforzado en la costa caribe colombiana revela los problemas existentes relacionados a la patología de la construcción y proporciona información crucial para implementar estrategias de mantenimiento y reparación efectivas. La protección y conservación adecuada de estas infraestructuras son fundamentales para garantizar la seguridad vial y el desarrollo sostenible de la región.

5. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al Departamento de Tecnología del Concreto de la FIC-UANL, en particular al Dr. Alejandro Durán Herrera, por su valioso apoyo en la presentación de los resultados en este congreso. Asimismo, a la Sociedad Colombiana de Ingenieros y a INGENIA Structural Co. por su colaboración y provisión de los datos necesarios para este estudio. Sin las contribuciones de estas organizaciones, este proyecto no habría sido posible.

6. REFERENCIAS

Abu Dabous, S., & Feroz, S. (2020). Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies. *Automation in Construction*, *116*, 103224. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103224>

ACI Committee 364. (2019). *Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation* (Vol. 94, Issue Reapproved, pp. 1–22).

ACI CT-20. (2013). ACI Concrete Terminology. In *American Concrete Institute (ACI)* (p. 54). www.concrete.org

Botero, C. M., Hurtado, R., & Rodríguez, S. L. (2019). Reporte del Avance del Manejo Costero Integrado en Colombia 2009-2019. In *Revista COSTAS* (Vol. 2011). <https://doi.org/10.26359/costas.e103>



- FDOT. (2019). *Bridge Inspection Field Guide*.
- FHWA. (2018). *Bridge Preservation Guide Maintaining a Resilient Infrastructure to Preserve Mobility Quality*. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/preservation/guide/guide.pdf>
- IMCYC. (2011). *Daños en el concreto: apuntes de cómo evaluarlos*. Construcción y Tecnología En Concreto. <https://imcyc.com/revistacyt/marzo2012/artingenieria.html>
- INVIAS. (2006). *Manual para la inspección visual de puentes y pontones*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/976-manual-para-la-inspeccion-visual-de-puentes-y-pontones/file>
- Mazars, J., & Grange, S. (2022). *Damage and Cracking of Concrete Structures: From Theory to Practice*. ISTE ltd. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=dwihEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Cracks:+openings+in+concrete+that+allow+the+passage+of+water/air.&ots=ZdwOI1TzXq&sig=px9844t960aDz2eSNZIxQEmXyW0#v=onepage&q&f=false>
- Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., & Loria-Salazar, L. G. (2015). *Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual*.
- Muñoz, J., Agüero, P., Vargas, S., Villalobos, E., Vargas, L., Barrantes, R., & Loria, G. (2015). Guide to determine the condition of bridges in Costa Rica by Visual Inspection. *LanammeUCR*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/931>
- NCHRP. (2014). *National Cooperative Highway Research Program - 2014 Summary Progress*.
- Pugliese, F., De Risi, R., & Sarno, L. Di. (2022). Reliability assessment of existing RC bridges with spatially-variable pitting corrosion subjected to increasing traffic demand. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108137. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2021.108137>
- Raja, B. N. K., Miramini, S., Duffield, C., Sofi, M., & Zhang, L. (2022). Infrared thermography detection of delamination in bottom of concrete bridge decks. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(3), e2886. <https://doi.org/10.1002/STC.2886>
- Rumbayan, R., Sudarno, S., & Maluw, F. (2023). Practical inspection for subsurface damage in concrete bridge using infrared thermography. *AIP Conference Proceedings*, 2431(1), 070015. <https://doi.org/10.1063/5.0117319>
- Zhang, S., Ghoulah, Z., & Shao, Y. (2020). Effect of Carbonation Curing on Efflorescence Formation in Concrete Paver Blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020127. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003210)



Análisis del efecto de la adición de fibra de henequén sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado

T. Torrez-Pérez^{2*}, T. Pérez-López¹, T. Torrez-Pérez²,
P. F. J. Cano-Barrita³, A. Bacelis-Jiménez¹.

*Autor de Contacto: al056051@uacam.mx

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

² Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

³ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca, México.

RESUMEN

Se analizó la termodinámica de la interfase concreto-acero en relación con la porosidad de muestras de concreto reforzado adicionadas con fibras de henequén a diferentes concentraciones. Fueron utilizadas las técnicas electroquímicas potencial de corrosión y resistividad eléctrica por el método de Wenner, con el objetivo de analizar el efecto de la adición de fibra de henequén sobre las propiedades de durabilidad. Se elaboraron 4 series de muestras cilíndricas y prismáticas con una relación agua/cemento de 0.57. Además, se realizaron pruebas de porosidad del material, empleando la técnica de Resonancia Magnética Nuclear realizadas en el CIIDIR, Unidad Oaxaca. Posteriormente, las muestras se sometieron a carbonatación acelerada. En los resultados obtenidos mediante las técnicas electroquímicas, puede apreciarse un aumento progresivo de la resistividad del sistema durante el proceso de curado en muestras adicionadas con fibras de henequén, presentando valores de resistividad mayores y potenciales de corrosión más positivos. Los resultados obtenidos referentes a la porosidad (RMN) sugieren que las fibras de henequén sí reducen la porosidad con el aumento en su concentración. Se concluye que las fibras de henequén contribuyen a retardar la corrosión del acero de refuerzo, puesto que generan condiciones termodinámicas adecuadas y retardan la carbonatación al reducir la porosidad.

Palabras clave: Carbonatación; Porosidad; Fibras; Curado; Durabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es un material fundamental en la construcción moderna, conocido por su durabilidad y resistencia. Sin embargo, a pesar de estas cualidades, enfrenta desafíos significativos que pueden comprometer su integridad a largo plazo. Dos de los principales problemas que afectan al concreto reforzado son la carbonatación y la corrosión.

La carbonatación es un fenómeno generado por la interacción del concreto con el medio ambiente. Ocurre cuando hay una reacción del dióxido de carbono (CO_2) del aire con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), producto de la hidratación del cemento, y que propicia una alta alcalinidad en la solución intersticial del concreto, formando el carbonato cálcico (CaCO_3) (Costa, et al., 2022). Esencialmente, la pasta de concreto confiere al acero embebido, una protección de doble naturaleza primero proporciona una barrera física que lo aísla del medio ambiente, y también una protección química, debido a la alta alcalinidad que presenta el concreto, esto permite que el acero de refuerzo forme una capa de óxido protector (capa pasiva), evitando que el acero de refuerzo continúe corroyéndose (González y Jimmy, 2003). Sin embargo, con la formación de CaCO_3 ocurre una reducción de ese pH a valores como 9,4, que a la temperatura ambiente propicia la precipitación de CaCO_3 . Entonces, esa acidificación de la matriz cementicia causa la despasivación de la armadura, dejándola susceptible a procesos corrosivos, siendo la corrosión, la principal manifestación patológica en las estructuras de concreto reforzado (Peter et al., 2008; Chen, 2019; Costa et al., 2022).

La carbonatación y la corrosión no solo comprometen la durabilidad y la seguridad de las estructuras de concreto reforzado, sino que también pueden resultar en costosos procesos de reparación y mantenimiento. Por lo tanto, entender los mecanismos detrás de estos fenómenos y adoptar estrategias efectivas de prevención y mitigación son esenciales para garantizar la vida útil y la funcionalidad de las construcciones de concreto reforzado.

Para abordar esta problemática, se ha implementado la incorporación de nuevos materiales en la pasta de concreto, como los provenientes de fuentes renovables y de origen natural (Flores et al., 2021). La utilización de estos materiales en la elaboración de materiales compuestos, como el concreto reforzado, no solo permite reducir desechos y residuos, sino que también contribuye a preservar los recursos no renovables. Un ejemplo notable son las fibras naturales, que han demostrado mejorar significativamente las propiedades mecánicas, como la resistencia a la flexión del concreto (Jaimes Cusihaman, 2021; Balam Cocom et al., 2006; Llontop Esquerre y Ruíz Chávez, 2019).

Entre la amplia variedad de fibras naturales disponibles, se destacan las fibras de henequén, endémicas en la península de Yucatán y de fácil acceso. Por consiguiente, este estudio se centrará en analizar el efecto de la adición de fibra de henequén sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado.



2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño y fabricación de la mezcla

MUESTRAS		PRUEBAS MECÁNICAS		PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	PRUEBAS REFERENTES A LA POROSIDAD
		Resistencia de compresión ($f'c$) y Resistencia a la flexión		E_{corr} y Resistividad	Método de prueba estándar para determinar los vacíos en concreto endurecido (ASTM-C-642-21) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN)
Testigo	0%	12	2	3	2
FH%	0.5%	12	2	3	2
	1%	12	2	3	2
	2%	12	2	3	2
		48	8	12	10
92 ESPECÍMENES					

Figura 2.1. Dosificación de las muestras y pruebas realizadas a las muestras.

En esta investigación se elaboraron 92 muestras con diferentes características, para analizar el efecto de adicionar fibras de henequén en el diseño de mezcla (Figura 2.1). Se evaluaron tres concentraciones distintas de fibras de henequén con respecto al peso de cemento, en comparación con la muestra testigo. Para el diseño de mezcla, se eligió el diseño establecido en la ACI (American Concrete Institute) 211.1. Se empleó una alta relación agua/cemento (0.57), para obtener productos de alta porosidad, siendo ésta un factor de control importante que influye en la difusión de los iones y el dióxido de carbono (CO_2), logrando una carbonatación más rápida en menor tiempo.

Los materiales utilizados para la elaboración de las muestras se enlistan a continuación:

- ✓ Fibras de henequén (cortadas a una longitud de 2 cm y lavadas con agua purificada).
- ✓ Cemento Portland Compuesto (CPC 30R) marca comercial Maya, el cual cumple con los estándares de las normas NMX-C-414-ONNCCE-2014 y ASTM-C-150-2007.
- ✓ Grava (tipo calcárea) producto de trituración de roca caliza particular de la Península de Yucatán como agregado grueso.
- ✓ Piedra triturada como agregado fino, característica de la región.
- ✓ Agua purificada comercial para la elaboración de los especímenes de concreto (norma NMX-C-122-ONNCCE).

2.2 Curado de las muestras (NMX-C-159-ONNCCE-2016)

Una vez elaboradas las muestras, después de 6 horas se procedió a desmoldar, y se sometieron a curado por inmersión en una solución saturada de $Ca(OH)_2$ durante 90 días (Figura 2.2). Durante este tiempo, se realizaron diferentes pruebas a los 7, 14, 28 y 90 días de curado.

2.3 Pruebas mecánicas

2.3.1 Resistencia a la compresión simple ($f'c$) (NMX-C-414-ONNCCE-2017)



El equipo utilizado para llevar a cabo esta prueba fue una prensa con dispositivos de lectura de carga, calibrado por el Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.

Inicialmente, las muestras de concreto se pesaron en una balanza granataria y se registraron sus dimensiones. Luego, cada muestra se colocó en el dispositivo y se accionó la prensa a una velocidad en un rango de 84 kg/cm²/min a 210 kg/cm²/min, aplicando carga hasta que el medidor de lectura comenzó a indicar un descenso en la carga. Esta prueba permitió determinar la resistencia a la compresión de las muestras de concreto.

2.3.2 Resistencia a la flexión

Para este proyecto, se fabricaron un total de 8 vigas de sección cuadrada para llevar a cabo la prueba de resistencia a la flexión del concreto, de acuerdo con lo establecido en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

2.4 Pruebas electroquímicas

2.4.1 Potencial de Corrosión (*E_{corr}*)

El potencial de corrosión, también conocido como potencial de electrodo de referencia (*E_{corr}*), es una medida electroquímica que indica la tendencia de un metal a corroerse en un medio específico. Se utiliza para evaluar la probabilidad de corrosión de un material metálico expuesto a un entorno corrosivo. Un *E_{corr}* más negativo indica una mayor tendencia a la corrosión, mientras que un *E_{corr}* más positivo indica una menor tendencia a la corrosión. El potencial de corrosión se mide típicamente en relación con un electrodo de referencia estándar, como el electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄ Sat), que se utiliza para establecer una referencia estable durante las mediciones. Este procedimiento se llevó a cabo midiendo el *E_{corr}* durante el tiempo de curado, determinándolo de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2023 y su estándar ASTM C876, utilizando un electrodo saturado de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄ Sat) como electrodo de referencia.

2.4.2 Resistividad

La resistividad es una medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica. Se expresa en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$) y depende de la composición química y estructura del material, así como de la temperatura. Los materiales con alta resistividad tienen una baja conductividad eléctrica y viceversa. La resistividad se utiliza en una variedad de aplicaciones, como en la industria eléctrica para determinar la eficiencia de los materiales conductores y en la industria de la construcción para evaluar la calidad del suelo o del concreto.

Como indica la Ley de Ohm (1) la resistividad es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Las pruebas se llevaron a cabo utilizando un equipo Nilsson modelo 400, diseñado específicamente para medir la resistividad en suelos. Este equipo tiene un rango de medición de hasta 1.1 M Ω . Las mediciones se realizaron utilizando el Método de Wenner o de 4 puntas, siguiendo las especificaciones establecidas en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2017 y su estándar ASTM G-

57. Se tomaron las mediciones en las muestras elaboradas sin acero de refuerzo, durante el proceso de curado.

2.4.3 Resonancia Magnética Nuclear

La RMN es una técnica no destructiva que proporciona información del sistema poroso de los materiales. Mediante esta técnica es posible obtener tiempos de relajación tras la magnetización de las muestras, tiempo de relajación longitudinal o espín-red (T_1) y tiempo de relajación transversal o espín-espín (T_2), que pueden relacionarse con la abundancia y el tamaño de los poros del material. Altos valores de tiempos de relajación T_1 y T_2 obtenidos por RMN están relacionados con la presencia de grandes poros, mientras que un decrecimiento de estos tiempos significa la disminución del tamaño de los poros o la generación de poros más pequeños (Díaz Díaz, 2021).

En la presente investigación, las muestras fueron cortadas con dimensiones de $3.5 \times 3.5 \times 5 \text{ cm}^3$ (Figura 2.7), haciendo uso de una cortadora de disco, las cuales posteriormente fueron saturadas al vacío con agua desionizada durante ciclos de 30 minutos y 15 minutos de descanso, tiempo en el cual se pesaron las muestras hasta alcanzar peso constante. Una vez alcanzado los pesos constantes de las muestras, se procedió a sellar las muestras con cinta teflón, esto para evitar que el agua contenida en las muestras se evaporara y así obtener una microestructura real de las muestras, ya que cuando un material poroso humedecido con agua está completamente saturado, el valor T_2 de un poro es proporcional a la relación de superficie a volumen de poro, lo cual es una medida del tamaño del poro. Durante las mediciones de RMN las muestras se mantuvieron selladas con cinta teflón.

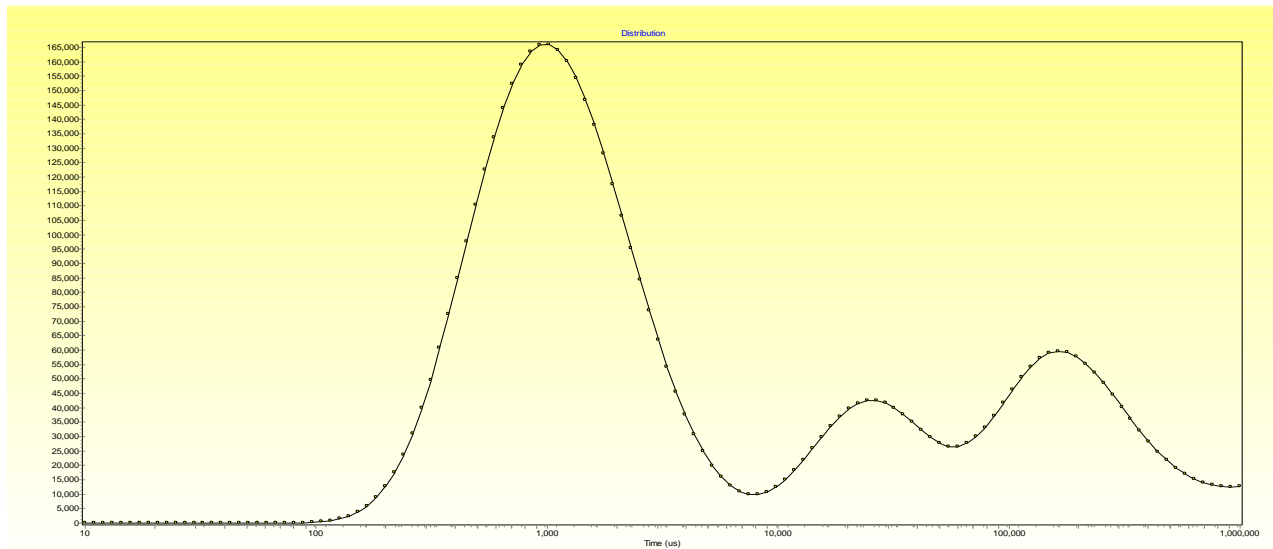
Cabe mencionar que la relajación de superficie es predominante en el régimen de difusión rápida donde el tiempo inter-eco utilizado es corto. Bajo esta condición, T_2 es directamente proporcional al tamaño de poro. Por lo tanto, asumiendo que todos los poros tienen la misma forma, para poblaciones de poros grandes el decaimiento de la señal será lento (la relación S/V es baja) en cambio para poblaciones de poros pequeños el decaimiento de la señal será más rápido (la relación S/V es alta).

Se determinaron los tiempos de relajación T_2 de RMN por medio del programa WinDXP para los cuatro tipos de muestras. Se utilizó la técnica CPMG (Meiboom y Gill, 1958) de RMN para obtener los decaimientos de la magnetización transversal a partir de las cuales se obtuvieron los tiempos de relajación T_2 , los cuales nos brindan información sobre la distribución de tamaños de poros presentes en la muestra y la intensidad de la señal de RMN (asociada a la cantidad de agua existente en las distintas poblaciones de poro en la muestra de concreto). Se utilizó esta técnica para conocer las poblaciones de poros existentes en las muestras, utilizando los siguientes parámetros para la técnica CPMG.

Para determinar la distribución de T_2 que produce una señal de decaimiento de la magnetización transversal es necesario realizar un ajuste o mapeo. Este proceso es una inversión matemática basada en la transformada inversa de Laplace, con lo cual, es posible obtener la distribución de tamaños de poro de un sistema poroso. El decaimiento de la magnetización transversal fue procesado por medio de la transformada inversa de Laplace, haciendo uso del programa Win DXP, lo cual permitió resolver tres componentes de T_2 (2) (Figura 2.2).

Tabla 2.1. Parámetros utilizados en la técnica CPMG para caracterizar las muestras previamente saturadas.

Parámetros	Valor
Número de ecos	2045
Número de escaneos	512
Tiempo entre ecos (µs)	150
Tiempo de repetición (s)	2
Tiempo de adquisición (min)	30

Figura 2.2. Distribución de T_2 .

$$M(t) = M_{0,1} e^{-t/T_{2,1}} + M_{0,2} e^{-t/T_{2,2}} + M_{0,3} e^{-t/T_{2,3}} \quad (2)$$

Donde $M(t)$ es la magnitud de la magnetización transversal en el tiempo t y M_0 es la magnetización al tiempo 0.

En el gráfico de T_2 se pueden obtener los valores promedios para las tres componentes, siendo que la componente larga se relaciona con los poros capilares y la corta con los poros gel (Figura 2.2).

2.5 Degradación de muestras de concreto reforzado por carbonatación acelerada

Se realizaron ensayos en una cámara de carbonatación acelerada, ubicada en el Centro de Investigación en Corrosión, en el laboratorio de concreto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pruebas mecánicas

3.1.1 Resistencia a la compresión (f'_c)

El Gráfico 2.1 muestra que, tras 90 días de curado, las probetas adicionadas con un 0.5% de fibras de henequén (FH 0.5%) exhibieron una resistencia a la compresión de 148.86 kg/cm². Sin embargo, las probetas de control mostraron la resistencia más alta, alcanzando los 164.36 kg/cm². Por lo tanto, se concluye que la adición de fibras de henequén no resultó en un incremento de las propiedades mecánicas de las muestras, lo cual no constituía el objetivo principal del estudio. En cambio, el enfoque se centró en modificar la forma de fallo y evaluar las posibilidades de corrosión del refuerzo. A pesar de esto, se observa que las fibras de henequén contribuyen a evitar el colapso del material en comparación con el material sin refuerzo, que presenta una falla frágil al alcanzar la carga de ruptura.

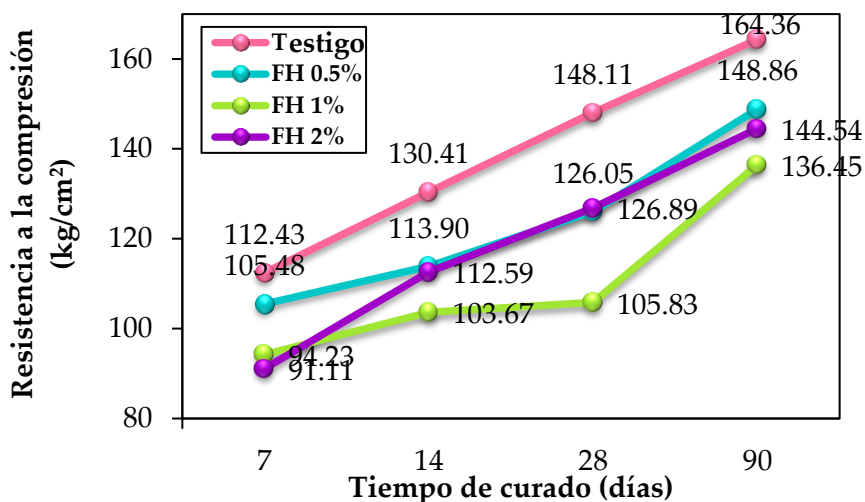


Gráfico 2.1. Resistencia a la compresión de muestras sometidas a curado por inmersión en una solución saturada de hidróxido de calcio durante 90 días.

La degradación química experimentada por las fibras naturales, como se ha señalado anteriormente, tiene un impacto negativo en la resistencia a la compresión del concreto reforzado. Este fenómeno ha sido observado en diversas investigaciones sobre concreto reforzado con fibras naturales. Por ejemplo, los resultados obtenidos por Martin Sandra en 2020 indican que, al incorporar fibras de cañamo al concreto, los valores de resistencia inicial aumentan. Sin embargo, no se observa un incremento significativo en la resistencia a la compresión a los 28 días en el concreto reforzado con fibra de cañamo en comparación con el concreto no reforzado.

Los hallazgos de Paricaguán Morales y Muñoz Cuevas en 2019 respaldan esta observación. Después de 128 días de curado, encontraron que la resistencia a la compresión de las muestras adicionadas con fibras de bagazo de caña era menor en comparación con las muestras control, con valores de 40.18 y 43.35 MPa respectivamente. Además, señalan que la resistencia a la compresión se ve comprometida en edades tempranas. Un punto importante para destacar es que a medida que aumenta el volumen de fibra en el concreto, la resistencia a la compresión reportada tiende a disminuir.

3.1.2 Resistencia a la flexión

El Gráfico 2.2 presenta los resultados de resistencia a la flexión o módulo de ruptura obtenidos después de 90 días de curado. Según los datos recopilados, se observa que la muestra control exhibe una menor resistencia a la flexión, alcanzando un valor de 31.5 kg/cm^2 . En contraste, las muestras adicionadas con fibra de henequén muestran valores más altos de resistencia a la flexión. La muestra con la mayor resistencia a la flexión registrada es aquella adicionada con un 0.5% de fibras de henequén, con un valor de 40.4 kg/cm^2 . Por lo tanto, se confirma que el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas del concreto mediante la adición de fibras de henequén es válido (Fuentes Nuñonca en 2022 y Martin Sandra, 2020).

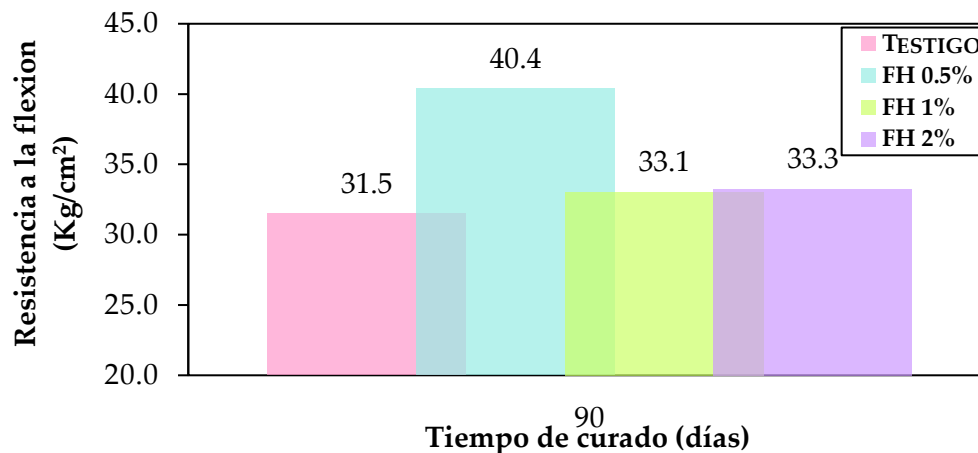


Gráfico 2.2. Resistencia a la flexión de muestras sometidas a curado por inmersión en una solución saturada de hidróxido de calcio durante 90 días.

3.2 Pruebas electroquímicas

3.2.1 Potencial de corrosión (E_{corr}) durante el proceso de curado

El Gráfico 2.3 muestra los resultados promedio de los potenciales de media celda para las muestras testigo y las muestras con adición de fibra de henequén, medidos durante el proceso de curado. Estas mediciones se llevaron a cabo con el fin de obtener un valor relativo de la probabilidad de corrosión que podría haberse presentado en el acero de refuerzo durante el curado.

A los 7 días de curado, las muestras mostraron valores de potencial de corrosión más negativos que -350 mV , los cuales se desplazaron hacia valores aún más negativos al aumentar el tiempo de curado (14 y 28 días), lo que representa una probabilidad de corrosión del 90% según lo establecido en las normas ASTM C876 y NMX-C-501-ONNCCE-2015. Sin embargo, a los 90 días de curado, las muestras exhibieron valores de potencial de corrosión más positivos que -200 mV , lo que representa una probabilidad de corrosión del 10% según las mismas normas (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Potencial de corrosión según norma ASTM C876 (Rodríguez et al., 2015).

Voltaje medido vs Electrodo de cobre / sulfato de cobre (mV)	Probabilidad de corrosión
$> -200 \text{ mV}$	10% o menos ■
-200 mV a -350 V	Región de incertidumbre ■



Los valores más positivos los presentaron las muestras con adición de fibras de henequén con una concentración de 0.5%, lo que coincide con los valores obtenidos de resistividad. Los potenciales negativos pueden atribuirse a la actividad de la intercara concreto-varilla de refuerzo, mientras que, los potenciales menos negativos se atribuyen a la pasivación del acero de refuerzo.

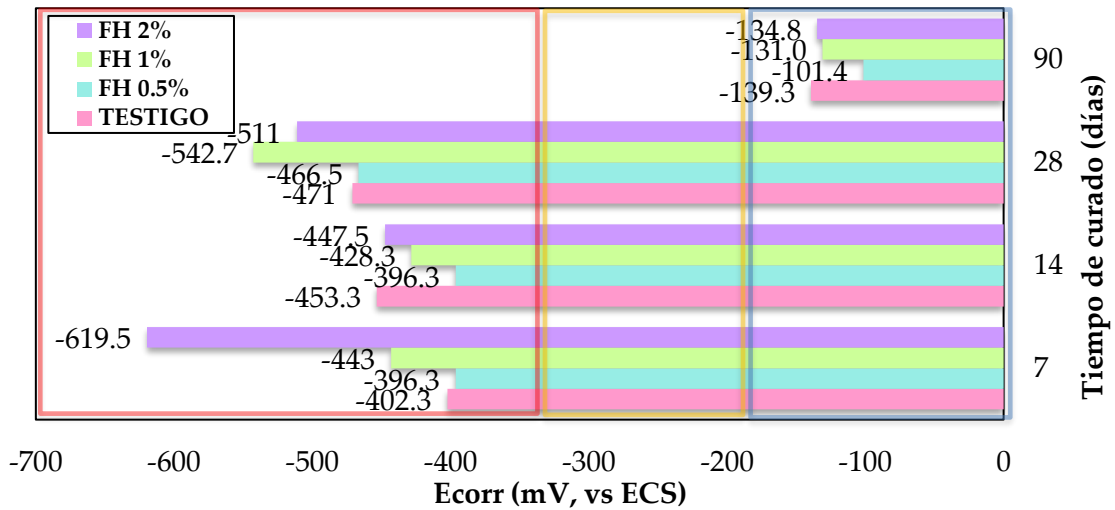


Gráfico 2.3. Potenciales de corrosión obtenidos durante el proceso de curado.

3.2.2 Potencial de corrosión (E_{corr}) durante el proceso de carbonatación

A continuación, se presentan los potenciales de corrosión registrados antes de la carbonatación, a los 15 y 30 días de carbonatación (Gráfico 2.4). Con respecto a los ensayos electroquímicos, se observa que los potenciales de media celda muestran un incremento hacia valores más negativos a medida que transcurre más tiempo de carbonatación. Este fenómeno se asocia a una mayor probabilidad de que ocurra la corrosión en la varilla metálica (según ASTM C-876), como consecuencia de la pérdida de pasividad del acero.

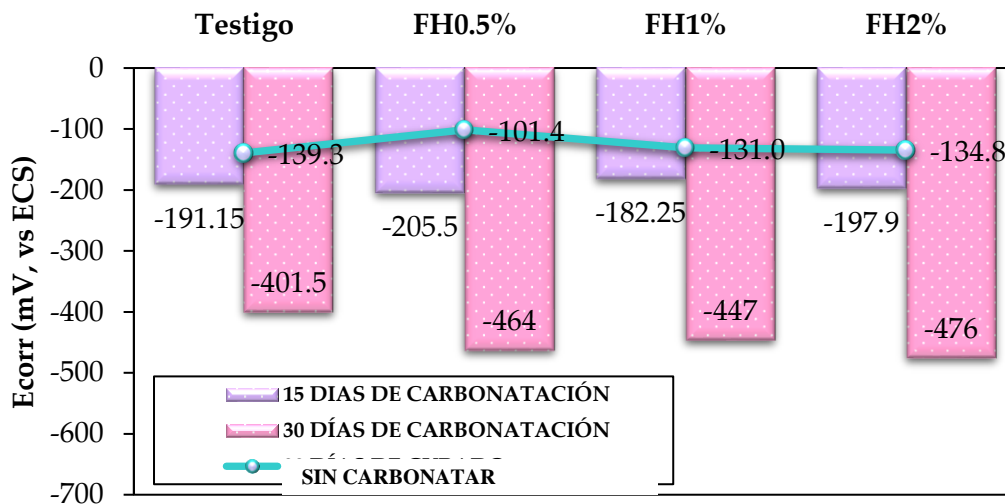


Gráfico 2.4 Potenciales de corrosión después de 15 y 30 días (8 horas por día) de carbonatación.

3.2.3 Resistividad durante el proceso de curado

Los datos presentados en la Gráfico 2.5 sugieren un aumento en la resistividad con respecto a la edad de curado, lo que indica que el proceso de hidratación está ocurriendo. Este fenómeno conduce al fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Este hallazgo coincide con investigaciones previas realizadas por Andrade et al. (2021) y Acero Sánchez et al. (2015), donde se evidencia que las condiciones de curado ejercen una influencia directa en el desarrollo de la resistividad eléctrica.

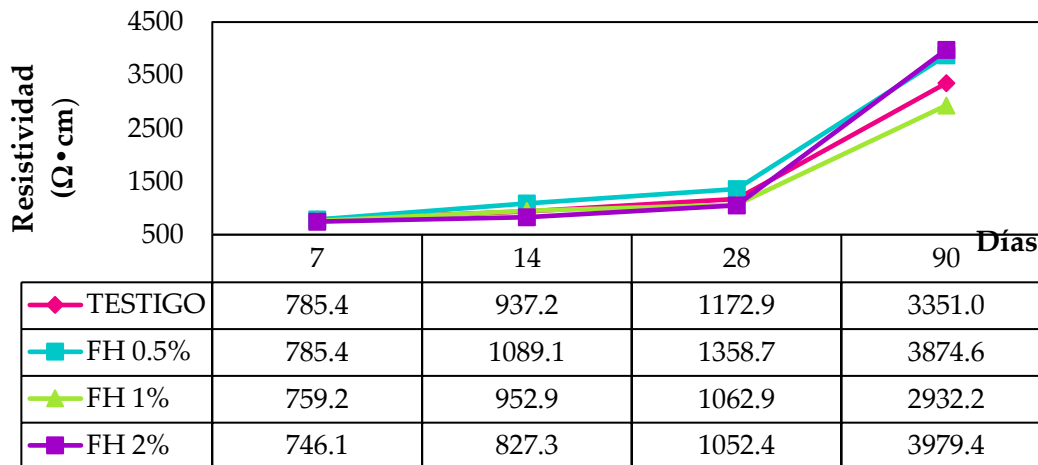


Gráfico 2.5. Resistividad durante el proceso de curado.

3.2.4 Resistividad durante el proceso de carbonatación

Es importante destacar que las muestras con adición de 0.5 % y 1 % de fibra de henequén mostraron resultados más favorables, alcanzando una resistividad aproximada de 4000 $\Omega \cdot \text{cm}$ a los 90 días de curado. Además, Andrade et al., 2021 reporta que la evolución de la resistividad es paralela a la de la resistencia de compresión, debido a esto, la resistividad permite predecir la resistencia de compresión, lo que coincide con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que durante el proceso de curado la resistividad y la resistencia de compresión aumentaron con el tiempo de curado (Gráfico 2.5).

La resistividad del concreto está influenciada por la distribución de poros, su contenido de humedad y la presencia de especies iónicas (Duffó et al., 2019). La conductividad eléctrica en el concreto depende principalmente del transporte iónico a través de los poros. Sin embargo, la resistencia eléctrica está afectada principalmente por la saturación de agua de los poros (equivalente a la porosidad abierta), así como por factores como el tamaño máximo de agregado, la relación agua-cemento y el grado de hidratación.

En esta investigación, se observa que la resistividad de las muestras testigo y aquellas adicionadas con fibras de henequén (FH %) tiende a aumentar con el tiempo de carbonatación, como se aprecia en el Gráfico 2.6. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de otros autores como González Díaz (2010) y Manrique Marqués (2011), quienes también observaron una evolución de la resistividad del concreto en función del tiempo de carbonatación. Este aumento de la resistividad se atribuye a la carbonatación del concreto, donde el proceso conduce a la precipitación de carbonato de calcio a partir de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, así como la formación de sílice, alúmina y óxido férrico.

La solución contenida en los poros de un concreto completamente carbonatado parece ser una solución diluida en bicarbonatos que debería tener una mayor resistividad que la solución alcalina de los poros. Sin embargo, el aumento de la resistividad permitido por el proceso de carbonatación puede ser atribuido a la precipitación de CaCO_3 y sílice, alúmina, etc., lo que reduce la porosidad y la concentración de diferentes iones en el agua de los poros.

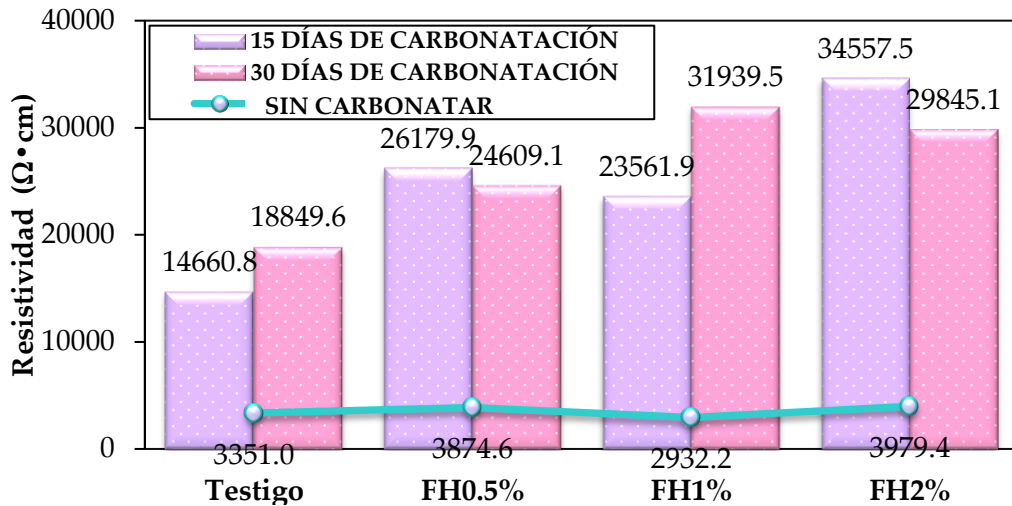


Gráfico 2.6. Resistividad después de 15 y 30 días (8 horas por día) de carbonatación.

Además, las muestras adicionadas con fibras de henequén que se carbonataron durante 30 días mostraron los valores de resistividad más altos, sin embargo, este suceso no necesariamente puede ser tribuido a las fibras de henequén.

3.2.5 Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

Los poros capilares formados durante las reacciones de hidratación son importantes para la durabilidad y la protección del acero de refuerzo. La disminución de la porosidad capilar aumenta la resistencia mecánica de la pasta de cemento y reduce la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada.

Para esta investigación se analizó el tiempo de relajación transversal o espín-espín (T_2) mediante la distribución de T_2 . Para determinar la distribución de T_2 que produce una señal de decaimiento de la magnetización transversal es necesario realizar un ajuste o mapeo. Este proceso es una inversión matemática basada en la transformada inversa de Laplace, con lo cual, es posible obtener la distribución de tamaños de poro de un sistema poroso. Dado que el valor T_2 de un poro es proporcional a la relación superficie / volumen del sistema poroso, la distribución T_2 observada representa la distribución del tamaño de poro en un material. Los análisis para las cuatro muestras mostraron la presencia de un tamaño de poro dominante, el cual se atribuye a los poros capilares presentes en la pasta de concreto. Siendo que M_0 es proporcional al volumen de fluido en los poros. Cuando se considera la distribución completa de poros 100% saturados de agua, estos poros presentan una distribución de valores de T_2 (Garro Linck).

Los análisis realizados en las cuatro muestras revelaron la presencia de un tamaño de poro dominante, ubicado a una amplitud aproximada de 1000 μs , que se atribuye al agua presente en poros capilares de mayor tamaño en la pasta de concreto, según lo mencionado por Hernández Arrazola (2012).

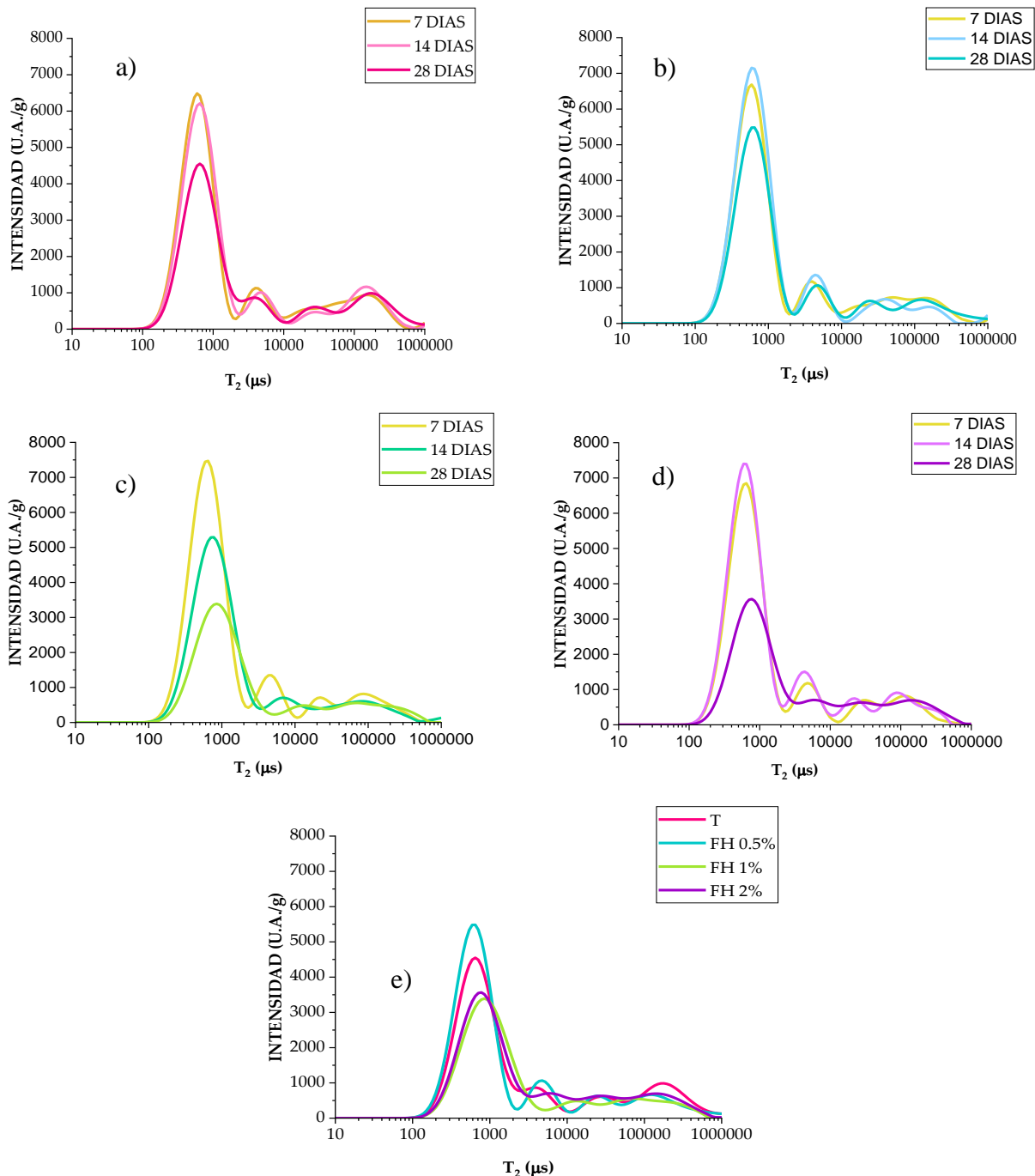


Gráfico 2.7. Cambios en la distribución de T_2 a diferentes edades de curado obtenidas mediante transformada inversa de Laplace a) muestras testigo b) muestras FH 0.5% c) muestras FH 1% d) muestras FH 2% e) comparación de las 4 series de muestras estudiadas a los 28 días (efectividad de las fibras de henequén).

En el Gráfico 2.7, en los incisos a, b, c y d, se observa una disminución en la amplitud de la señal a los 28 días de curado en las muestras testigo, FH 0.5%, FH 1% y FH 2%, respectivamente. Esta reducción en la amplitud sugiere el consumo de agua evaporable como resultado del avance en el proceso de hidratación. En el Gráfico 2.7, inciso e, se puede notar que la amplitud del primer pico es mayor en las muestras FH 0.5% y testigo que en las muestras FH 1% y FH 2%. Esto se debe a una mayor cantidad de agua presente en las muestras FH 0.5% y testigo. Por lo tanto, aunque las fibras de henequén no mejoren la resistencia a la compresión de las muestras, sí contribuyen a reducir la porosidad de estas cuando se añaden en concentraciones del 1% y 2%.

Los resultados de la distribución de tamaño de poro obtenidos mediante RMN muestran una disminución en el tiempo de relajación T₂, lo que sugiere una reducción en el tamaño de los poros y una disminución en la cantidad de agua evaporable. Estos cambios son atribuibles al proceso de hidratación. Estos resultados son importantes porque demuestran el potencial de la técnica de RMN para monitorear el progreso de la hidratación de materiales basados en cemento de manera no destructiva.

4. CONCLUSIONES

Las mediciones de resistividad muestran un aumento con respecto a la edad de curado, lo que sugiere que el proceso de hidratación está ocurriendo. A los 90 días de curado, los valores más altos se observaron en las muestras adicionadas con fibras de henequén.

Los potenciales de corrosión más negativos se atribuyen a la actividad en la interfaz concreto-varilla de refuerzo, mientras que los valores más positivos se relacionan con la pasividad del acero de refuerzo.

Los datos obtenidos en RMN sugieren que las fibras de henequén sí reducen la porosidad, siendo que esta disminuye con el aumento de la concentración de fibras de henequén.

Se recomienda continuar con el estudio y la evaluación de la degradación de las fibras naturales después del proceso de curado. Esto permitirá determinar si el uso de fibras naturales es una alternativa viable a largo plazo para la construcción de edificaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Campeche, la Facultad de Ingeniería Civil, al Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) y al Doctor Tezozomoc Pérez López.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR) y al Doctor Prisciliano de Jesús Cano Barrita.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT). A los compañeros de la estancia Delfín 2023, especialmente a Yadira Martínez, por contribuir en esta investigación. También agradezco a Perla, Flor, Borges y al Doctor Bacelis.

6. REFERENCIAS

ACI Committee 211. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal*.

Díaz Díaz, F. (2021). “*Sensores de resonancia magnética para caracterizar aspectos de durabilidad del recubrimiento de concreto*”. Tesis doctoral. CIDIIR.



- Duffó, G. S. (2019). “Corrosión en estructuras de hormigón armado: un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños”. Ciencia e investigación. Tomo 69 N° 4.
- Fuentes Nuñonca. (2022). “Influencia de la fibra de vástago de plátano en las propiedades del concreto $f'c$ 280 kg/cm² para el pavimento rígido, avenida Cultura, Cusco 2022”. Tesis de maestría. Universidad César Vallejo. Perú.
- Gonzales Díaz, F. (2010). “Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión”. Tesis doctoral. Universidad Autónoma De Nuevo León.
- Hernández Arrazola. (2012). “Tiempos de relajación de resonancia magnética nuclear y su relación con el grado de hidratación de pastas de cemento”. Tesis de maestría. CIDIIR.
- Manrique Marquéz, B. A. (2011). “Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado: descripción del comportamiento postratamiento”. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martin Sandra, A. (2020). “Estudio comparativo de fibras naturales para reforzar hormigón”. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia.
- ONCCE. (2015). *NMX-C-501-ONNCCE-2015-Industria de la construcción-durabilidad de estructuras de concreto reforzado-medición de velocidad de corrosión en campo especificaciones y método de ensayo.*
- ONNCCE. (2010). *NMX-C-156-ONNCCE-2010-Industria De La Construcción-Concreto Hidráulico-Determinación Del Revenimiento En El Concreto Fresco.*
- ONNCE. (2015). *NMX-C-495-ONNCCE-2015-Industria de la construcción-durabilidad de estructuras de concreto reforzado-medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto-especificaciones y método de ensayo.*
- ONNCE. (2016). *NMX-C-159-ONNCCE-2016-Industria de la construcción-concreto-elaboración y curado de especímenes de ensayo.*
- ONNCE. (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019-Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo.*
- Paricaguán Morales, B. M y Muñoz Cuevas, J. L. (2019). “Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar.” Revista Ingeniería UC, Vol. 26, No. 2.





Relación entre el tiempo de vida de la señal de RMN y el ancho de grieta en pastas de cemento: un enfoque de resonancia magnética nuclear de campo bajo

F. Díaz-Díaz¹, P. F. de J. Cano-Barrita^{1*}, F. M. León-Martínez¹

*Autor de Contacto: pcano@ipn.mx

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

RESUMEN

El agrietamiento producido por varios procesos afecta la durabilidad de las estructuras de concreto debido a que aumenta su permeabilidad a agentes agresivos. Tradicionalmente, la evaluación del ancho de grieta se realiza utilizando tarjetas de plástico transparente o microscopios de mano, así como el procesamiento de imágenes. En este estudio, se utilizó la resonancia magnética nuclear de bajo campo para relacionar el tiempo de vida T_2 y la intensidad de la señal de resonancia magnética con el ancho de grieta. Se prepararon pastas de cemento con una relación a/c = 0.50 utilizando cemento Portland ordinario y cemento Portland blanco. De cada mezcla se elaboraron 16 especímenes de 40 mm de largo y 36 mm de diámetro. Se generaron grietas artificiales en los especímenes utilizando cuñas de acero inoxidable de diferentes calibres. Después del período de curado, las muestras se saturaron al vacío con agua y se realizaron mediciones con la técnica CPMG. Los datos obtenidos se ajustaron a una función de decaimiento exponencial de cuatro componentes. Se observó en el cuarto componente una relación lineal entre el ancho de grieta y T_2 , así como con su intensidad.

Palabras clave: Materiales base cemento; Agrietamiento; RMN de bajo campo; Relaxometría.

1. INTRODUCCIÓN

El agrietamiento del concreto es un problema común en la construcción debido a que afecta la durabilidad y la estética (Toirac Corral, 2004). Son múltiples factores los que contribuyen al agrietamiento, el cual ocurre tanto en estado plástico como en estado endurecido. En el estado plástico el agrietamiento es causado por la contracción o asentamiento (Kayondo et al., 2019), mientras que en el estado endurecido puede ocurrir por los cambios de temperatura, secado, corrosión del acero de refuerzo, carbonatación y las sobrecargas (Ahmad, 2003). Los métodos tradicionales para caracterizar el agrietamiento del concreto se basan principalmente en la inspección visual utilizando microscopios portátiles, tarjetas de plástico transparentes calibradas o análisis de imágenes. Las desventajas de estos métodos es que suelen ser limitadas a los anchos de grietas visibles, en el caso de las tarjetas transparentes o en el análisis de imágenes a la resolución de las mismas, aunque los microscopios portables pueden ser más precisos que las dos anteriores. Otro método que se ha utilizado es la imagenología por resonancia magnética nuclear (IRMN) para observar los patrones de grietas internas y las estructuras de los agregados en el concreto endurecido, lo que permite visualizar el desarrollo de las grietas dentro del material (Marfisi et al., 2005). Sin embargo, su aplicación está restringida a observar sólo grietas amplias debido a la limitación en la resolución de las imágenes (Young et al., 2004).

Por otra parte, la relaxometría de RMN se ha utilizado para obtener información sobre la distribución del tamaño de poros y microagrietamiento en materiales porosos, como rocas y materiales a base de cemento (Beyea et al., 2003). Con esta técnica, el tamaño de poro se relaciona con el tiempo de relajación transversal T_2 a través de las interacciones de los protones con las superficies de los poros, tal como se muestra en (1) (Halperin et al., 1994).

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (1)$$

donde T_2 es el tiempo de vida de la señal, ρ es la constante de relaxividad de superficie y $\frac{S}{V}$ es la relación entre la superficie y el volumen del sistema poroso. Por lo tanto, En este trabajo se emplea la relaxometría de RMN de campo bajo para observar el comportamiento del tiempo de relajación T_2 y la intensidad de las señales medidas en pastas de cemento Portland blanco y ordinario con grietas inducidas artificialmente.

2. MATERIALES Y MÉTODO

Se prepararon mezclas de pasta de cemento con relación agua/cemento (a/c) = 0.50 empleando cemento Portland ordinario (CPO) y cemento Portland blanco (CPB). Para cada una de las mezclas se elaboró por duplicado un conjunto de 8 especímenes de 40 mm de largo y 36 mm de diámetro. Durante el fraguado inicial se les indujeron grietas artificiales con profundidad de 30 mm empleando calibradores de holgura marca KNOVA con espesores de 76, 102, 152, 203, 254, 305 y 356 μm (Figura 1). Las muestras control se mantuvieron sin calibradores. Posteriormente, las muestras se almacenaron dentro de una bolsa de plástico con un paño saturado para proporcionar una alta humedad relativa y evitar secado. Después de 24 horas, las muestras fueron desmoldadas y curadas en húmedo en agua destilada saturada con hidróxido de calcio durante siete días.



Figura 1. Grietas artificiales en muestras de pastas de cemento Portland. La grieta se formó con los calibradores insertados en cemento fresco para posteriormente extraerlas.

Las mediciones de RMN se realizaron a los siete días de curado con la técnica Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) empleando un sistema de RMN MARAN DRX-HF 12/50 (Oxford Instruments Ltd, Abingdon, Oxford, Reino Unido) que opera a una frecuencia de resonancia de 12,9 MHz, los parámetros empleados se muestran en la Tabla 1. Antes de las mediciones, las muestras fueron saturadas al vacío con agua destilada para asegurar que las grietas estuvieran completamente llenas de agua. Las señales obtenidas se ajustaron a curvas de decaimiento exponencial de cuatro componentes como se muestra en (2) para obtener los tiempos de vida T_2 y sus correspondientes contribuciones a la intensidad de la señal.

$$S(t) = M_{0,1} * e^{-\frac{t}{T_{2,1}}} + M_{0,2} * e^{-\frac{t}{T_{2,2}}} + M_{0,3} * e^{-\frac{t}{T_{2,3}}} + M_{0,4} * e^{-\frac{t}{T_{2,4}}} \quad (2)$$

donde $S(t)$ es la magnetización total, t es el tiempo, $M_{0,1}$, $M_{0,2}$, $M_{0,3}$ y $M_{0,4}$ son la magnetización inicial de las componentes correspondientes a los tiempos de relajación transversal $T_{2,1}$, $T_{2,2}$, $T_{2,3}$ y $T_{2,4}$, respectivamente.

Tabla 1. Parámetros utilizados para las mediciones de RMN con la técnica CPMG.

Parámetros	Valor
Pulso de 90 grados (μs)	18.5
Pulso de 180 grados (μs)	37
Frecuencia (MHz)	12.900000
Numero de ecos	2048
Numero de escaneos	256
Tiempo de repetición (μs)	15000000
Tau (μs)	150

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se presentan las señales de decaimiento CPMG obtenida de una muestra CPO sin grieta, comparada con la señal obtenida de una muestra CPO con una grieta de 356 μm de ancho. Se observa que hay un decaimiento más lento de la señal de la muestra con grieta.

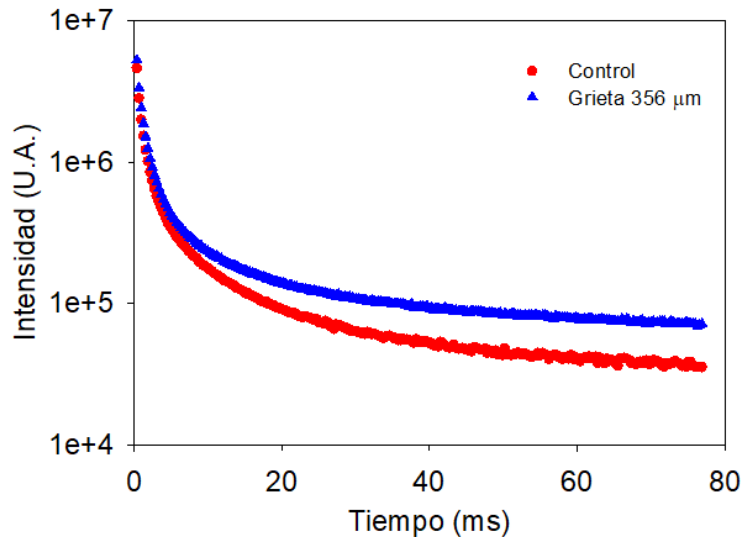


Figura 2 Señales de decaimiento CPMG medidas en muestras CPO con grieta y sin grieta.

En los datos de las señales CPMG ajustados a una curva de decaimiento exponencial de cuatro componentes la primera, la segunda y la tercera componente se atribuyen a poros gel, poros entre hidratos y poros capilares, respectivamente, la cuarta componente se atribuye al agua en los poros capilares más grandes y las microgrietas (Kowalczyk et al., 2014). Por lo tanto, como se observa en la Figura 3 para las primeras tres componentes no existe relación entre el ancho de grieta con el tiempo de vida de la señal T_2 ni con la intensidad de la señal en las muestras CPO. El mismo comportamiento se observa en las muestras CPB (Figura 4).

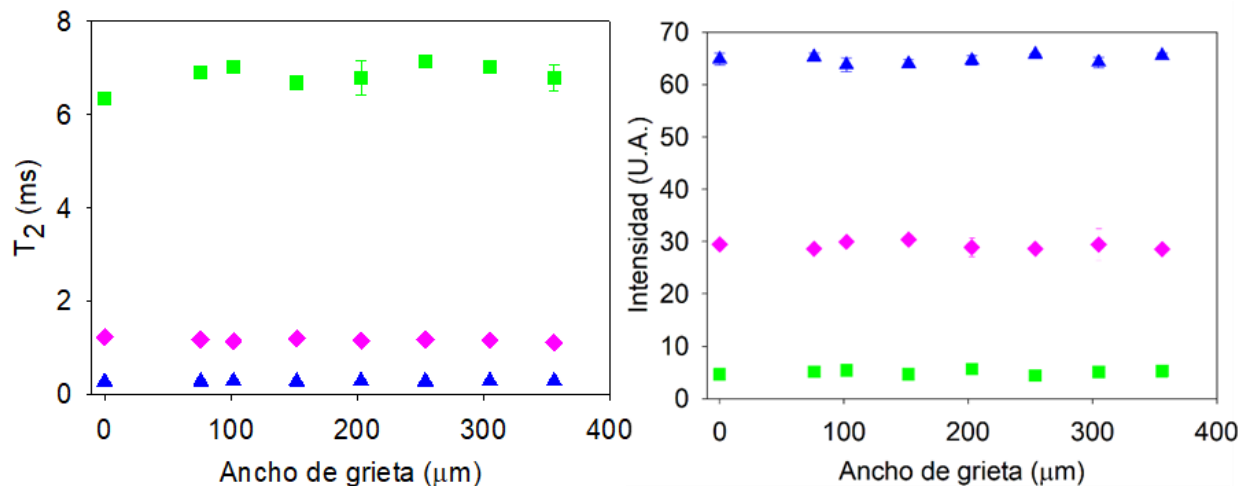


Figura 3 Ancho de grieta versus tiempo de relajación T_2 e intensidad en las muestras CPO. Primera componente (Triángulo azul), segunda componente (rombo rosa) y tercera componente (cuadro verde).

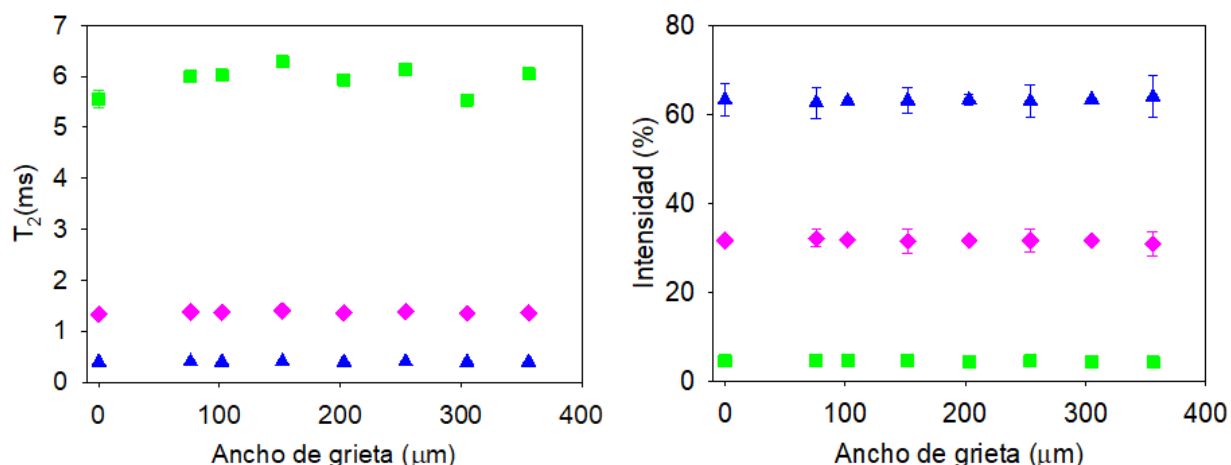


Figura 4 Ancho de grieta versus tiempo de relajación T_2 e intensidad en las muestras CPB. Primera componente (Triángulo azul), segunda componente (rombo rosa) y tercera componente (cuadro verde).

Como se muestra en las Figuras 5 y Figura 6, en el caso de la cuarta componente, se observó una relación lineal entre los tiempos de relajación T_2 y el ancho de grieta con un coeficiente de determinación $r^2=0.92$ para pastas CPO y $r^2=0.97$ para pastas CPB. Así mismo, se encontró una relación entre las intensidades de dicho componente y el ancho de grieta, con un coeficiente de determinación $r^2=0.81$ para pastas CPO y un coeficiente de determinación $r^2=0.96$ para pastas CPB.

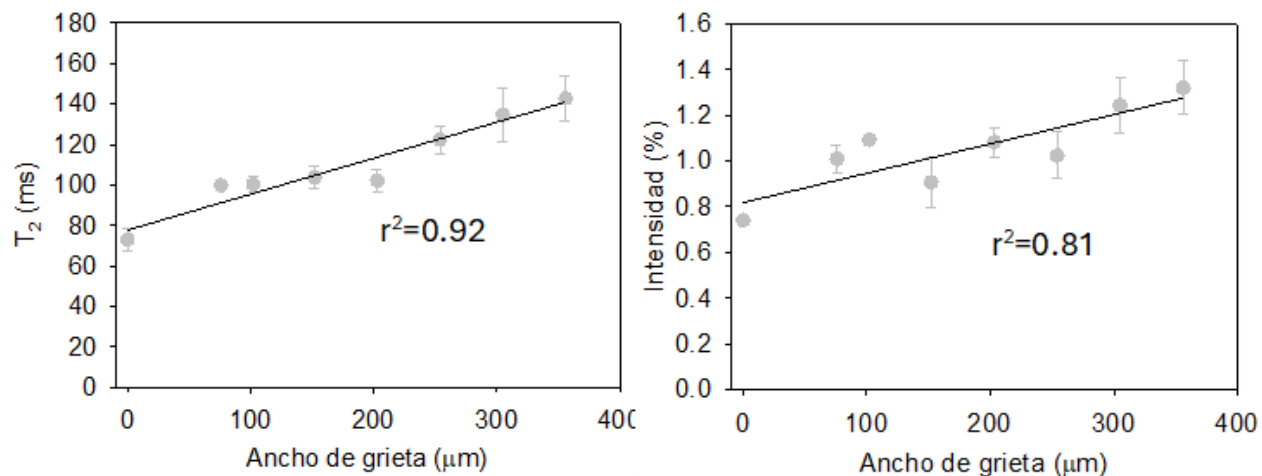


Figura 5 Relación entre ancho de grieta, los tiempos de relajación T_2 e intensidad de la cuarta componente en las muestras CPO. El primer punto en la posición cero corresponde a la muestra control.

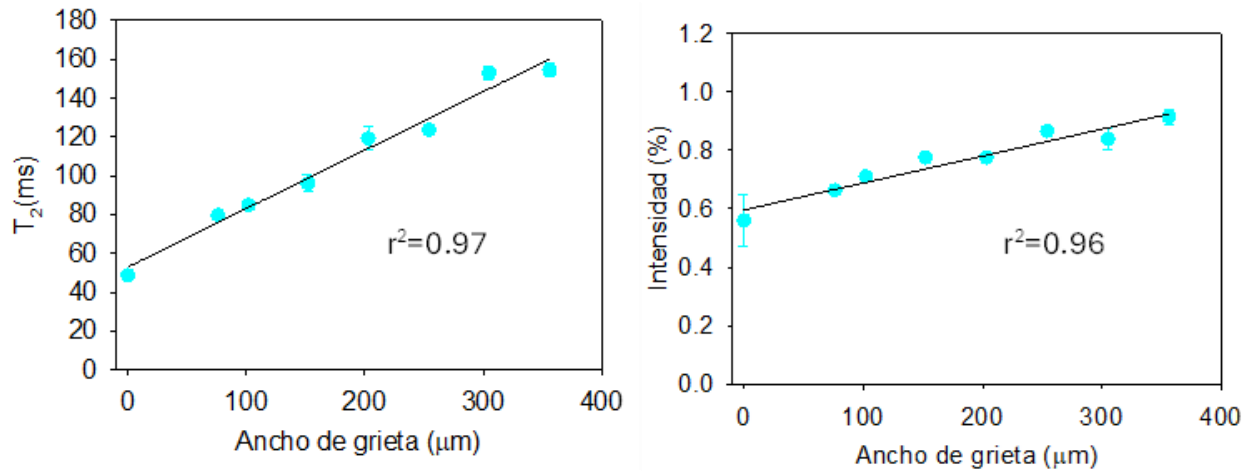


Figura 6 Relación entre ancho de grieta, los tiempos de relajación T_2 e intensidad de la cuarta componente en las muestras CPB. El primer punto en la posición cero corresponde a la muestra control.

El aumento proporcional en T_2 a medida que aumenta el ancho de la grieta se debe a que la relajación de superficie se vuelve menos efectiva a medida que aumenta la separación entre las superficies de la grieta. Así que es posible que, en un rango superior específico de ancho de grieta, el agua contenida tienda a comportarse como agua libre. Por otro lado, el aumento en la intensidad de la señal del cuarto componente se explica por el aumento en el volumen de la grieta (volumen de agua) de manera proporcional al aumento del ancho de la grieta.

4. CONCLUSIONES

Se analizaron las señales de RMN medidas con la técnica CPMG en muestras de pastas de cemento CPO y CPB con relación $a/c = 0.50$ a las cuales se les indujeron grietas artificiales llegando a las siguientes conclusiones:

Todas las señales obtenidas en las muestras CPO y CPB con grietas y sin grietas se ajustan mejor a una curva de decaimiento exponencial de cuatro componentes. No se observaron cambios en el primer, segundo y tercer componente respecto al ancho de grietas artificiales ya que estos se atribuyen a poros gel, poros entre hidratos y poros capilares, respectivamente. Por lo tanto, es comprensible que la variación en el ancho de las grietas no tenga ningún efecto sobre estas componentes.

Se observó una relación lineal entre el ancho de grieta y los tiempos de relajación T_2 así como con las intensidades de la cuarta componente, lo cual se atribuyó a la presencia de agua en las grietas generadas artificialmente. El rango de grietas observadas fue de $76\mu\text{m}$ hasta $356\mu\text{m}$.

5. AGRADECIMIENTOS

F. Díaz agradece al CONAHCYT por la beca posdoctoral, y al CIIDIR-Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional por permitirle realizar su estancia posdoctoral dentro de sus instalaciones. P. Cano agradece a la SIP del IPN el apoyo al proyecto de innovación SIP 20232772, así como al proyecto SIP 20240334.

6. REFERENCIAS

- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5 SPEC), 459–471.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0)
- Beyea, S. D., Balcom, B. J., Bremner, T. W., Armstrong, R. L., & Grattan-Bellew, P. E. (2003). Detection of Drying-Induced Microcracking in Cementitious Materials with Space-Resolved ^1H Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry. *Am. Ceram. Soc.*, 86(5), 800–805.
- Halperin, W. P., Jehng, J. Y., & Song, Y. Q. (1994). Application of spin-spin relaxation to measurement of surface area and pore size distributions in a hydrating cement paste. *Magnetic Resonance Imaging*, 12, 169–173.
- Kayondo, M., Combrinck, R., & Boshoff, W. P. (2019). State-of-the-art review on plastic cracking of concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 886–899.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197>
- Kowalczyk, R. M., Gajewicz, A. M., & McDonald, P. J. (2014). The mechanism of water-isopropanol exchange in cement pastes evidenced by NMR relaxometry. *RSC Advances*, 4(40), 20709–20715. <https://doi.org/10.1039/c4ra00889h>
- Marfisi, E., Burgoyne, C. J., Amin, M. H. G., & Hall, L. D. (2005). The use of MRI to observe fractures in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 111–121.
- Toirac Corral, J. (2004). Ciencia y Sociedad. *Ciencia y Sociedad*, 29(1), 72–114.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029104>
- Young, J. J., Szomolanyi, P., Bremner, T. W., & Balcom, B. J. (2004). Magnetic resonance imaging of crack formation in hydrated cement paste materials. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1459–1466.



Formación de magnetita in situ en el acero de refuerzo para aumentar la vida útil del concreto armado.

R. Sánchez-Torres¹, E. Onofre-Bustamante^{1*}, A. C. Espíndola-Flores¹

*Autor de Contacto: eonofre@ipn.com

¹ Instituto Politécnico Nacional, CICATA Altamira.

RESUMEN

El problema de la degradación de las estructuras de concreto se debe principalmente al proceso de corrosión, este fenómeno ocasiona pérdidas económicas por mantenimiento, contaminación y afectaciones a la integridad humana. En búsqueda de materiales que puedan brindar una mayor protección al acero de refuerzo, en este trabajo se propone el uso de recubrimientos base magnetita; material con altas prestaciones como: buena eficiencia anticorrosiva y excelente adherencia. La formación de los recubrimientos base magnetita se obtuvieron mediante pulso potenciostático a 2V en tiempos de 10 y 15 días sobre las varillas con diferente preparación superficial: comercial, limpieza electroquímica, oxidada en cámara de niebla salina y expuesta a la intemperie. Todas las muestras fueron evaluadas utilizando un electrolito que simula las condiciones de pH del concreto. Se determinó por DRX la presencia de magnetita preferencialmente. Adicionalmente los resultados electroquímicos demostraron que la magnetita obtenida bajo estas condiciones le confiere al acero de refuerzo una mayor resistencia a la degradación con una velocidad de corrosión de 0.0013 mm/año, ampliando el tiempo de vida útil del concreto armado.

Palabras clave: Magnetita; Acero de refuerzo; Concreto armado; Corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema concreto-acero de refuerzo es de los materiales para la construcción con mayor uso a nivel mundial, sin embargo, es susceptible a la corrosión ocasionando que se degrade causando fallas súbitas. Aunque el concreto le proporciona de una alta resistencia, no es lo suficiente para proteger al acero de refuerzo embebido. Por lo tanto, al corroerse causa fallas en el concreto de gran importancia y de implicaciones económicas importantes [1]. En Estados Unidos, reportaron pérdidas económicas alrededor de los 300 mil millones de dólares. [2] Por ese motivo se buscan métodos de protección para frenar este fenómeno y reducir los costos económicos causados por corrosión, que se estiman alrededor de 100 mil millones de dólares. Para contrarrestar este efecto, se han utilizado diversos métodos como: recubrimientos, protección catódica e inhibidores. Destacando el uso de los recubrimientos en sistemas cerrados, estáticos y dinámicos; los recubrimientos más utilizados para evitar la corrosión son las pinturas [3]. Su principio, radica impidiendo o disminuyendo la velocidad de ingreso de los iones agresivos externos a través de la porosidad del concreto como lo son: los iones cloruro, el dióxido de carbono, humedad, etc. Y así poder extender el tiempo de vida útil de la estructura. Estudios recientes han demostrado una mayor efectividad de los recubrimientos al ser aplicados directamente sobre el acero de refuerzo debido a que los problemas más graves de corrosión se presentan en la interface acero-concreto afectando de manera significativa la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado (RC) [4]. En este sentido, la magnetita es el óxido de hierro con mayor estabilidad química y estructural, además de proporcionar una buena resistencia a la corrosión. Los resultados de las pinturas pigmentadas con magnetita dopada, demuestran que la magnetita no es un pigmento inerte, y que la presencia de elementos dopantes puede mejorar el comportamiento de las pinturas anticorrosivas [5],[6]. Por otro lado, en sistemas de pintura, como la síntesis de recubrimientos de polipirrol-magnetita / silano (PPy-Fe₃O₄ / GPTMS-TEOS-γ-APS) para controlar la corrosión demostró que la adición de Fe₃O₄ a la matriz PPy ralentiza su velocidad de corrosión aumentando su estabilidad al aplicar el recubrimiento en el acero [7]. Existen diversas formas para sintetizar magnetita, ya sea a través de la reacción de Fe y la Fe₂O₃ o la reacción de Fe y H₂O en solución acuosa alcalina aumenta notablemente al elevar la temperatura y concentración de álcali, lo que sugiere que Fe(OH)₃ y Fe(OH)₄ se forman disolviendo Fe y Fe₂O₃, respectivamente. Posteriormente, en una solución acuosa alcalina se catalizan las reacciones para formar Fe₃O₄. Además, los iones de aluminio tienen poca influencia en la reducción hidrotermal de Fe₂O₃ en la solución acuosa alcalina y la conversión de minerales de hierro. Adicionalmente la magnetita se puede realizar por digestión de Bayer de la diáspora bauxita [8], entre otras formas. Sin embargo, en este trabajo se estudió el efecto de la preparación de la superficie y del tiempo en la formación de magnetita en acero de refuerzo mediante la técnica de pulso potencioestático polarizando 2V en tiempos de 10 y 15 días sobre las varillas con diferentes acabados superficiales: comercial, limpieza electroquímica, oxidada en cámara de niebla salina y expuesta a la intemperie. Todas las muestras fueron evaluadas utilizando un electrolito que simula las condiciones de pH del concreto y se caracterizaron mediante Difracción de Rayos X (XRD) para determinar la presencia de la magnetita. Mientras que las propiedades electroquímicas de los recubrimientos base magnetita fueron caracterizadas a través de técnicas electroquímicas convencionales como potencial a circuito abierto (OCP), Resistencia a la Polarización Lineal (LPR), Curvas de Polarización (CP) y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).



2. EXPERIMENTACIÓN

2.1 Preparación superficial.

Se realizaron cortes de 15 cm de la varilla de acero corrugado de ½". Las varillas se expusieron a tres ambientes agresivos considerando los posibles grados de oxidación en que se encuentren las varillas en los pilotes de puentes: oxidada comercialmente (como el proveedor la entrega), oxidada a la intemperie para que se oxide con el medio ambiente, como su estuviera almacenada por meses y oxidada en cámara de niebla salina, utilizando una concentración de cloruros alta (5% en peso), con una humedad superior al 90% y 48°C, durante un periodo de tiempo de 514hrs. Estas condiciones se utilizan de acuerdo con la norma ASTM B-114-03 [9] y finalmente se utilizó una varilla decapada siguiendo la norma ASTM G1 [10] para eliminar los óxidos presentes y activar la superficie del acero de refuerzo (metal desnudo).

2.2 Formación de la magnetita por pulso potencioestático.

Para la obtención de la magnetita, se utilizó una celda electroquímica convencional de tres electrodos, como electrodo de referencia Calomel (Hg/HgCl), acero inoxidable como contraelectrodo y la varilla de acero de refuerzo como electrodo de trabajo. Se utilizó un electrolito alcalino simulando las condiciones de pH del concreto (solución saturada de hidróxido de calcio pH 12.5) a nivel laboratorio. Las condiciones óptimas para la obtención de la magnetita se seleccionaron variando el tiempo (10, 15 días) y una polarización de 2 Volts.

2.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Las muestras se caracterizaron por DRX, para identificar su estructura cristalina, se utilizó un Difractómetro de rayos X, marca Bruker, modelo D8 Advance, con una configuración de 2θ “Bragg – Brentano” en un rango de análisis de 10° a 80° a una velocidad 0.02°/s, con una radiación Kα de Cu (0.15406 nm), operando con un voltaje de 40 kV y una corriente de 40 mA.

2.4 Técnicas electroquímicas

Para las pruebas electroquímicas se utilizó un arreglo experimental de tres electrodos: electrodo de trabajo se utilizó varilla de acero de refuerzo de 3/8", electrodo auxiliar varilla de acero inoxidable, y electrodo de referencia electrodo de Calomel saturado.

2.4.1 Medición de potencial a circuito abierto (OCP)

Se realizó la medición de potencial a circuito abierto, durante un tiempo de 10min, tiempo requerido para la estabilización del sistema y poder obtener el valor de potencial de corrosión.

2.4.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR)

Se polarizo el sistema aplicando un potencial de ±20mV a partir del potencial de corrosión, con una velocidad de barrido de 0.1 mV/s.

2.4.3 Curva de polarización (Tafel)

Para la técnica de extrapolación de Tafel las condiciones de medición se consideró aplicar un sobre potencial de ± 300 mV con respecto al potencial de corrosión con una velocidad de barrido de 0.5 mV/s, para poder obtener los valores de densidad de corriente de corrosión y poder calcular la



velocidad de corrosión del electrodo de trabajo, así mismo conocer el comportamiento anódico y catódico del sistema a evaluar.

2.4.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

Para la técnica de EIS se aplicó un potencial de ± 10 mV rms, con una ventana de frecuencia de 100000-0.01 Hz y 10 puntos por década de frecuencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Difracción de Rayos X.

La figura 1 muestra el difractograma de las muestras del acero comercial (VC) después de ser polarizada por 10 y 15 días, aplicando un potencial de 2V. Como se puede observar, las muestras presentan una estructura cubica centrada en las caras (FCC) [11] característica de la magnetita, con planos que se ajustan con la carta cristalográfica PDF 00-011-0614. Adicionalmente, se puede observar que la muestra VC-15d presenta señales con mayor intensidad que la muestra VC-10d. Este comportamiento puede estar relacionado directamente con el espesor del recubrimiento obtenido, sin embargo, hay un pico a $2\theta=29$ intenso que corresponde a la hematita. Por lo tanto, se puede concluir que el recubrimiento obtenido está compuesto principalmente por magnetita, sin embargo, se detectó la presencia de hematita, pero en menor cantidad.

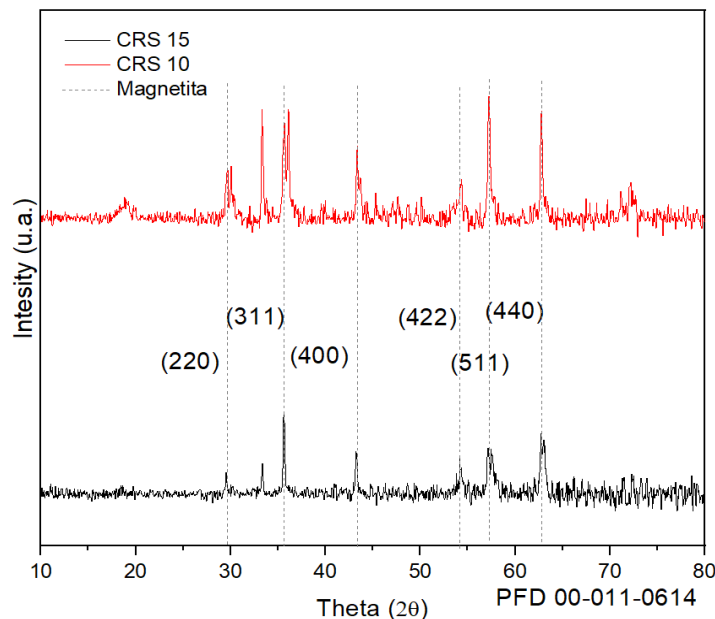


Figura 1. Difractograma de VC con el recubrimiento obtenido, 10 y 15 días de polarización.

La figura 2, se presentan las muestras de acero de refuerzo sin y con recubrimiento base magnetita obtenido polarizando 1.5V, durante 10 y 15 días. Donde se puede corroborar visualmente la presencia de la magnetita observada en DRX, por su color negro característico de la magnetita.



Figura 2. Acero de refuerzo a) VL sin recubrimiento, b) VC, c) VOA y d) VOI con recubrimiento. Los recubrimientos de magnetita se obtuvieron aplicando 1.5 V durante 15 días.

3.2 Potencial a Circuito Abierto (OCP)

De acuerdo con la serie electromotriz el potencial del hierro se encuentra a -440mV vs ENH o -680mV con respecto al electrodo calomel (Hg/HgCl), como se puede observar en la figura 3a, el potencial de las muestras de acero de refuerzo sin óxidos presentes (VL), a la cual se le realizó una limpieza electroquímica presenta un potencial parecido ($\approx -600\text{mV}$). Este comportamiento está directamente relacionado con la limpieza electroquímica que remueve la mayor parte de óxido que tiene la superficie del acero de refuerzo dejando la superficie activa (potencial más negativo) dejándola expuesta y disponible para que se lleven a cabo las reacciones oxido-reducción. Por otro lado, el acero de refuerzo comercial (VC) junto con el acero expuesto a la intemperie (VI), presenta potenciales más nobles (≈ -120 y 100mV respectivamente). Este comportamiento se debe principalmente a la presencia de óxidos en la superficie que se forman en función del tiempo ya sea por estar almacenadas o expuestas a la intemperie. Por otro lado, el acero con óxidos acelerados (VOA) presentó potenciales sumamente más positivos ($\approx +300\text{mV}$), lo que indica que la cantidad de óxidos formados en la superficie, son más estables o de naturaleza química distinta, proporcionándole una protección aparente o temporal. Ahora bien, en la figura 3b se observa el comportamiento del potencial de corrosión asociado con las muestras de acero de refuerzo que fueron polarizadas y/o recubiertas durante 10 días. Se puede observar en general que se ennoblece el potencial de corrosión o que se desplaza el potencial a valores más positivos que el de la varilla comercial con limpieza electroquímica. Este comportamiento se debe a la obtención del recubrimiento de magnetita que le provee de cierta protección. No obstante, la varilla a la intemperie (VI) se mantiene en el mismo potencial de corrosión a diferencia de la varilla con óxidos acelerados (VOA), donde el potencial disminuye a valores de -500mV , lo que puede indicar que al momento de aplicar el tratamiento para la formación de la magnetita, se obtuvo un recubrimiento muy poroso que está permitiendo el contacto del electrolito directamente con el sustrato. Adicionalmente en la figura 3c se muestra el mismo comportamiento que el descrito para la figura 3b, con la diferencia que la muestra de acero de refuerzo comercial disminuyó su potencial de corrosión por debajo del valor obtenido del potencial de corrosión de la varilla oxidada a la intemperie.

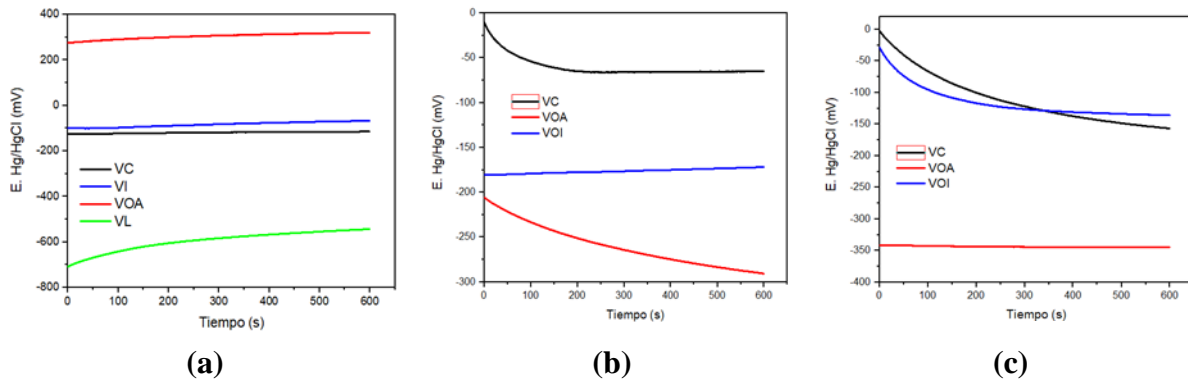


Figura 3. Resultados OCP de las muestras de acero de refuerzo, a) tiempo 0, b) 10 días y c) 15 días de polarización.

3.3 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)

La técnica de LPR se realizó con el fin de calcular la resistencia total del sistema y con base a los resultados determinar la velocidad de corrosión global. Se puede observar (Tabla 1) que los óxidos presentes en la superficie de las muestras de acero de refuerzo, les provee cierta protección ante la corrosión, por lo tanto, disminuye su velocidad de corrosión. Para las muestras tratadas durante 10 y 15 días, el acero expuesto a la intemperie presenta una velocidad a la corrosión menor a las demás, esto nos indica que el recubrimiento tiene mayor estabilidad o es más homogéneo en comparación a las demás.

Tabla 1. Velocidades de corrosión de las muestras de acero de refuerzo con y sin recubrimiento de magnetita.

Muestra	R_p (Ω/cm^2)	I_{corr} (mA/cm^2)	V_{corr} (mm/a)	V_{corr} (mpulg/a)
VL	2.57E+03	1.05E-02	1.22E-01	4.870
VC	5.49E+04	4.74E-04	5.48E-03	0.219
VOI	4.78E+04	5.44E-04	6.30E-03	0.252
VOA	8.09E+04	3.21E-04	3.71E-03	0.149
VC 10	1.20E+04	2.26E-03	2.61E-02	1.050
VOA 10	1.93E+03	1.40E-02	1.62E-01	6.490
VOI 10	2.31E+05	1.17E-04	1.36E-03	0.00543
VLA 10	1.80E+04	1.51E-03	1.74E-02	0.698

3.4 Extrapolación de Tafel

En la Figura 4a-c se puede observar como las muestras de acero de refuerzo con óxidos acelerados presenta salidas de corriente menores ($\approx 1\text{E}-6 \text{ mA}/\text{cm}^2$), con un potencial más noble ($\approx +350 \text{ mV}$) en comparación con las demás muestras evaluadas (figura 4a). Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos en OCP. Adicionalmente se puede observar que en general las muestras VC, VI y VOA en la zona anódica como empieza a disminuir la densidad de corriente. Característica que podría indicar el inicio de la formación de una capa pasiva, debido a que estaría disminuyendo la corriente para formar posiblemente una zona de pasivación, esto se podría corroborar mediante curvas de polarización y/o polarizando más el sistema. En la muestra de acero

VI y VC se puede observar prácticamente los mismos valores con un comportamiento similar. Esto se puede deber a que ambas muestras de acero de refuerzo están expuestas a una oxidación similar, si estas almacenadas o a la intemperie las varillas de acero de refuerzo, el grado de oxidación y la naturaleza de estos es muy similar. Mientras que en la muestra VL (muestra con limpieza electroquímica), se aprecia la intención de formarse una capa pasiva, pero poco estable y por tanto, nuevamente incrementa la salidas de corrientes. Por otro lado, la figura 4b se observa como la muestra VC presenta potenciales de corrosión más nobles, mientras que la muestra VI muestra una densidad de corriente menor. También se observa como la pendiente anódica tiende al infinito, lo que indica que el sistema está controlado por resistencia óhmica, por la presencia de una película de óxidos estable. De igual forma las demás muestras evaluadas que se presentan en las figuras 4b, presentan el mismo comportamiento. El cual, está asociado con la presencia de una película que ofrece una resistencia a la corrosión disminuyendo el paso de corriente en un intervalo menos amplio de potencial que las observadas en la Figura 4a. En la figura 4c se muestra cómo se desplazaron los potenciales de las muestras de acero de refuerzo VI y VC a valores menos negativos. Mientras que la muestra VOA se desplaza a valores de potencial de corrosión más negativos y el VI a valores más positivos respectivamente. Esto se puede deber a que la película de magnetita obtenida sobre la superficie de esta muestra es más estable. También se observa que la muestra VC presenta una pendiente anódica más definida esto debido a la estabilidad del recubrimiento.

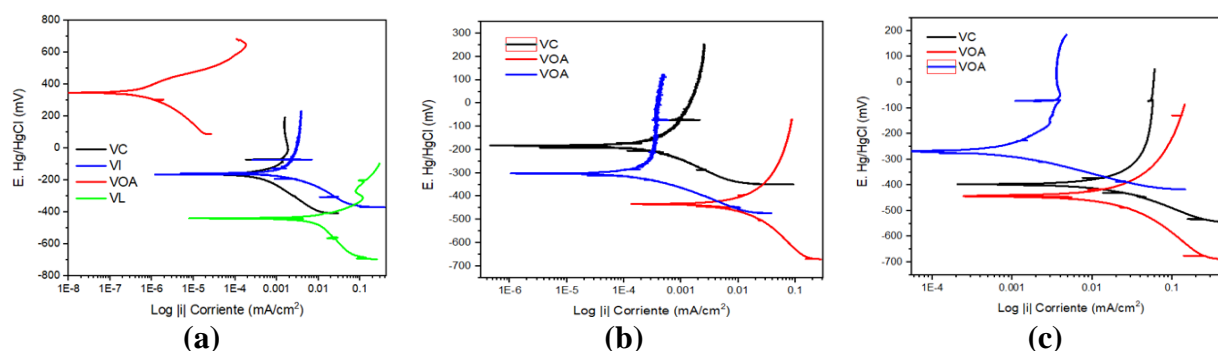


Figura 4. Resultados de Tafel de las muestras de acero de refuerzo, a) tiempo 0, b) 10 días y c) 15 días de polarización.

3.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

En la Figura 5a se puede observar la contribución resistiva del material de referencia, se observa que la muestra VC presenta mayor impedancia, esto se le atribuye a la costra de óxidos que se formaron en su fabricación. Mientras que en la muestra VI se observa una menor impedancia, debido a que los óxidos presentes en la superficie pueden ser muy porosos. Por otro lado en la muestra VL se puede observar un valor de impedancia muy bajo, sin embargo, este valor ha sido reportado en la literatura para el acero al desnudo. En la figura 5b se puede observar para la muestra VL un comportamiento capacitivo. En la Figura 5b, se puede observar que el recubrimiento obtenido le proporciona a acero de refuerzo con óxidos formados a la intemperie un aumento en la impedancia total y en el acercamiento se puede observar otra constante de tiempo en altas frecuencias, esto se debe a la porosidad del recubrimiento. Sin embargo, la impedancia sigue incrementando, indicando que los poros se pudieron sellar dándole una mayor impedancia. No obstante, el sellado puede ser consecuencia de las reacciones óxido-reducción que se establecen

una vez que el electrolito ingresa a través de los poros y llega al metal desnudo. Adicionalmente se puede observar que la muestra VOA presenta una impedancia es muy baja (zoom) esto se puede deber a la pérdida de los óxidos no adherentes y a que la magnetita es semi conductora. Finalmente en la figura 5c se puede observar la misma situación y al igual que en la figura 5a, presentando comportamiento muy similares como consecuencia de la estabilidad del sistema después de 10 de polarización, sin embargo, la impedancia sigue siendo muy baja, lo que puede estar asociado a la porosidad de la película.

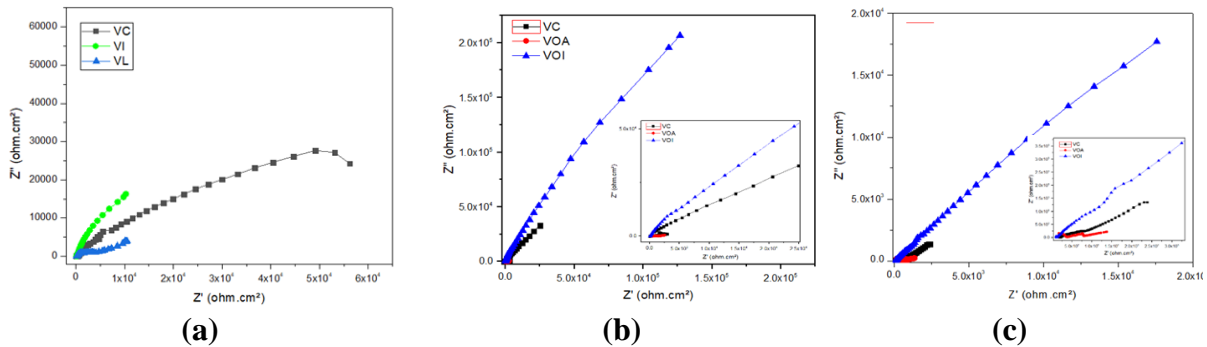


Figura 5. Resultados de EIS de las muestras de acero de refuerzo, a) tiempo 0, b) 10 días y c) 15 días de polarización.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se determinó de forma visual la presencia de magnetita después de polarizar el sistema por 10 y 15 días, presentado una película homogénea color negro característico de la magnetita y esta información se corroboró mediante DRX. Adicionalmente los resultados electroquímicos demostraron que la magnetita obtenida bajo estas condiciones le confiere al acero de refuerzo de una mayor resistencia a la corrosión y que el recubrimiento base magnetita es homogéneo y poco poroso. No obstante, los resultados más sobresalientes se obtuvieron para el caso de la muestra de acero de refuerzo expuesta a la intemperie debido a que los óxidos previamente formados en estas condiciones eran homogéneos, lo que favoreció la obtención de magnetita.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación se ha realizado con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional, con los proyectos SIP 20241778 y SIP 20241400. Así como también al CONAHCYT, por la beca otorgada.

6. REFERENCIAS

- Alonso, M., Andrade, C. and González, J. A. (1988). Cement and Concrete Research. *Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types*. 18(5), 687-698. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90091-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90091-9)
- Abel de la Cruz. (2008). INPRA Latina. *Corrosión del Acero en el concreto*. 1, 10-12.

- American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM B-117-03 Histórica Estándar: Especificación Normalizada para el uso de la cámara de niebla salina.
- American Society for Testing and Materials. (1999). ASTM G1. Standar practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens.
- Cheng Jiang, Yu-Fei Wu, Ming-Jiang Dai. (2018). Construction and Building Materials. *Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion*. 18, 1073-1080.
- Diana Marcela Escobar, Carlos Arroyave, Jorge Calderón, Isabel Margarit, Óscar Mattos (2007). Fac. Ing. Univ. Antioquia. *Pinturas pigmentadas con magnetita dopada: evaluación preliminar de propiedades anticorrosivas*. 41, 21-30. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.19013>
- E. F. Gundaker. (1996). 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE. *Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects*.
- Montiel, A. y Onofre E. (2018). Cement and Concrete Compositites. *Study of reinforcing steel corrosion behaviour treated by bluing and cerium chemical conversion treatments, part I: Conventional electrochemical techniques*. 90. 202-217. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.012>
- P. Montoya, C.R.Martins, H.G.de Melo, I.V.Aoki, F.Jaramillo, J.A.Calderón. (2014). Electrochimica Acta. *Synthesis of polypyrrole-magnetite/silane coatings on steel and assessment of anticorrosive properties*. 128, 100-108. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05555-0>
- Siti Machmudah, Rizka Zulhijah, Wahyudiono, Heru Setyawan, Hideki Kanda, Motonobu Goto. (2015). Chemical Engineering Journal. *Magnetite thin film on mild steel formed by hydrothermal electrolysis for corrosion prevention*. 268, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.146>
- W. Furbeth, M. Stratmann. (2001). Corrosion Science. *The delamination of polymeric coatings from electrogalvanised Steel- a mechanistic approach. Part 1: delamination from a defect with intact zinc layer*. 43, 207-227. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00047-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00047-0)
- Xiao-bin LI, Nan LIU, Tian-gui QI, Yi-lin WANG, Qiu-sheng ZHOU, Zhi-hong PENG, Gui-hua LIU. (2015). Transactions of Nonferrous Metals Society of China. *Conversion of ferric oxide to magnetite by hydrothermal reduction in Bayer digestion process*. 25, 3467-3474. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63984-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63984-X)



Desarrollo de nanocompuestos híbridos de ZnO, CuO y SiO₂ para la creación de superficies biocidas e hidrofóbicas en morteros de cemento

M. A. Torres Guzmán ^{1*}, M. Z. Figueroa Torres¹;
M. A. Guerra Cossío¹, J. R. González López¹
*Autor de Contacto: andres.torresg@uanl.edu.mx

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Cuerpo Académico de Materiales Alternativos en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, México.

RESUMEN

Los materiales de cemento portland son susceptibles a metabolitos secundarios ácidos producto de bacterias y hongos capaces de sobrevivir y reproducirse en su superficie. Estos liberan componentes orgánicos volátiles dañinos a la salud de las personas. A este proceso se le conoce como Biodeterioro, y cuando sucede al interior de las edificaciones provoca el Síndrome del edificio enfermo. En esta investigación se estudió el efecto de modificar la superficie de un mortero de cemento con nanocompuestos binarios de ZnO/SiO₂ y ZnO/CuO en el desarrollo de propiedades autodesinfectantes e hidrofóbicas para inhibir el crecimiento de los organismos modelo bacterianos *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*, así como de los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium chrysogenum*. La modificación superficial produjo superficies capaces de inhibir y eliminar bacterias y hongos, además de reducir el ingreso de agua por acción capilar y la permeabilidad del CO₂. Dichos efectos se comprobaron por medio de Microscopía electrónica de barrido y la capacidad cuantitativa de formación de Biopelícula usando cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio. Los nanocompuestos pueden incrementar la durabilidad inhibiendo el crecimiento de las células de los patógenos, así como privándolos del agua necesaria para su metabolismo.

Palabras clave: Biodeterioro; Nanocompuestos; Biopelícula; ZnO; Mortero.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras hechas a partir de cemento portland (CP) son características por su versatilidad, durabilidad y resiliencia. Nos permiten solucionar problemas en la forma de construcciones a la medida que cumplen con los requisitos de uso y funcionalidad, ya que este es un material noble que se adapta a las necesidades de los proyectos con facilidad. Sin embargo, la naturaleza física y química de este, es decir, su porosidad y su afinidad por el agua, lo vuelven un candidato ideal para la colonización por parte de microorganismos, que en su desarrollo pueden generar problemas de deterioro como la disminución de la capacidad portante, así como de convertirse en una fuente constante de componentes orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés), que resultan dañinos para la salud de las personas.

Cuando el origen del daño es producto de la presencia y la actividad metabólica de los microorganismos se le conoce como Biodeterioro (Noeiaghahi et al., 2017). Al darse este fenómeno al interior de las edificaciones da origen a lo que se conoce como el Síndrome del Edificio Enfermo (SBS, por sus siglas en inglés) (Mentese et al., 2020). Este se caracteriza por provocar daños progresivos a la salud de sus habitantes, principalmente por una mala calidad del aire, y en casos severos puede ser fuente de enfermedades como síndromes del sistema respiratorio, dolores de cabeza, fatiga y sarpullidos, entre otros (World Health Organization, 2022).

Para mitigar este problema se han estudiado propuestas innovadoras (Qiu et al., 2020), como el uso de nanopartículas (NP's) para crear materiales que tengan la capacidad de inhibir el crecimiento y desarrollo de microorganismos patógenos, en la forma de incorporaciones en la mezcla o como tratamientos superficiales (Kirthika et al., 2023). Destacan las NP's de TiO_2 y Ag por su alta efectividad, aunque existen muchas otras como el ZnO, MgO, CuO, entre otras. Si bien el efecto fotocatalítico fuerte del TiO_2 es lo que le da parte de su alta efectividad, en interiores, donde existe una cantidad sustancialmente menor de radiación UV natural estas resultan poco efectivas, mientras que las NP's de Ag conllevan un costo mayor, lo que dificulta su adopción masiva.

Por otra parte, las NP's de ZnO son una opción que ha mostrado efectividad en el combate contra variedades comunes de microorganismos, como bacterias y hongos, que se encuentran en el medio ambiente y tienden a acumularse en interiores. Mas aún, se ha demostrado que la combinación de diferentes óxidos metálicos nanométricos ofrece efectividad de amplio espectro, en función de parámetros como la composición química, tamaño y forma de las NP's (Dulski et al., 2020; Klienchen de Maria et al., 2024). Derivado de esto se realizó el estudio de la combinación de NP's de ZnO como componente mayoritario en la creación de compositos binarios adicionados con CuO y SiO_2 , con la finalidad de crear superficies hidrofóbicas y biocidas, que puedan inhibir pasivamente el desarrollo de patógenos y permitir su remoción por medio de la propiedad de autolavado, que además presenta la ventaja de privar a estos de uno de los componentes esenciales para llevar a cabo correctamente su metabolismo.

El desarrollo de estos nanocompuestos permitiría su aplicación por medio de la técnica de aerosol directamente sobre la superficie de mortero de cemento portland, donde se lleva a cabo principalmente el biodeterioro, permitiendo así intervenir estructuras *in-situ* de forma sencilla y segura tanto nuevas como existentes.



2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La superficie del material es la zona que se encuentra directamente expuesta a la colonización por parte de los microorganismos. Los más comunes son los hongos y las bacterias. Los primeros en llegar son los que pueden fijar el carbono orgánico sobre la superficie, y que sirve de nutriente para subsiguientes especies. Una vez estos se asientan sobre una misma zona, comienza a desarrollarse una Biopelícula, que sirve de protección y como medio de desarrollo seguro para la proliferación de estos. En este punto la rehabilitación del material se dificulta enormemente, debido a la resiliencia de la biopelícula, parte de los microorganismos son capaces de sobrevivir y fijarse fuertemente a la porosidad del material.

La incorporación en la mezcla no es ideal, ya que el ZnO retrasa las etapas tempranas del proceso de hidratación, mientras que el CuO puede acelerarlas, además de que se requiere más nanomaterial para cubrir toda la matriz, dificultando su incorporación y dispersión. Entonces son más convenientes tratamientos superficiales que directamente prevenga el crecimiento y desarrollo de los patógenos. Las NP's de ZnO tienen la característica de que pueden atacar la estructura celular de estos aún en condiciones de poca luz, así como el CuO nanométrico, pueden inhibir el crecimiento de ciertas especies por medio de la liberación de iones metálicos, que intervienen la pared celular e interrumpen su metabolismo. Mientras que el SiO₂ no presenta mecanismos biocidas, es capaz de desarrollar propiedades hidrofóbicas cuando se coloca sobre la superficie, característica que comparte con el ZnO, creando así una estructura estable y efectiva frente al desarrollo de estos microorganismos dañinos.

3. JUSTIFICACIÓN

El composito puede colocarse de forma permanente sobre la superficie del material, por lo que su efecto activo puede ser duradero y eficaz en escalas de tiempo acordes con el fenómeno del SBS. Además de servir como agente regulador del ingreso de agua y gases, que pueden acelerar la carbonatación y, por ende, la disminución del pH que inicialmente provee de la protección al biodeterioro.

Este efecto puede ayudar a disminuir los síntomas del SBS, que están asociados a enfermedades como las micosis pulmonares (Amado González Mendoza, 1962), provocadas por especies de hongos comunes como las del género *Aspergillus*, mientras que bacterias como *S. aureus* han desarrollado resistencia a los antibióticos como la meticilina, dificultando su tratamiento debido a la facilidad con la que se transportan y se encuentran en el medio ambiente (Rodríguez-Pineda et al., 2016).

El uso de los nanomateriales también ayudaría a disminuir la necesidad de utilizar agentes químicos de remediación como antisépticos, antifúngicos, desinfectantes, entre otros, evitando la generación de residuos que requieren posteriores tratamientos para su desecho seguro. En comparación con el TiO₂ y Ag, se pueden desarrollar compositos a base de ZnO con un espectro de efectividad mayor frente a una variedad de microorganismos, a un costo menor que además sea altamente efectivo en interiores, donde prevalecen condiciones de poca ventilación y humedad idóneos para el biodeterioro.

4. HIPÓTESIS

La aplicación de un recubrimiento nanoestructurado de ZnO con CuO y SiO₂ como nanocompuestos binarios sobre la superficie de un mortero de cemento portland desarrollará propiedades biocidas e hidrofóbicas para inhibir el crecimiento de hongos y bacterias y disminuirá la permeabilidad evitando el biodeterioro e incrementado su resistencia al agua y a la carbonatación con mayor efectividad que el ZnO por sí solo en condiciones de poca luz.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Desarrollar un recubrimiento híbrido de nanocompuestos de ZnO, CuO y SiO₂ aplicable mediante la técnica de aerosol en morteros base cemento portland para la creación de superficies hidrofóbicas de baja permeabilidad y biocidas frente a los microorganismos responsables del SBS.

5.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los materiales de partida mediante Fluorescencia de rayos-X (FRX), Difracción de rayos-X (DRX) y Microscopía electrónica de barrido (SEM), para conocer sus características fundamentales y relacionarlas con su efectividad una vez aplicadas como recubrimiento.
2. Evaluar la actividad antimicrobiana de los óxidos individuales ZnO, CuO y SiO₂ y compararla con los nanocompuestos binarios ZnO-CuO, ZnO-SiO₂ mediante el método Kirby-Bauer para seleccionar las combinaciones que inhiban el crecimiento de las bacterias y hongos con mayor efectividad.
3. Establecer las condiciones experimentales para depositar los óxidos en la superficie del mortero de cemento mediante la técnica de aerosol relacionando la cantidad de material depositado con el tiempo de depósito y número de capas que produzcan una respuesta inhibitoria efectiva.
4. Relacionar las características microestructurales del recubrimiento sobre el mortero de cemento con su efectividad para inhibir el crecimiento de las bacterias *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* y los hongos *Aspergillus niger* y *Penicillium chrysogenum* mediante el método Kirby-Bauer y formación de biopelícula.
5. Evaluar el efecto de la presencia del recubrimiento en la resistencia al agua y el grado de carbonatación del mortero mediante pruebas estandarizadas por la ASTM y UNE.

6. ANTECEDENTES

6.1 Cemento Portland

El uso del CP como recubrimiento se realiza en la forma de mortero, es decir, una mezcla de agregados finos, cemento y agua. Se establecen niveles mínimos de diferentes contaminantes que se pueden encontrar en los materiales de mezcla, y se ha mostrado que concentraciones tan bajas como 1% de Materia orgánica son suficientes para el desarrollo de microorganismos como hongos (Jiang et al., 2022). Esto aunado a la naturaleza hidrofílica del mortero da lugar a que se encuentren presentes los nutrientes mínimos necesarios para el desarrollo y el agua, una vez el pH es lo suficientemente bajo.



6.2 Biodeterioro en estructuras de cemento portland

Algunas especies bacterianas de los géneros *Bacillus*, *Clostridium* y *Desulfotomaculum* son capaces de generar endosporas, que les permiten permanecer inactivos hasta que las condiciones de temperatura y humedad son las adecuadas para comenzar su desarrollo. Al iniciar su metabolismo son capaces de fijar nutrientes como el carbono orgánico, degradando la matriz cementada a través de la excreción de diferentes ácidos y toxinas, que transforman el medio y convierten los componentes del mortero en nutrientes orgánicos disponibles para los patógenos.

6.3 Nanomateriales biocidas como posible solución

La efectividad de las NP's de óxidos metálicos para inhibir el desarrollo depende de tres factores principales: Composición química, forma y tamaño. Tamaños menores presentan mayor efectividad, siendo este el concepto más importante provisto que el compuesto presente alguno de los mecanismos de interacción con el patógeno: Estrés oxidativo por formación de especies reactivas de oxígeno (ERO), daño en pared-membrana celular por interacción electrostática y acumulación, pérdida de homeóstasis por iones metálicos, etc. En el caso de los óxidos metálicos se presentan los antes mencionados, principalmente la pérdida de homeóstasis y la acumulación en pared-membrana de iones.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se dividió en cuatro etapas principales:

- **Etapa I.** – Se caracterizaron los materiales de partida (Arena caliza #4, Cemento portland marca Cemex CPC 30R) para verificar el cumplimiento de las normas para la fabricación de especímenes de mortero, así como los nanomateriales para verificar la pureza. Para los microorganismos se utilizaron las cepas de la American Type Culture Collection (ATCC): Bacterias, *Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers (ATCC 11229) y *Staphylococcus aureus* subsp. *aureus* Rosenbach (ATCC 29737); Hongos, *Aspergillus niger* van Tieghem (ATCC 6275) y *Penicillium chrysogenum* Thom (ATCC 10106).
- **Etapa II.** - Se fabricaron los nanocompuestos en sus formas binarias de acuerdo con la hipótesis, y se caracterizaron para definir las propiedades de interés y la composición.
- **Etapa III.** – Se realizaron los ensayos sobre los materiales de base CP. Se fabricaron especímenes de mortero adaptados para las diferentes pruebas (Cilindros, cubos y ortopedros). Para los ensayos físicos se estudiaron sus propiedades mecánicas de acuerdo con la normativa ASTM C1403-15 (American Society for Testing and Materials, 2022) y BS EN 13295:2004 (European Committee for Standardization, 2004). Los nanocompuestos se dispersaron en suspensiones de base alcohol isopropílico utilizando ultrasonido por una hora.
- **Etapa IV.** – Se evaluó el desempeño del material modificado en pruebas características que cuantifican su durabilidad, divididas en el aspecto físico-mecánico y biológico. Para los ensayos biológicos se realizaron las pruebas de halos de crecimiento (Especímenes cilíndricos) y formación de biopelícula (Especímenes cúbicos), por medio de procedimientos experimentales adaptados a los tipos y dimensiones de los especímenes fabricados. Para los ensayos físicos se llevaron a cabo las pruebas de rutina para determinar la resistencia a la carbonatación y la absorción de agua.

8. RESULTADOS

8.1 Materia prima

Para el cemento se obtuvieron los siguientes:

Tabla 1. Análisis FRX de la muestra de cemento portland CPC 30R.

Compuesto	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cantidad	3.73	2.33	0.48	4.13	74.29	12.92	2.33	0.56	1.01
Unidad	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Porcentajes máximos ASTM C-150 – Tabla 1	II (A, MH, MH-A)	6.0%	6.0%	6.0%	N/A	-	-	-	-
	III y IIIA	N/A	N/A	6.0	4.5	-	-	-	-

De acuerdo con la Tabla 1, el cemento cumple con los requisitos de la norma ASTM C150 (American Society for Testing and Materials, 2012b) para cementos tipo II y III en cuanto a los porcentajes máximos de Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y SO₃, entonces se utilizó para fabricar los especímenes cilíndricos y cúbicos para morteros tipo S de 14.5 MPa a 28 días de acuerdo con la norma ASTM C-1329 (American Society for Testing and Materials, 2012a), así como los especímenes requeridos por la norma ASTM C-109 (American Society for Testing and Materials, 2020) para evaluar la resistencia a la compresión.

En cuanto al análisis de DRX de la muestra de cemento, en la Figura 1 se observan las fases esperadas para un cemento tipo “Compuesto” de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2017), a saber: Alita (Ca₃SiO₅), Belita (Ca₂SiO₄), Aluminato tricálcico (Ca₃AlO₆) y Ferrita (Ca₂AlFeO₅). Los patrones de la figura 1 permiten identificar las fases principales que contiene la muestra de cemento, y de acuerdo con los valores máximos establecidos por la tabla 1, tanto los tipos como los valores presentes de estas se encuentran dentro de los rangos permisibles. Se observan los picos más característicos en 20° (Yeso), 29° (Alita), 32° (Alita, Belita), 33° (Celita), 35° (Cal), entre otros menores en los rangos de 34 a 63 grados.

De la Figura 2 se desprende del análisis DRX que para las NP's de ZnO los picos característicos a 31, 34, 36, 47, 56, 62, 66, 67, 69, 76 y 89 ° corresponden a los planos cristalográficos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) y (202) respectivamente. Para las NP's de CuO los picos característicos a 32, 35, 38, 48, 53, 58, 61, 65, 66 y 68° corresponden a los planos cristalográficos (110), (111), (111), (202), (020), (202), (113), (022), (311), (220), respectivamente. Para las NP's de SiO₂ se tiene una característica amorfa según se ve en el patrón alrededor de los 20 y 30 grados.

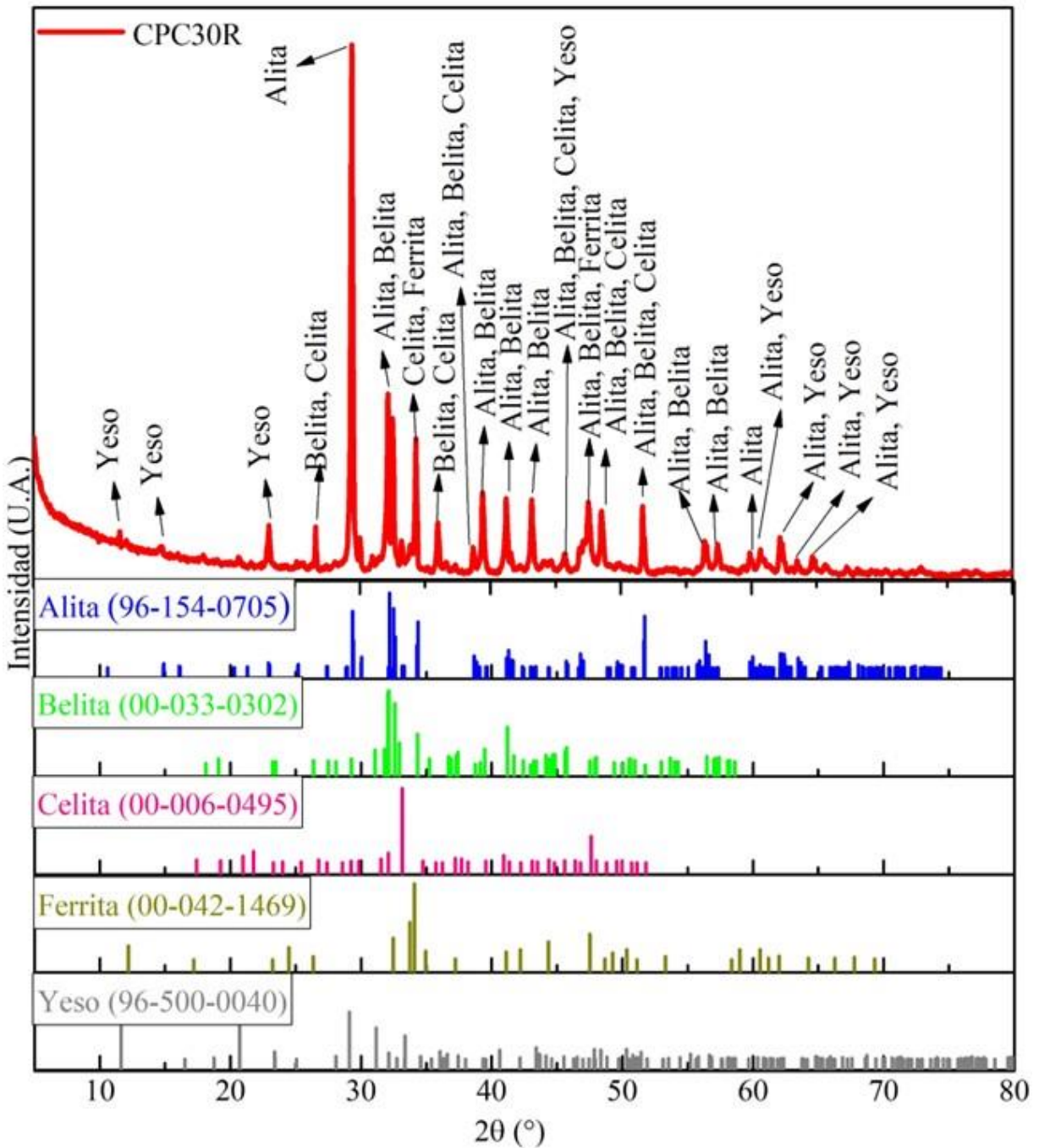


Figura 1. Análisis DRX de la muestra de cemento portland P30R con patrones utilizados de la base de datos COD 2021 y PDF-2 2000.

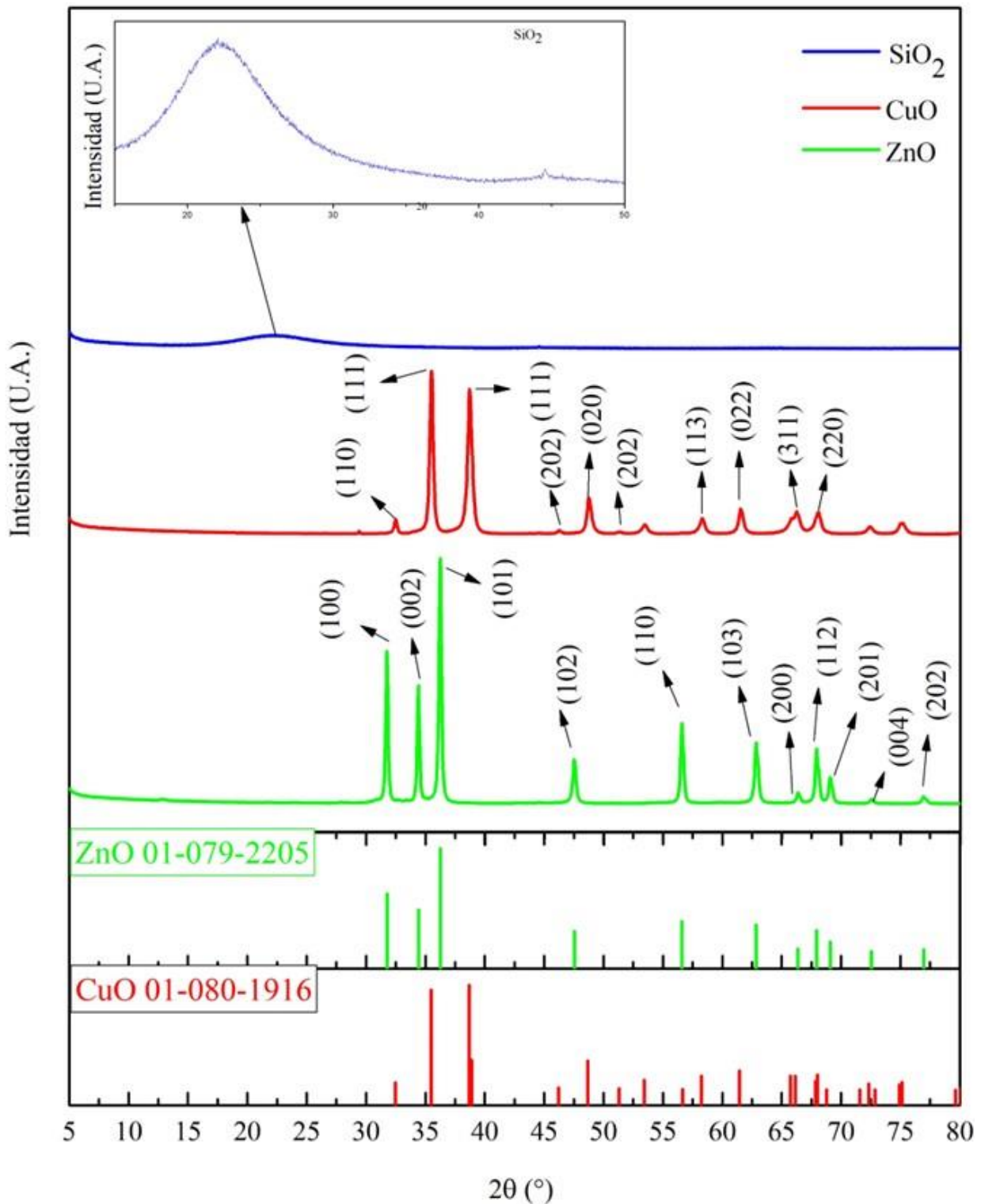


Figura 2. Análisis DRX de las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), dióxido de silicio (SiO₂) y óxido de cobre (CuO) y sus patrones correspondientes. Nótese el carácter amorfo del SiO₂.

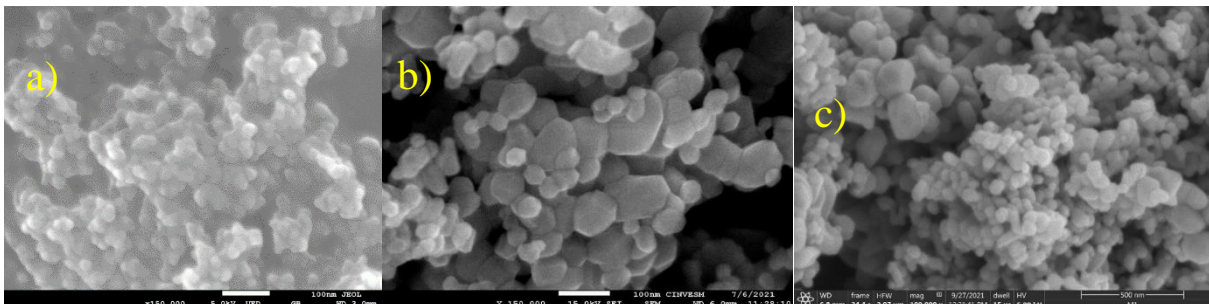


Figura 3. Micrografías SEM de las nanopartículas utilizadas. a) SiO_2 , b) ZnO , c) CuO .

En cuanto a los tamaños y formas de las NP's, se observa en la Figura 3 que todas tienen forma esférica y sus tamaños promedio son de 10-30 nm para el ZnO , 40 nm para el CuO y 15-20 nm para el SiO_2 . En el caso del CuO el fabricante reporta que hasta el 2% de partículas pueden alcanzar hasta 80 nm y el 20% pueden tener tamaños mayores o menores al promedio ($\pm 10\%$)

Las variaciones de tamaño son aceptables, si bien se desea uniformidad en el material, la variación de tamaños puede ser benéfica para lograr una mayor mezcla y difusión de los diferentes iones una vez colocado sobre el mortero y durante la interacción con los microorganismos.

8.2 Preparación de los nanocompuestos

Se fabricaron las combinaciones de NP's para la evaluación del rendimiento de acuerdo con la Tabla 2:

Tabla 2. Proporciones de los nanocompuestos fabricados para las pruebas de análisis de la actividad antimicrobiana de los nanocompuestos.

Materiales	Etiqueta	Proporción
ZnO	Z	100%
$\text{ZnO} + \text{SiO}_2$	ZS	80% - 20%
$\text{ZnO} + \text{CuO}$	ZC	80% - 20%

Se realizó el análisis DRX de los nanocompuestos para verificar su composición y cristalinidad, obteniendo la gráfica de la Figura 4:

Se observan los picos característicos de S y C aún reflejados en los nanocompuestos. Para el ZS se observa la ausencia de los picos en 31, 38, 48, 58, 61 y 75° pertenecientes al C, y a su vez estos se pueden observar en función de la intensidad en el resto de los composites. Esto aunado a lo observado por las micrografías de los nanocompuestos permite comprobar su correcta fabricación.

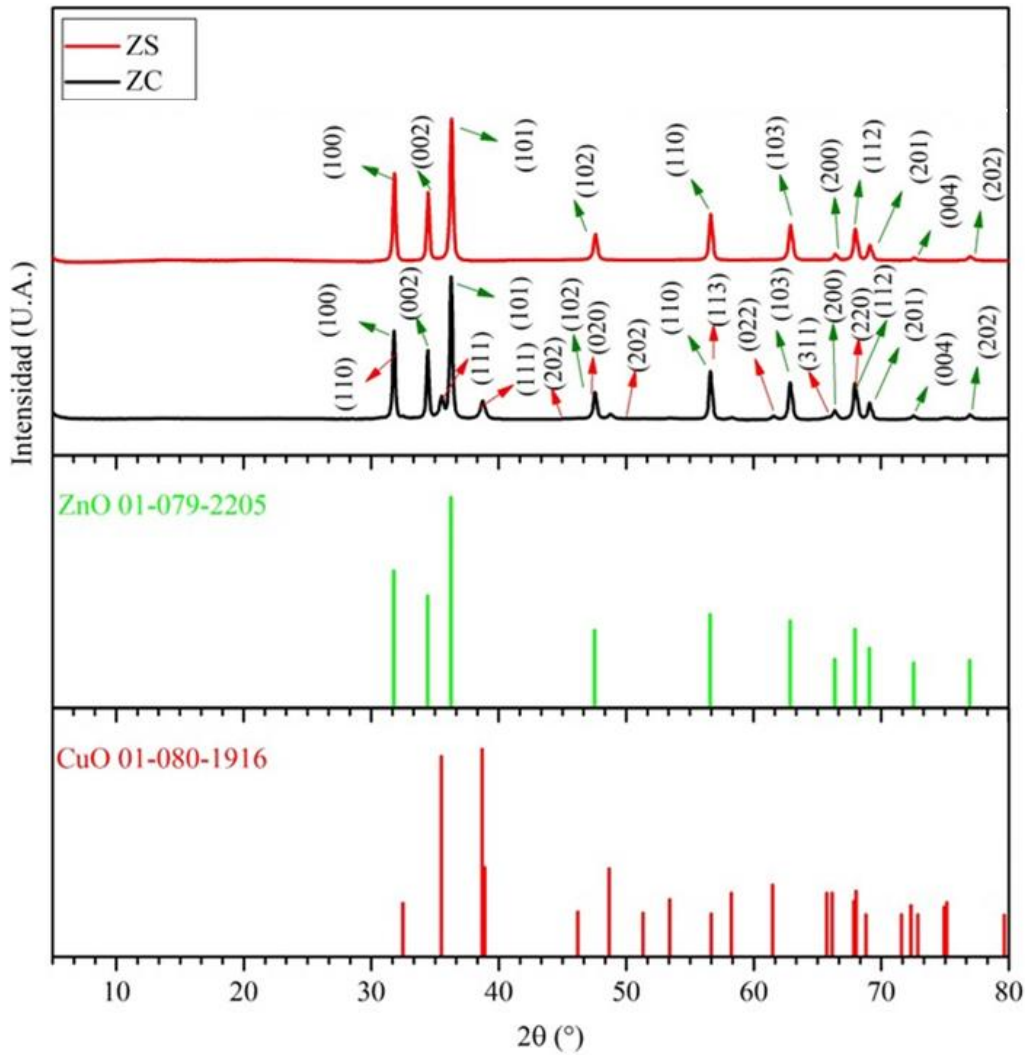


Figura 4. Análisis DRX de los nanocompuestos ZS y ZC con patrones utilizados de la base de datos COD 2021 y PDF-2 2000.

8.3 Modificación superficial del mortero

Se realizó la aplicación de las suspensiones por medio de un nanoaerosol de acuerdo con el arreglo de la Figura 5:

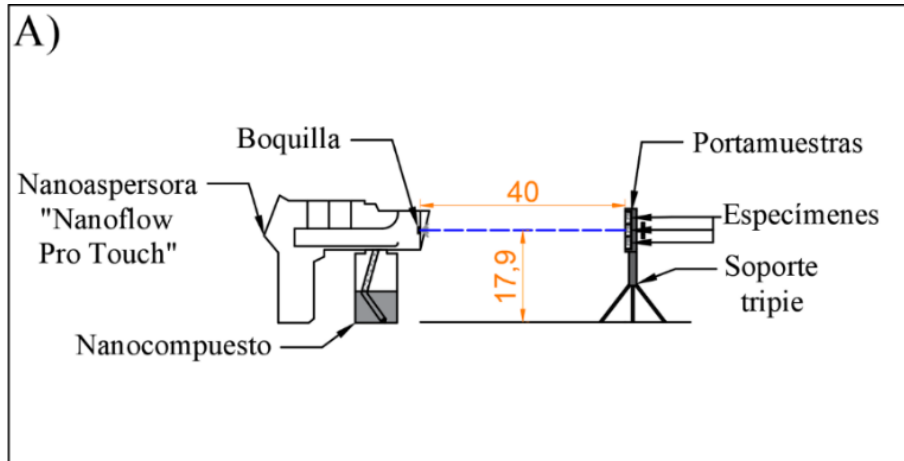


Figura 5. Esquema del arreglo de aspersión y depósito de los nanocompuestos. Cotas en centímetros.

El aspecto más relevante durante la aplicación es la saturación inmediata de la cara expuesta, así como la perpendicularidad en la dirección de la aplicación, para garantizar un depósito uniforme. En seguida para medir el grado de hidrofobicidad se realizó un análisis de ángulo de contacto, obteniendo los valores de la figura 6:

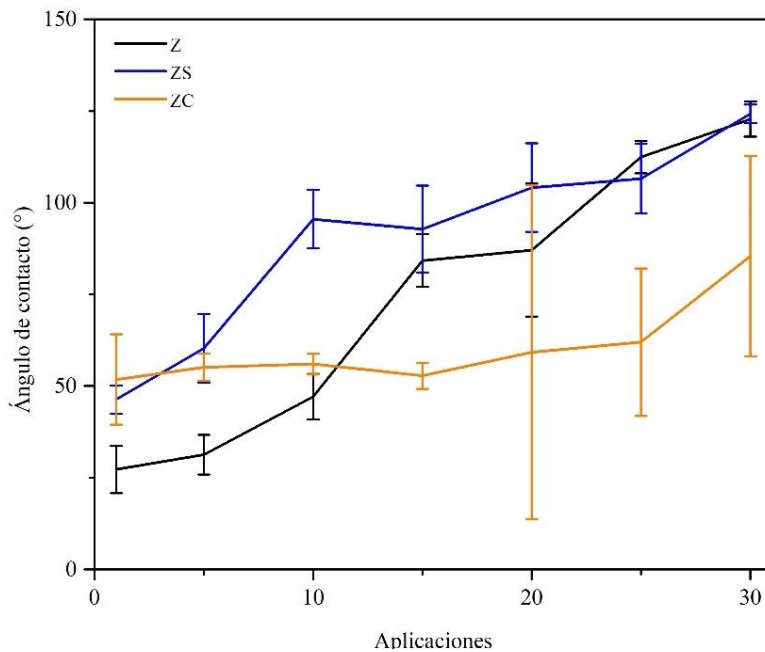


Figura 6. Ángulo de contacto sobre especímenes modificados con los nanocompuestos.

Se confirman las capacidades hidrofóbicas de los nanocompuestos Z y ZS, para el ZC se observó un incremento sustancial a las treinta aplicaciones. En general, se observan valores grandes de desviación estándar particularmente al alcanzar las veinte aplicaciones y al llegar a treinta, pero en todos los casos se logró mantener un grado de hidrofobicidad efectivo.

8.4 Durabilidad

Para los ensayos de durabilidad se realizaron las pruebas de Halos de crecimiento, Biopelícula, Absorción de agua y Resistencia a la carbonatación. En la figura 7 se observan los resultados para la prueba de Halos de Crecimiento para todos los organismos:

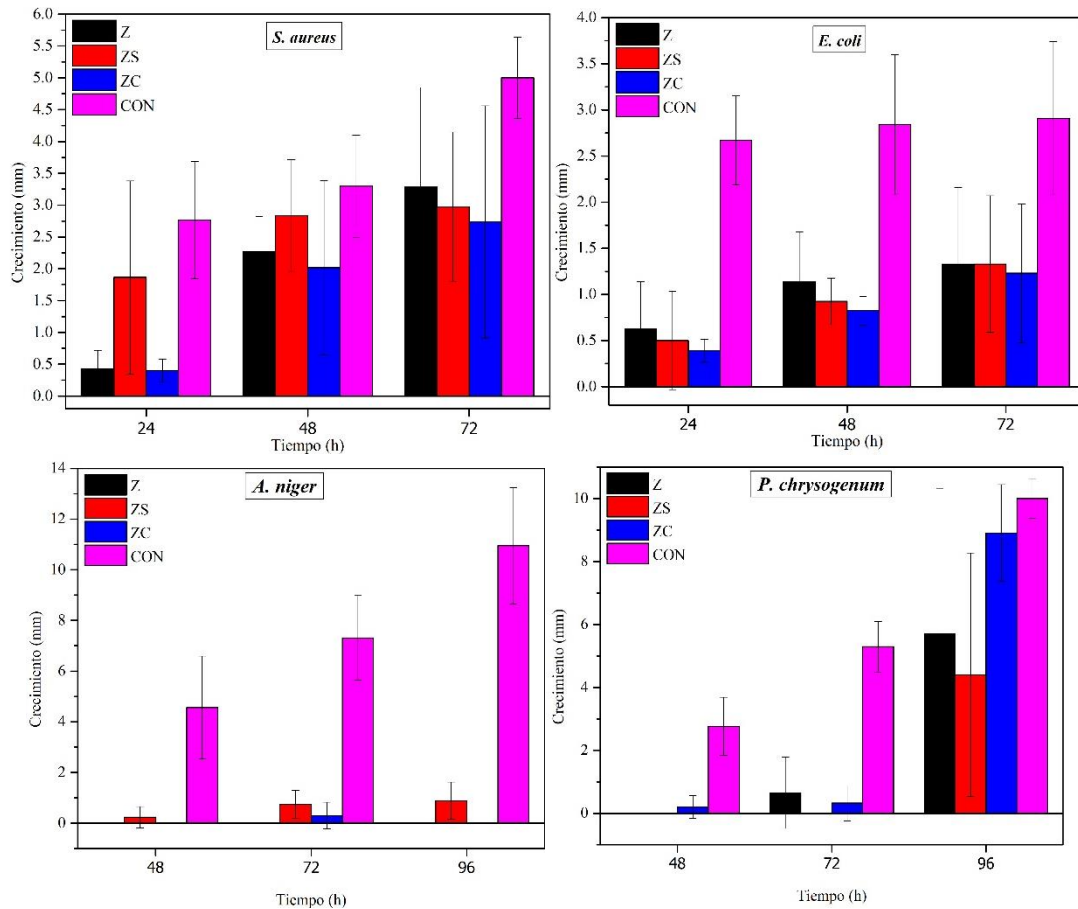


Figura 7. Crecimiento promedio de los halos: Bacterias sup., Hongos inf.

En la prueba de Halos de crecimiento valores menores son preferibles. En las bacterias la efectividad combinada del ZC en comparación con el Z representa una gran ventaja ya que en un mismo material se logró inhibir en medida similar al Z por sí solo. Una ventaja similar se puede apreciar para el compuesto ZS, aunque resulta más beneficioso a largo plazo para combatir los hongos, debido a que la mayor hidrofobicidad puede reducir su capacidad de transportar agua y otros compuestos solubles en esta a través del micelio.

Para la prueba de Biopelícula se tienen los resultados de la figura 8:

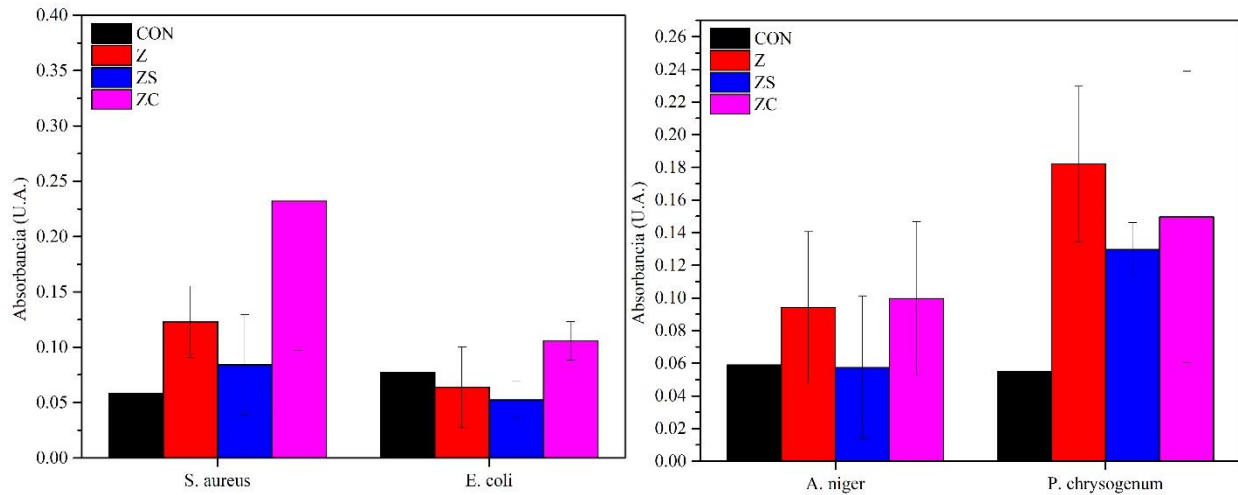


Figura 8. – Absorbancia media de la formación de biopelícula sobre especímenes de mortero.

Para la prueba de Biopelícula las mediciones se realizan por medio de espectrofotómetro, por lo que valores menores indican una menor presencia de microorganismos adheridos al material capaces de formar la biopelícula. Se observa claramente que el compuesto ZS tiene mayor capacidad para inhibir la adherencia por medio de la propiedad hidrofóbica. En este tipo de prueba es la propiedad mas deseada, sin embargo, la presencia del C también puede ser benéfica contra Hongos y *E. coli*.

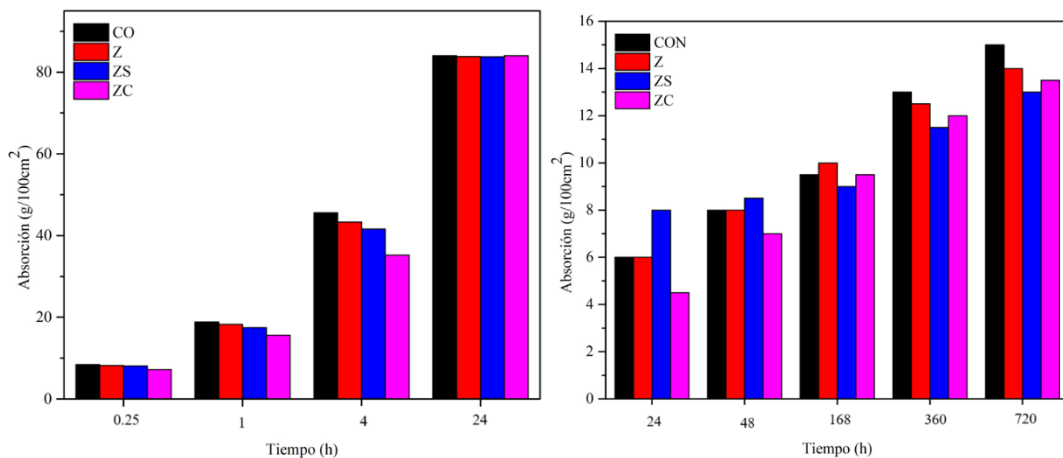


Figura 9. – Prueba de absorción de agua (Izq.) y Resistencia a la carbonatación (Der.).

En la figura 9 se puede observar que las muestras de control presentaron el comportamiento más desfavorable en comparación con el tratamiento base de Z, y los compositos mostraron mejores en la disminución de la absorción de agua (ZC) y en el frente de carbonatación (ZS).

En la Figura 10 se puede observar disminución del volumen de las células y la ruptura de las septas de los hongos adheridos al mortero. En todos los casos hubo disminución en la densidad de células.

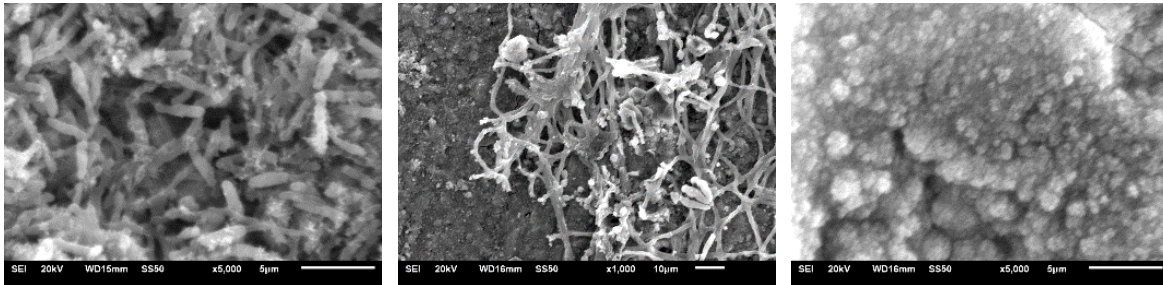


Figura 10. *E. coli* con Z (Izq.), *P. chrysogenum* con ZS, *S. aureus* con ZC (Der.).

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden concluir los siguientes puntos:

- Los composites mostraron rendimientos superiores al tratamiento con NP's de ZnO, por lo que su uso es preferente para lograr una mayor eficacia biocida y autolavable a largo plazo.
- El método de depósito es efectivo y puede llevarse a cabo *in-situ*. El material tiende a aglomerarse en las porosidades, pero es preferible una colocación más homogénea.
- Las NP's proporcionaron los efectos deseados correspondientes con sus características morfológicas. Las proporciones tienen una influencia directa en sus propiedades finales.

10. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico y al Instituto de Ingeniería Civil “Dr. Raymundo Rivera Villareal” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el uso de sus instalaciones para este proyecto.

11. REFERENCIAS

- Amado González Mendoza. (1962, February 1). *Micosis pulmonares*. Revista de La Facultad de Medicina, 95–102.
- American Society for Testing and Materials. (2012a, May 21). *ASTM C1329-05 Standard Specification for Mortar Cement*. ASTM Volume 04.01: Cement; Lime; Gypsum.
- American Society for Testing and Materials. (2012b, December 20). *ASTM C150-07 Standard Specification for Portland Cement*. ASTM Volume 04.01: Cement; Lime; Gypsum.
- American Society for Testing and Materials. (2020, March 12). *ASTM C109/C109M-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM Volume 04.01: Cement; Lime; Gypsum.
- American Society for Testing and Materials. (2022, August 12). *ASTM C1403-15 Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. ASTM Volume 04.05: Chemical-Resistant Nonmetallic Materials; Vitrified Clay Pipe; Concrete Pipe; Fiber-Reinforced Cement Products; Mortars and Grouts; Masonry; Precast Concrete.
- Dulski, M., Dudek, K., Podwórny, J., Sułowicz, S., Piotrowska-Seget, Z., Malarz, K., Mrozek-Wilczkiewicz, A., Wolnica, K., Matus, K., Peszke, J., & Nowak, A. (2020). *Impact of temperature on the physicochemical, structural and biological features of copper-silica nanocomposites*. Materials Science and Engineering: C, 107, 110274. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110274>

European Committee for Standardization. (2004, July 12). *BS EN 13295:2004 Products and systems for the protection and repair of concrete structures*. Test methods. Determination of resistance to carbonation.

Jiang, L., Pettitt, T. R., Buenfeld, N., & Smith, S. R. (2022). *A critical review of the physiological, ecological, physical and chemical factors influencing the microbial degradation of concrete by fungi*. *Building and Environment*, 214, 108925. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108925>

Kirthika, S. K., Goel, G., Matthews, A., & Goel, S. (2023). *Review of the untapped potentials of antimicrobial materials in the construction sector*. *Progress in Materials Science*, 133, 101065. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101065>

Klienchen de Maria, V. P., Guedes de Paiva, F. F., Tamashiro, J. R., Silva, L. H. P., da Silva Pinho, G., Rubio-Marcos, F., & Kinoshita, A. (2024). *Advances in ZnO nanoparticles in building material: Antimicrobial and photocatalytic applications – Systematic literature review*. *Construction and Building Materials*, 417, 135337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135337>

Mentese, S., Mirici, N. A., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., Bakar, C., Oymak, S., & Otkun, M. T. (2020). *A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators*. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2270–2281. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>

Noeiaghahi, T., Mukherjee, A., Dhimi, N., & Chae, S.-R. (2017). *Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies*. *Construction and Building Materials*, 149, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.144>

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2017, November 13). *NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*.

Qiu, L., Dong, S., Ashour, A., & Han, B. (2020). *Antimicrobial concrete for smart and durable infrastructures: A review*. *Construction and Building Materials*, 260, 120456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120456>

Rodríguez-Pineda, J., Terrazas-Estrada, J. J., Urdez-Hernández, E., Hernández-Sánchez, E. A., & Sánchez-Tejeda, S. L. (2016). *[Methicillin resistance and vancomycin susceptibility pattern among blood isolates of Staphylococcus aureus]*. *Revista Medica Del Instituto Mexicano Del Seguro Social*, 54(1), 48–51.

World Health Organization. (2022, December 2). *Global report on health equity for persons with disabilities*.



Efecto del óxido de grafeno en las propiedades de durabilidad del concreto

J. A. Cabello Méndez ^{1*}, J. T. Pérez Quiroz¹, A. López Miguel¹,
I. C. Castillo Arteaga^{1,2}, A. Moreno Valdes ¹

*Autor de Contacto: antonio.cabello@imt.mx

¹ Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

² Instituto Tecnológico Superior De Uruapan, Uruapan, Michoacán, México.

RESUMEN

El problema de la degradación de las estructuras de concreto se debe principalmente al proceso de corrosión, este fenómeno ocasiona pérdidas económicas por mantenimiento, contaminación y afectaciones a la integridad humana. En búsqueda de materiales que puedan brindar una mayor protección al acero de refuerzo, en este trabajo se propone el uso de recubrimientos base magnetita; material con altas prestaciones como: buena eficiencia anticorrosiva y excelente adherencia. La formación de los recubrimientos base magnetita se obtuvieron mediante pulso potenciostático a 2V en tiempos de 10 y 15 días sobre las varillas con diferente preparación superficial: comercial, limpieza electroquímica, oxidada en cámara de niebla salina y expuesta a la intemperie. Todas las muestras fueron evaluadas utilizando un electrolito que simula las condiciones de pH del concreto. Se determinó por DRX la presencia de magnetita preferencialmente. Adicionalmente los resultados electroquímicos demostraron que la magnetita obtenida bajo estas condiciones le confiere al acero de refuerzo una mayor resistencia a la degradación con una velocidad de corrosión de 0.0013 mm/año, ampliando el tiempo de vida útil del concreto armado.

Palabras clave: Óxido de grafeno; Durabilidad; Aditivo; Concreto.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material cerámico poroso que puede ser definido como un material con una alta resistencia mecánica, buenas condiciones de aplicación y alta durabilidad, siempre que se apliquen buenas prácticas de fabricación (Marvila et al., 2021). Es el material de construcción más ampliamente utilizado, debido a su alta resistencia mecánica, facilidad de aplicación, alta durabilidad y a que es relativamente económico (Marvila et al., 2021; Solís Carcaño & Alcocer Fraga, 2019). Las estructuras de concreto sufren de un deterioro gradual al exponerse al ambiente. Las fallas en el concreto pueden ser causadas por factores relacionados a imperfecciones en el diseño de las estructuras, mala selección de materiales y al factor humano en la preparación del concreto. Estas fallas son la causa del deterioro de las propiedades del material por acciones físicas, mecánicas, químicas, biológicas o el deterioro del acero de refuerzo. Esta problemática está directamente relacionada a la disminución de la capacidad que tiene el concreto para resistir las condiciones del medio que lo rodea.

La durabilidad en el concreto es la capacidad del material para resistir los efectos del medio ambiente, ataques químicos, daños físicos, abrasión o cualquier otro proceso que genere un deterioro del estado inicial de las estructuras de concreto (Tang et al., 2015). Este deterioro puede ser causado por factores relacionados con imperfecciones en el diseño de la estructura, mala selección de materiales y al factor humano en la preparación del concreto. Estos factores provocan problemas mecánicos, físicos y químicos en la infraestructura de concreto. Los ambientes agresivos para el concreto se caracterizan por la presencia de cloruros capaces de favorecer la corrosión, dióxido de carbono que reacciona con los productos alcalinos de cemento para producir carbonatación y provocar la depasivación del acero de refuerzo, iones sulfatos que provocan un aumento en el volumen de la estructura y disminución de la cohesión del cemento. Los principales problemas de durabilidad del concreto son la reacción álcali-agregado, ataque de sulfatos, corrosión del acero, flujo de líquidos o gases al interior del concreto y el congelamiento-descongelamiento, estos problemas se describen a continuación (Tang et al., 2015).

Para mejorar las propiedades de durabilidad del concreto se han desarrollado aditivos a base de materiales inertes o reactivos. Estos aditivos mejoran la resistencia del concreto al medio ambiente y alargan su vida útil. Diferentes nanopartículas han sido estudiadas como aditivos en concreto, algunas de estas son SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaCO (Reches, 2018). Actualmente existe una controversia sobre los efectos de las nanopartículas, ya que existen trabajos donde estas afectan las propiedades del concreto (Aggarwal et al., 2015) y otros casos donde las nanopartículas representan mejoras considerables en las propiedades mecánicas de los productos de concreto (Sanchez & Sobolev, 2010). Además de las nanopartículas antes mencionadas, el óxido de grafeno ha sido investigado como un aditivo.

El óxido de grafeno es un material estudiado ampliamente en años recientes para diversas aplicaciones. Para la elaboración de compósitos con concreto, el óxido de grafeno presenta varias ventajas como la formación de grupos funcionales de oxígeno debido a una alta reactividad con el cemento, ligereza, fuerza e impermeabilidad. Además de que esta reportado que el óxido de grafeno puede mejorar las propiedades mecánicas del material. En particular, para el óxido de grafeno como aditivo en concreto se han reportado ciertos beneficios, aunque estos tienen ciertas limitaciones y su alcance aún está en discusión.



2. METODOLOGÍA

2.1 Preparación de ítems

Se utilizó un cemento tipo portland compuesto clase resistente 30 de resistencia rápida (CPC- 30 R), este cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la Norma Mexicana del Cemento NMX-C-414-ONNCCE (Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017). Se utilizó óxido de grafeno marca Graphenemex, en presentación en polvo. Los ítems fueron preparados utilizando moldes para concreto de 10 x 20 cm, como se muestra en la Figura 2.1. La concentración de óxido de grafeno fue 0.03%, 0.06% y 0.09% en peso de cemento, con una relación agua/cemento de 0.7, este estudio fue realizado en un concreto de pobre calidad para evaluar el grado en que el óxido de grafeno puede afectar o mejorar las condiciones de un concreto en estado crítico. El óxido de grafeno fue agregado en suspensión acuosa. Posterior a su preparación, los cilindros de concreto fueron curados en agua con hidróxido de calcio durante 28 días.

2.2 Ensayos de durabilidad

2.2.1 Porosidad total

Las probetas de concreto fueron cortadas en ítems de 4 x 10 cm. Estos fueron secados a 105 °C ($W_{105^{\circ}\text{C}}$) hasta llegar a peso constante. Los ítems secos fueron sumergidos en agua hasta obtener un peso constante saturado (W_{Saturado}). Posteriormente fueron hervidos durante 5 horas y dejados en reposo hasta llegar a 20-25 °C (W_{Hervido}). Los ítems saturados y hervidos fueron pesados en una balanza hidrostática para obtener su peso sumergido ($W_{\text{Sumergido}}$). El porcentaje de porosidad total o volumen de espacio poroso permeable fue calculado con la siguiente ecuación (ASTM International C642 – 21, 2021; Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura), 1998):

$$\% \text{Porosidad Total} = \frac{W_{\text{Saturado}} - W_{105^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{Saturado}} - W_{\text{Sumergido}}} * 100 \quad (1)$$

2.2.2 Absorción Capilar

Las probetas de concreto fueron cortadas en ítems de 4 x 10 cm. Se les realizó un pre-acondicionamiento en mufla a 50 °C, hasta llegar a peso constante, posteriormente fueron enfriadas en desecador. La superficie lateral de los ítems fue cubierta con cera y su altura fue medida usando un vernier, tomando al menos cuatro puntos y realizando un promedio. Las muestras selladas lateralmente se pesaron para obtener su peso inicial. Los ítems fueron colocados en un recipiente de fondo plano, sobre una rejilla soporte que separa los ítems del fondo del recipiente, se agregaron 3 mm de agua, por encima del nivel superior de la reja soporte. A partir de ese momento, se midió el tiempo de exposición al agua y los ítems fueron pesados a diferentes tiempos. Los tiempos en que fue evaluado el peso de los ítems son 60 s, 5 min, 10 min, 20 min, 1 h, cada hora hasta llegar a 5 horas y una vez al día hasta el día 5.

La absorción (I) es el cambio de la masa con respecto al tiempo (m_t), dividido por el producto de la densidad del agua (ρ) y el área del espécimen (A). Se calculó con la siguiente ecuación (ASTM International C1585 – 20, 2020):



$$I = \frac{m_t}{A \cdot p} \quad (2)$$

2.2.3 Resistividad

La medición de resistividad se realizó colocando en posición vertical el ítem de concreto, posteriormente se colocó un paño húmedo y una placa de cobre en cada cara del cilindro. El electrodo de cobre se conecta al sistema de medición de resistividad. Las mediciones se realizaron en ítems de concreto saturados a 7, 14, 21 y 28 días de curado. La resistividad eléctrica (ρ) está dada por (ASTM International G57 – 20, 2020):

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3)$$

Donde, ρ es la resistividad eléctrica en $\Omega \cdot \text{cm}$, R es la resistencia eléctrica en Ω , A es el área transversal del ítem, en cm^2 , y L es la longitud del cilindro de concreto en cm.

2.2.4 Velocidad de pulso ultrasónico

La medición se realizó colocando en horizontal los cilindros de concreto. Los transductores fueron colocados en cada cara del ítem, previo a esto, se agregó agente de acople a los transductores (gel), estos fueron presionados firmemente contra el cilindro hasta obtener un tiempo de tránsito estable. Las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico se realizaron en ítems de concreto saturados a 7, 14, 21 y 28 días de curado. La velocidad de pulso está dada por (ASTM International C597 – 16, 2016):

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Donde V es la velocidad de pulso (m/s), L es la distancia entre los transductores (m) y t es el tiempo de tránsito (s).

2.2.5 Permeabilidad del ion cloruro

Este ensayo se realizó a ítems de concreto con 5 cm de espesor y 10 cm de diámetro. Los ítems de ensayo fueron sometidos a vacío durante 3 h en un desecador conectado a una bomba. Una vez transcurridas las 3 h, los ítems, dentro del desecador, fueron cubiertos con agua previamente hervida y se activó el vacío durante 1 h. Una vez transcurrido este tiempo, se quitó el vacío y los ítems permanecieron inmersos en agua durante 18 h. Posterior a estas 18 h, se realizó el montaje de la celda, usando NaCl en la terminal negativa y NaOH en la terminal positiva. Se utilizó un equipo para la medición rápida de permeabilidad de ion cloruro modelo *PROOVE'it*, marca *Germann Instruments*. Se aplicó un potencial de 60 V y se registraron los datos de corriente y temperatura.



2.2.6 Resistencia a la compresión

Este ensayo se realizó sobre cilindros curados durante 28 días. Estos fueron cabeceados con mortero de azufre, con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga. El mortero de azufre fue fundido a $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Se colocó aceite en el plato de vaciado, para facilitar el retiro del ítem, antes de vaciar el azufre y colocar el cilindro de concreto. Una vez colocado el cilindro sobre el azufre, se dejó enfriar durante 3 min. La resistencia a la compresión se realizó en un equipo servohidráulico INSTRON serie 8503. Se aplicó carga a una velocidad de 200 Kg/s (0.25 MPa/s).

La resistencia a la compresión es calculada con la siguiente ecuación (ASTM International C39/C39M – 21, 2021):

$$f_{cm} = \frac{4000P_{max}}{\pi D^2} \quad (3)$$

Donde:

f_{cm} = Resistencia a la compresión en MPa

P_{max} = Carga máxima en kN

D= Diámetro en mm

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos de durabilidad

3.1.1 Porosidad total

Los resultados de porosidad, presentados en la Tabla 1, muestran que los cilindros de concreto modificados con óxido de grafeno no presentan variación en la cantidad de poros, ya que todas las muestras presentan un porcentaje de porosidad total de $\approx 21\%$. Este resultado indica que es un concreto de durabilidad inadecuada (Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura), 1998).

Tabla 1. Resultados del ensayo de porosidad.

Muestra	% Porosidad Total
Blanco	21.38 ± 0.94
OG 0.03%	21.85 ± 1.40
OG 0.06%	21.16 ± 0.92
OG 0.09%	22.01 ± 0.72

3.1.2 Absorción capilar

Los resultados de índice de absorción se muestran en la Figura 1. A estos datos se les aplicó una regresión lineal, la pendiente de las primeras 5 h representa la absorción inicial y la pendiente del tiempo restante representa la absorción secundaria. Los resultados del análisis de absorción se muestran en la Tabla 3.2. Se presentan resultados de absorción para cada ítem (triplicado) y un promedio de absorción inicial y secundaria. Los resultados de absorción inicial muestran que la absorción de agua aumenta con la presencia de óxido de grafeno, lo que indica que el concreto



modificado es más susceptible a la penetración de agua que el concreto sin presencia de óxido de grafeno. Esto es causado por la afinidad del óxido de grafeno al agua, ya que es un material altamente hidrófilo (Junaidi et al., 2018). Por otro lado, los resultados de absorción secundaria no pudieron ser determinados ya que no muestran una relación lineal y presentan un coeficiente de correlación menor que 0.98 (ASTM International C1585 – 20, 2020; NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015).

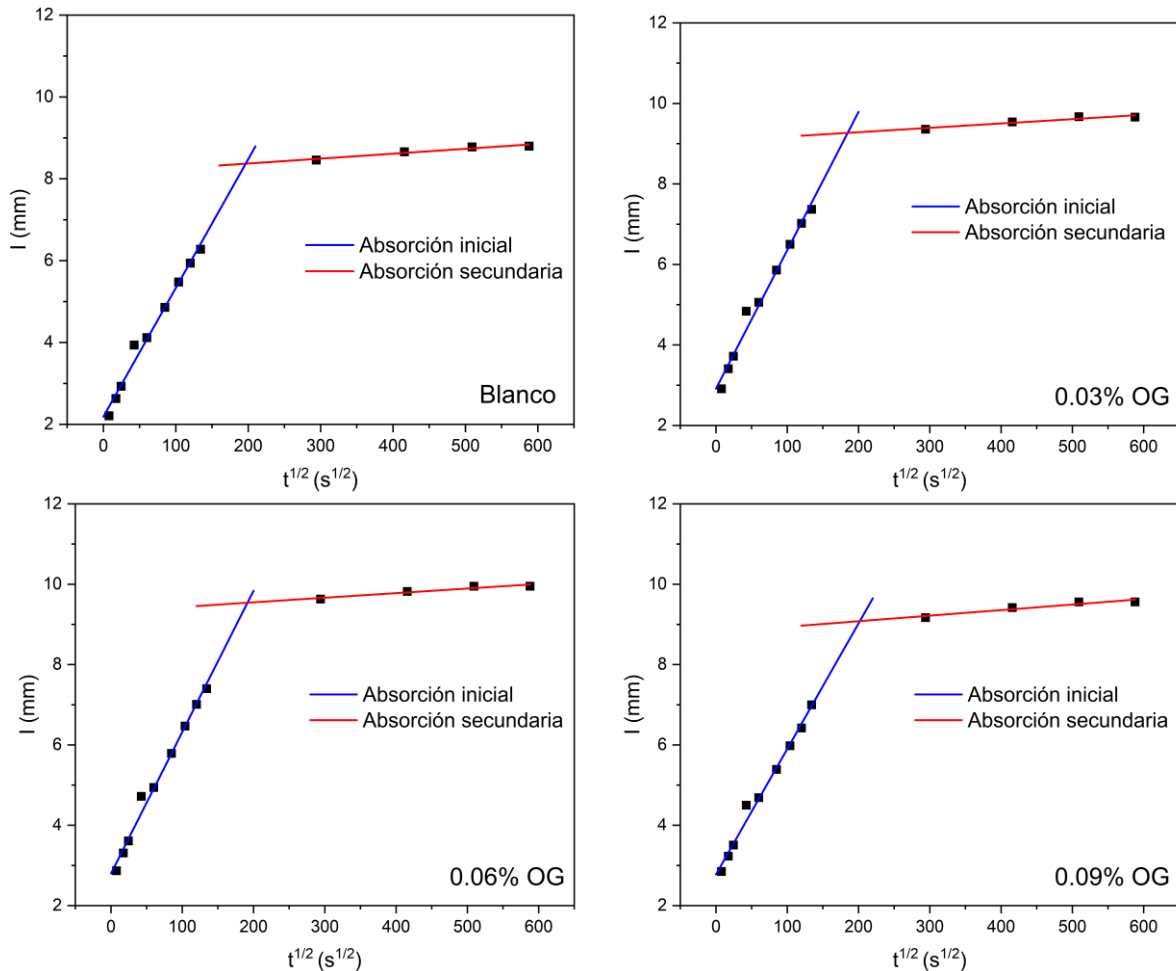


Figura 1. Resultados de absorción capilar a diferentes concentraciones de óxido de grafeno.

Tabla 2. Resultados del ensayo de absorción capilar.

Muestra	Absorción inicial promedio (mm/s ^{1/2})	Absorción secundaria promedio (mm/s ^{1/2})
Blanco	0.03261 ± 0.00115	0.00124 ± 0.00028
OG 0.03%	0.03290 ± 0.00156	0.00128 ± 0.00034
OG 0.06%	0.03564 ± 0.00393	0.00113 ± 0.00007
OG 0.09%	0.03407 ± 0.00331	0.00126 ± 0.00012

3.1.3 Resistividad

Los resultados de resistividad eléctrica con desviación estándar se muestran en la Figura 2. La presencia de óxido de grafeno aumenta la resistividad con respecto al aumento de su concentración, llegando un máximo de 6,220 $\Omega\cdot\text{cm}$ a la concentración de 0.09% de óxido de grafeno. Este resultado indica que los cilindro de concreto con presencia de óxido de grafeno tienen una mayor oposición al flujo de electrones y una menor difusividad de iones hacia el interior del concreto, lo que se relaciona con una menor probabilidad de corrosión del acero de refuerzo, comparado con el blanco sin presencia de OG (ASTM International G57 – 20, 2020; Sang et al., 2022). En los cuatro casos no hay una variación de resistividad considerable durante el tiempo de curado, lo que indica que el óxido de grafeno no provoca cambios en las características de los poros del concreto a lo largo del tiempo.

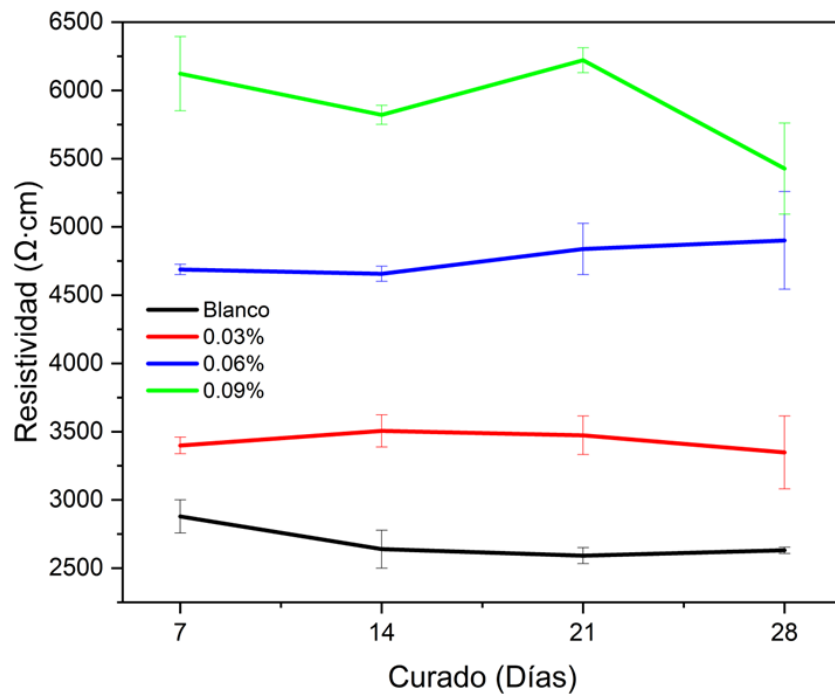


Figura 2. Resultados de resistividad (ρ) con respecto al tiempo de curado para los cilindros de concreto con diferente concentración de OG.

3.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico

La Figura 3 muestra los resultados de velocidad de pulso ultrasónico con desviación estándar. Se observa que el aumento en la concentración de óxido de grafeno disminuye el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico, donde la velocidad de tránsito del pulso mínima se obtiene a los 7 días de curado en todos los casos. La velocidad en que el pulso ultrasónico recorre el cilindro de concreto aumenta con el tiempo de curado, esto se atribuye a la disminución de poros y endurecimiento del concreto. De acuerdo con los criterios reportados para la medición de velocidad de pulso ultrasónico, este concreto puede clasificarse como bueno (Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura), 1998; Rómel G. Solís Carcaño et al., 2004).

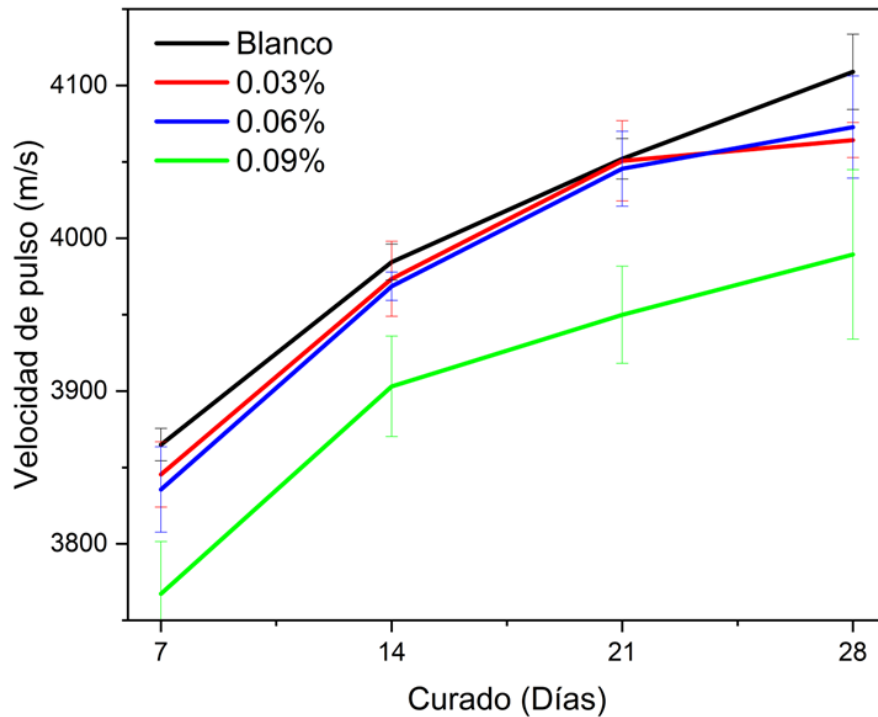






Figura 3. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico con respecto al tiempo de curado para los cilindros de concreto con diferente concentración de OG.

3.1.5 Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión, mostrados en la Tabla 3, indican que la presencia de óxido de grafeno aumenta la capacidad de carga de los cilindros de concreto, el mejor resultado se presenta en los ítems con 0.09% de óxido de grafeno, con 25.40 MPa y una carga máxima de 199.46 kN. La mejora en la resistencia a la compresión es provocada por cambios en los enlaces C-S-H del concreto, mejoras en las propiedades de la interfase agregado-concreto y la una mayor hidratación de las muestras con oxido de grafeno (Yuan et al., 2022).

Tabla 3. Resultados de resistencia a la compresión.

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Fractura	Tipo de fractura
Blanco	195.52 ± 7.04	24.89 ± 0.90		Tipo 1
OG 0.03%	194.02 ± 3.88	24.70 ± 0.49		Tipo 2
OG 0.06%	197.23 ± 18.91	25.11 ± 1.37		Tipo 1
OG 0.09%	199.46 ± 7.96	25.40 ± 1.01		Tipo 3

3.1.6 Permeabilidad del ion cloruro

Los resultados del comportamiento de los cilindros de concreto ante la permeabilidad del ion cloruro se muestran en la Figura 4. Se observa que la presencia de óxido de grafeno aumenta la permeabilidad a valores mayores a 4000 C, lo que es indicador de una alta permeabilidad y, por lo tanto, una alta penetración del ion cloruro hacia el interior del concreto.

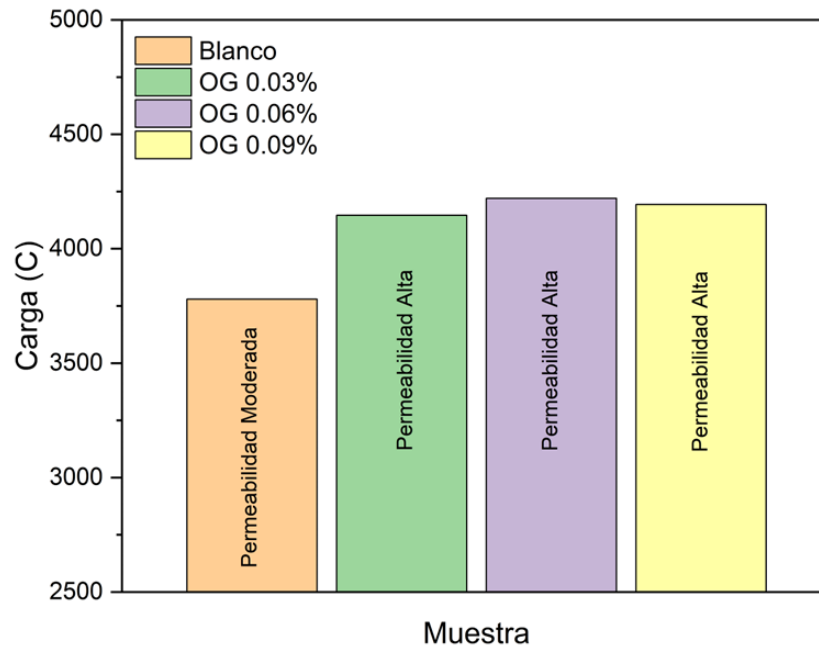


Figura 4. Resultados de permeabilidad del ion cloruro.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de añadir óxido de grafeno como aditivo en concreto demuestran que este es capaz de modificar su comportamiento en ensayos de durabilidad. Se concluye que la presencia de óxido de grafeno hace al concreto más propenso a la absorción de agua y a la permeabilidad del ion cloruro, esto implica una mayor velocidad de penetración de iones que pueden provocar el inicio y propagación de la corrosión del acero de refuerzo. En las mediciones de resistividad y velocidad de pulso ultrasónico, el concreto con presencia de óxido de grafeno presenta propiedades más pobres que los cilindros sin presencia de óxido de grafeno. Por otro lado, las muestras con presencia de este aditivo presentan una mejora en la resistencia a la compresión. Para futuros trabajos se recomienda probar este aditivo con la presencia de un superplastificante para mejorar las condiciones de la mezcla.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Mexicano del Transporte por las facilidades para realizar este proyecto.

6. REFERENCIAS

Aggarwal, P., Singh, R. P., & Aggarwal, Y. (2015). Use of nano-silica in cement based materials— A review. *Cogent Engineering*, 2(1), 1078018. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018>
 ASTM International C39/C39M – 21. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

- ASTM International C597 – 16. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM International C642 – 21. (2021). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM International C1585 – 20. (2020). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes.
- ASTM International G57 – 20. (2020). Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method.
- Junaidi, N. F. D., Khalil, N. A., Jahari, A. F., Shaari, N. Z. K., Shahrudin, M. Z., Alias, N. H., & Othman, N. H. (2018). Effect of Graphene Oxide (GO) on the Surface Morphology & Hydrophilicity of Polyethersulfone (PES). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 358, 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/358/1/012047>
- Marvila, M. T., de Azevedo, A. R. G., de Matos, P. R., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2021). Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials. *Materials*, 14(15), 4304. <https://doi.org/10.3390/ma14154304>
- NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). Industria de la construcción-determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico-método de ensayo.
- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2017. (2017). Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo.
- Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction and Building Materials*, 175, 483–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214>
- Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” (Durabilidad de la Armadura). (1998). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (CYTED, Ed.; 2a edición, Vol. 1).
- Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno, & William R. Castillo Pak. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería*, 8(2), 42–52.
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
- Sang, Y., Yang, Y., & Zhao, Q. (2022). Electrical resistivity of plain cement-based materials based on ionic conductivity: A review of applications and conductive models. *Journal of Building Engineering*, 46, 103642. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103642>
- Solís Carcaño, R. G., & Alcocer Fraga, M. Á. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(4), 1–13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
- Tang, S. W., Yao, Y., Andrade, C., & Li, Z. J. (2015). Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, 78, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.021>
- Yuan, X., Zhang, L., Chen, X., & Liu, F. (2022). Study on the mechanical properties and frost resistance of multiple modified concrete. *Materials Research Express*, 9(4), 045013. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac3951>



Análisis de daños en estructuras de concreto hidráulico de edificios en ambiente costero del Golfo de México. Estudio de caso.

P. Martínez^{1*}, F. A. Ramírez-Montes², Y. Y. Martínez López³,
J. L. Borges Cú⁴, A. A. Bacelis-Jiménez⁴, T. Pérez López⁴.

*Autor de Contacto: perlantz.g.29@gmail.com

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Campeche, Lerma, Campeche, México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

³ Tecnológico Nacional de México, Campus Morelia, Morelia, Michoacán, México.

⁴ Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

RESUMEN

Una inspección preliminar de daños aplicando la noma NMX-C-505-ONNCCE-2016 fue realizada en dos edificios del Tecnológico Nacional de México, Campus Campeche, los cuales están expuestos al ambiente costero del Golfo de México cuya categoría de agresividad atmosférica del ambiente está catalogada como C3, representativa de las áreas tropicales y costeras con baja deposición de cloruros. Se localizaron zonas críticas en las cuales el grado de deterioro es notable y otras en las cuales no se registraba daño significativo. Consecuentemente, se efectuó una inspección detallada de acuerdo con la norma NMX-C-520-ONNCCE-2018 y las normas correspondientes de resistividad eléctrica, potencial de corrosión y porcentaje de humedad, mediante el registro de sus valores se determinaron las zonas con deterioro y sanas. Los resultados de los valores de la resistividad de las columnas mostraron una tendencia a disminuir al desplazarse hacia el suelo, mientras el porcentaje de humedad se incrementó. La secuencia de mediciones de acuerdo con las normas mexicanas son un ejercicio de inspección poco utilizado en México, por lo que es recomendable lograr mayor difusión de este tipo de prácticas como rutina de inspección en estructuras de concreto reforzado.

Palabras clave: Concreto; Corrosión; Resistividad; Ambiente Costero; Golfo de México.

1. INTRODUCCIÓN

Globalmente, las construcciones han representado inversiones significativas para quien las realiza, asimismo, las características estructurales pueden determinar el tiempo de vida útil de las edificaciones dependiendo de las propiedades de los materiales, el correcto diseño, las condiciones ambientales y el mantenimiento adecuado; a raíz de esto, continuamente se busca lograr un aprovechamiento total de los recursos para asegurar el uso pleno de las instalaciones.

A nivel mundial, se estima que el 40% del total de las estructuras de concreto reforzado deben seguir algún mantenimiento y/o reparación, mientras que el resto debe ser reemplazado por completo (Herrera et al., 2015). En este contexto, un edificio con daños estructurales significativos puede generar consecuencias graves tanto en los ambientes de seguridad como en los económicos de quien lo desarrolla. De acuerdo con investigaciones reportadas el costo por problemas de corrosión del acero de refuerzo se estima en 2.5 mil millones de dólares, equivalente al 3.4% del PIB mundial (López et al., 2021). Las grietas en el concreto pueden reducir la efectividad protectora del recubrimiento y de este modo reducir la vida útil de la estructura, al permitir una penetración más rápida de los iones cloruro, el dióxido de carbono, el agua y el oxígeno provocando el ataque del acero de refuerzo (DURAR, 2000).

El deterioro de los materiales del concreto bajo las acciones ambientales es un conocimiento fundamental para el diseño de durabilidad. La razón misma por la que el concreto puede deteriorarse se deriva del hecho de que este es un material poroso y, a través de la red de poros, el material puede tener intercambio de masa y energía con el entorno externo o dentro de sus componentes internos (Li, K., 2017). Circunstancialmente, el medio ambiente en el cual se realicen las edificaciones representa un factor determinante en el ámbito de la construcción, el clima determinará las condiciones a las cuales se encontrará expuesta mi estructura y, por consiguiente, determinará las propiedades que debe tener para soportar estos entornos.

En este escenario, nos encontramos con un ambiente costero caracterizado por la presencia de cloruros, asimismo las constantes lluvias debido a la zona tropical y la humedad presente afectan de manera significativa a las estructuras de concreto. De acuerdo con un reporte de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil, se necesitan invertir alrededor de 660 000 000 de dólares en trabajos de mantenimiento y reparación para que la infraestructura costera norteamericana alcance un estado favorable (Castañeda-Valdéz, 2014).

De esta manera y debido a los constantes avances y sucesos en el ámbito de la construcción, las normas referentes al diagnóstico y evaluación de las estructuras han estado considerando el entorno en el que se desarrollan las edificaciones en el tiempo de vida útil de las mismas, marcando así un paso significativo en aspectos como mantenimiento y reparación. La detección oportuna de los daños en las construcciones le otorga al evaluador la posibilidad de decidir los siguientes pasos en el proceso de conservación del tiempo de vida de su edificación, este tipo de análisis pueden ser determinados mediante la práctica de diversas técnicas tanto destructivas como no destructivas en las instalaciones.

En este trabajo se realizó la inspección y análisis de los daños en estructuras de concreto hidráulico de edificios en ambiente costero del Golfo de México para el caso particular de una institución de educación superior con edificaciones con 45 años de servicio.



2. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una visita a dos edificaciones pertenecientes al Tecnológico Nacional de México Unidad Campeche (carretera Campeche-Escárcega Km 9, C.P. 24500 Lerma, Campeche) para la realización de una inspección preliminar bajo los criterios y procedimientos de la Norma Mexicana NMX-C-505-ONNCCE-2016 (Industria de la construcción-Inspección preliminar de daños en las estructuras de concreto hidráulico con criterios de durabilidad-procedimientos).

La inspección realizada nos proporcionó un diagnóstico base de los daños encontrados en los edificios, permitiendo conocer las condiciones actuales de las estructuras mediante la ayuda de evidencias fotográficas y la realización de planos correspondientes, como los que se muestran a continuación.

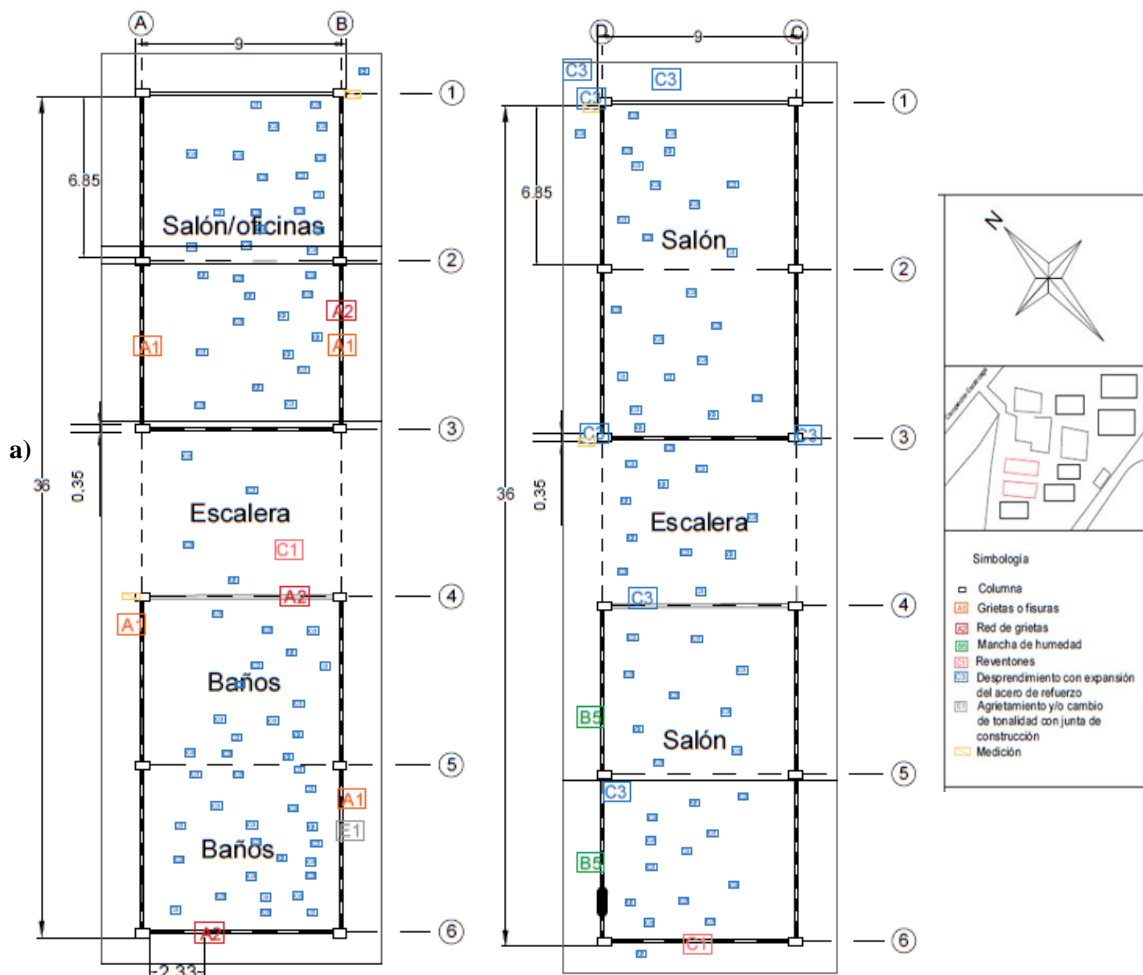


Figura 1. Croquis de los edificios con los daños detectados: a) Edificio 1 y b) Edificio 2.



Figura 2. Daños detectados en edificio 1: a) Techo exterior, Código B5, daño por mancha de humedad y b) Parte interior de la losa de azotea, Código C3, desprendimiento del concreto resultando en la exposición del acero en la mayoría de las viguetas.

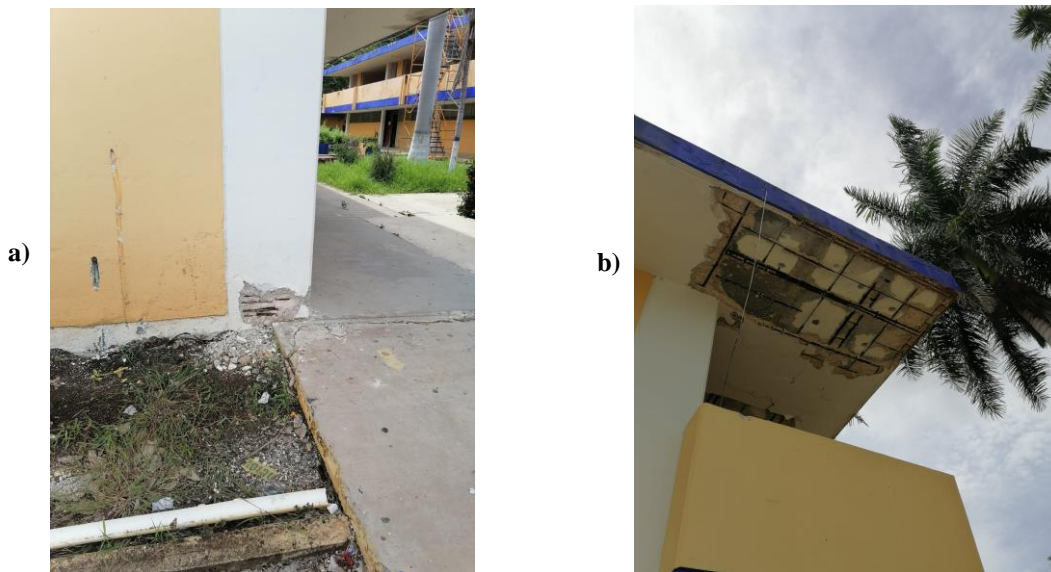


Figura 3. Daños detectados en edificio 2 por presencia de desprendimiento del concreto causando la exposición del acero de refuerzo: a) Columna D1, Código C3 y b) Losa de azotea localizada a un lado de la columna D1, Código C3.

Con la guía de daños de la inspección preliminar, se procedió a realizar una segunda inspección detallada de acuerdo con la norma NMX-C-520-ONNCCE-2018 (Industria de la construcción- Durabilidad-Inspección detallada de daños en estructuras de concreto hidráulico con criterios de durabilidad- procedimientos), complementado con las normas correspondientes a cada técnica de medición empleada.

2.1 Resistividad

Conforme a lo establecido en la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019 (Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo) y en la norma internacional ASTM G57-20 (Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method), se procedió a evaluar la resistividad del suelo, y de los elementos estructurales seleccionados mediante el empleo del método de las cuatro puntas o método de Wenner. Este fue llevado a cabo mediante la aplicación de una intensidad de corriente eléctrica, y el registro de su respectiva diferencia de potencial, para ello se utilizó un resistómetro de la marca Nilson, modelo 400.

2.1.1 Resistividad de suelo en la periferia del edificio

La resistividad se registró a distintas distancias de separación entre electrodos (40, 80, 160 y 320 cm) para construir un perfil de resistividad respecto a la profundidad de las mediciones.



Figura 4. Lectura de resistividad del suelo.

2.1.2 Resistividad de columnas

Por otro lado, las mediciones de resistividad de las columnas fueron realizadas en distancias de separación entre electrodos de: 20, 40, 60, 80, 100 y 120 cm.

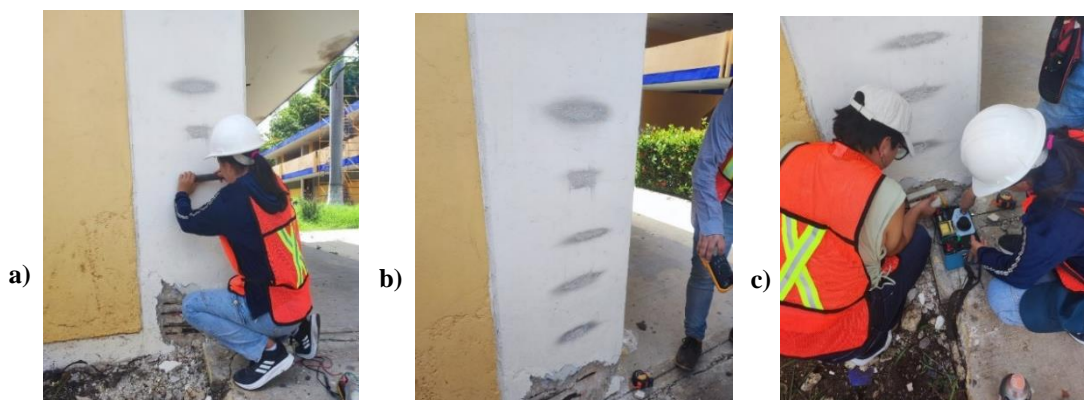


Figura 5. Demostración de la toma de medida de la resistividad en las columnas: a) Raspado de la columna b) Alturas de medición y c) Toma de resistividad.

2.2 Potencial de corrosión

El potencial de media celda del acero de refuerzo de las estructuras fue medido de acuerdo con el procedimiento y las especificaciones que marca la norma NMX-C-495- ONNCCE-2015(Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto – Especificaciones y método de ensayo) y la norma internacional ASTM C876-09 (Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete), usando un multímetro y un electrodo de Cu/CuSO_4 como electrodo de referencia. Se realiza la conexión del electrodo de trabajo (en este caso la varilla expuesta) y el electrodo de referencia al equipo de medición, posteriormente se coloca el electrodo de referencia en las zonas seleccionadas y se registran las respectivas mediciones.



Figura 6. Medición del potencial en sitio.

2.3 Porcentaje de humedad

Se utilizó el protímetro mini modelo BLD2000 marca Protimeter, para registrar el porcentaje de humedad a las mismas distancias donde se realizaron las mediciones de resistividad (20, 40, 60, 80, 100 y 120 cm). Asimismo, estos porcentajes fueron medidos tanto en seco como en húmedo en cada columna. El mecanismo de medición del equipo cuenta con 2 puntas las cuales son colocadas en la zona a medir, se presiona ligeramente el aparato sobre la superficie del concreto y se registra el valor indicado mediante una pequeña luz como se muestra en la figura siguiente.



Figura 7. Medición del porcentaje de humedad.

3. RESULTADOS

La evidencia fotográfica obtenida a partir de la inspección preliminar permitió la evaluación del estado de los edificios. De acuerdo con la norma NMX-C-505-ONNCCE-2016, la mayoría de los daños identificados son catalogados con el Código C3, desprendimiento de fragmentos superficiales de concreto con exposición del acero de refuerzo, causados por la posible presión interna por corrosión de este.

De acuerdo con las especificaciones y procedimiento que marca la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015, en el apartado 5.3, como lo advierte, por la falta de conductividad y al no tener lectura, se requiere humedecer la columna con agua. El potencial de media celda para la columna D1 puede observarse en la tabla 1, los datos muestran un desplazamiento hacia valores más positivos cuando la distancia hacia el suelo aumenta. También se puede observar que el valor a 20 cm del suelo ya presenta valores negativos, sin embargo, este valor aún se encuentra dentro del rango que es considerado como la región pasiva del acero de refuerzo (tabla 2).

Tabla 1. Potencial de la columna D1

E_{corr} (mV)	-139.8	17.8	46.6	64.8	65.5	63.9
Altura (cm)	20	40	60	80	100	120

Tabla 2. Criterio para medir el potencial de corrosión del acero de refuerzo en concreto (ASTM C876-09).

$E_{\text{corr vs Cu/CuSO}_4(\text{sat})}(\text{mV})$	$E_{\text{corr vs Ag/AgCl}(\text{sat})}(\text{mV})$	Probabilidad de corrosión
Mayor a -200	Mayor a -150	10% (Zona Pasiva)
Entre -200 y -350	Entre -150 y -300	50% (Zona Incierta)
Menor a -350	Menor a -300	90% (Zona Activa)

La resistividad del suelo se muestra en la tabla 3, de acuerdo con los criterios de la tabla 4, la agresividad que presenta es discreta, con la posibilidad de pasar a severa con mayor contenido de humedad, que es factible con la presencia de lluvias de la zona.

Tabla 3. Valores de resistividad del sitio.

ρ ($\Omega\text{-m}$)	15.8	13.6	19.1	22.1
Altura (cm)	40	80	160	320

Tabla 4. Criterios de resistividad en suelo (Chavarría Meza, 2021).

Resistividad ($\Omega\text{-m}$)	Grado de agresividad
< 10	Severo
10 - 100	Discreto
100 - 1000	Escaso
> 1000	Nulo

La figura 8 presenta los resultados de las respectivas mediciones realizadas. Se puede observar la relación entre la resistividad con la humedad de las columnas, “cuando se tiene un porcentaje de humedad mayor, la resistividad disminuye y viceversa”, ya que no existe un medio iónico que facilite el fenómeno de transporte de cargas. Asimismo, las altas resistividades también pueden ser acreditadas al estado de las estructuras del concreto, por lo que las columnas que presenten grietas o fisuras significativas pueden dar paso a la entrada de agentes perjudiciales lo que se refleja en valores menores de resistividad.

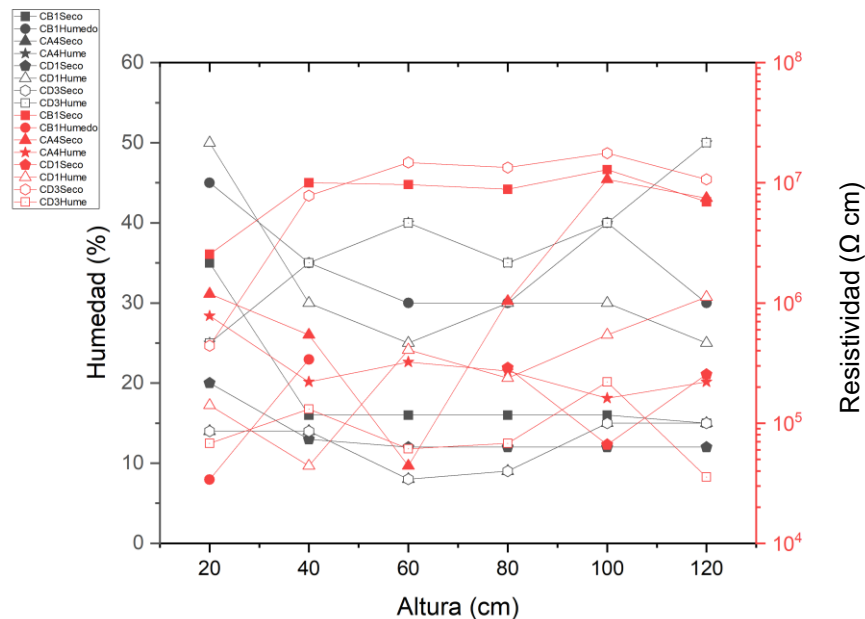


Figura 8. Comparación entre la humedad y la resistividad de cada columna.

4. CONCLUSIONES

Con base en las normas de inspección preliminar y detallada, es posible determinar que el acero de refuerzo de las columnas presenta baja probabilidad de corrosión, asimismo se identifica que las zonas más propensas a la corrosión son aquellas que se encuentran más cerca del suelo, debido a la humedad que este trasmite a la columna, por lo tanto, se recomienda restaurar dichas zonas.

Es importante señalar la relación que existe entre la resistividad y la humedad presente en los poros del concreto, valores altos de humedad pueden perjudicar el estado de las estructuras por lo que un desequilibrio en estos refleja signos cambiantes en la resistividad. La reducción de su valor actual implicaría la presencia de condiciones de agresividad al componente metálico embebido, por consiguiente, en casos de lluvia o periodos de riego en las inmediaciones se pueden presentar daños graves a las edificaciones.

Por otro lado, en las figuras 2 y 3 podemos observar el desprendimiento del concreto provocado por la expansión del acero de refuerzo debido a la corrosión, con base a la tabla 2 y los datos obtenidos se puede afirmar que la condición se establece en un estado pasivo en concreto húmedo, por lo que puede ser un riesgo de daño despreciable.

Aunque las mediciones señalan condiciones poco agresivas, los daños observados en los edificios pueden ser debidos a la acumulación de agentes agresivos después de 45 años de servicio.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su agradecimiento al Centro de Investigación en Corrosión por su apoyo para la inspección realizada y al Tecnológico Nacional de México por las facilidades brindadas para las mediciones en sus edificios. Asimismo, se extiende el agradecimiento a Francisco Antonio Balán Novelo, Jefe del Depto. de Ciencias de la Tierra del TNM Campeche por la gestión para la

realización de los ensayos. Asimismo, a. Bacelis Jiménez agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo recibido mediante la beca de posdoctorado.

6. REFERENCIAS

ASTM International. (2009). *ASTM C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. <https://www.astm.org/c0876-09.html>

ASTM International. (2020). *ASTM G57-20 Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. <https://www.astm.org/g0057-20.html>

Castañeda-Valdéz, A., & Rodríguez-Rodríguez, M. (2014). Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. 45.

Chavarría Meza, L. E. (2021). Corrosion Engineering & Cathodic Protection. Obtenido de Atlantic International University: <https://aiu.edu/spanish/Corrosion-Engineering-&-Cathodic-Protection.html>

DURAR. (2000). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. (Tercera ed.). (O. Trocónis de Rincón, A. Romero de Carruyo, C. Andrade, P. Helene, & I. Díaz, Edits.)

Herrera, H., Franco Tronco, M. I., Miranda-Hernández, J. G., Hernández-Sánchez, E., Espinoza-Vázquez, A., & Fajardo, G. (2015). GEL DE ALOE-VERA COMO POTENCIAL INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO ESTRUCTURAL. Avances en Ciencias e Ingeniería.

International Organization for Standardization. (2012). *ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation*. <https://www.iso.org/standard/53499.html>

Li, K. (2017). Durability design of concrete structures : Phenomena, modeling, and practice. John Wiley & Sons, Incorporated.

López, A., Quiroz, J. T. P., Madrid, M. M., Borges, R. O., Belmonte, M. R., Guillén, J. T., & Olvera, M. A. (2021). Estudio cinético y caracterización del recubrimiento anticorrosivo base níquel (Ni) para su aplicación en sistemas de protección catódica por corriente impresa (PCCI) como ánodo en estructuras de concreto.

Secretaría de Economía (2015). *NMX-C-495-ONNCCE-2015: Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto – Especificaciones y método de ensayo*. Ciudad de México.

Secretaría de Economía (2016). *NMX-C-505-ONNCCE-2016: Industria de la construcción- Inspección preliminar de daños en las estructuras de concreto hidráulico con criterios de durabilidad- Procedimientos*. Ciudad de México.

Secretaría de Economía (2018). *NMX-C-520-ONNCCE-2018: Industria de la construcción- Durabilidad-Inspección detallada de daños en estructuras de concreto hidráulico con criterios de durabilidad- procedimientos*. Ciudad de México.

Secretaría de Economía (2019). *NMX-C-514-ONNCCE-2019: Industria de la Construcción- Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo*. Ciudad de México.





Estudio de una nueva tipología de estribo de acero embebido en concreto frente a la corrosión inducida por cloruros

A. Capistrano-García¹, G. Fajardo-San-Miguel^{1*}, J. Álvarez-Pérez¹, R. Orozco-Cruz²

*Autor de Contacto: gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, FIC-UANL, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz, México.

RESUMEN

Acorde a estadísticas del INEGI 2020, el 60% de la infraestructura urbana en México está representada por las edificaciones de mampostería confinada. Conforme a las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería con Comentarios (NTCM) para su construcción requiere de un adecuado diseño estructural, siendo fundamentales el concreto y el acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal (estribos). En esta investigación se evaluó el comportamiento frente a la corrosión inducida por cloruros de una nueva tipología de estribos flejeados en espiral (EFE) y estribos tradicionales (EA) con uso potencial en castillos, característicos de este sistema constructivo. Para ello, se elaboraron cuatro series de especímenes cilíndricos de concreto, (elaborados con y sin cloruros en la mezcla), con EFE y EA, que posteriormente fueron sometidos a ciclos repetidos de inmersión de 3 días en NaCl con una concentración de 35 g/L seguido de un secado en horno a 40°C. El EFE y EA fueron caracterizados mediante ensayos metalográficos, mecánicos y electroquímicos. El seguimiento del Ecorr, icorr y resistividad fue realizado periódicamente en los especímenes de concreto. Los resultados permitieron comprender el comportamiento del EFE y del estribo tradicional frente al deterioro por corrosión desde la etapa de iniciación hasta la propagación. Así, durante la etapa inicial, los EFE mostraron una icorr menor en comparación con los estribos tradicionales, con valores cercanos a 1µA/cm². El umbral de cloruros en el concreto con EFE fue menor en comparación con el concreto con estribos tradicionales.

Palabras clave: Magnetita; Acero de refuerzo; Concreto armado; Corrosión.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2020) el 87% de la vivienda tradicional de mampostería está construida a base de muros de mampostería que, en su mayoría, emplea el sistema constructivo de mampostería confinada, siendo evidente tanto en zonas urbanas y rurales (Álvarez *et.al.*, 2021). Estos tipos de muros se construyen utilizando castillos y dalas de concreto reforzado con varillas y estribos de acero.

Es sabido que el concreto es uno de los materiales de construcción mayormente empleados y la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado depende de la doble protección, física y química, que ofrece el concreto al acero embebido. Dicha protección depende directamente del recubrimiento de concreto especificado en el diseño de mezcla y de la calidad de los materiales que la constituyen, así como del proceso de vaciado y curado.

Al existir deficiencias en la doble protección del concreto, el acero de refuerzo queda vulnerable, con alto riesgo de sufrir deterioro por corrosión ante el ingreso de agentes agresivos como los cloruros, sulfatos, sustancias químicas, etc., que se encuentran en el medio ambiente y que de manera constante pueden penetrar en la matriz cementante por difusión y/o absorción. Es por ello que las barras de refuerzo, comúnmente, son afectadas debido al ingreso de cloruros libres que son adsorbidos por los poros de gel del concreto durante la hidratación del cemento o bien permanecen de forma iónica (Castro *et.al.*, 2020).

Por otra parte, se reconoce que donde existen problemas de corrosión el impacto económico afecta hasta en un 3.5 % en el PIB de cualquier país, con pérdidas de 65 billones de dólares por año (Garcés *et.al.*, 2008). Es importante señalar que, en la mampostería confinada, el estudio de la corrosión del acero de refuerzo debe ser un aspecto muy importante y obligatorio por incorporar en el diseño estructural.

En este estudio se tiene por objetivo la evaluación del deterioro por corrosión en el acero de refuerzo transversal debido a que intervienen significativamente en la resistencia al cortante de la mampostería. Para ello, se propuso una nueva tipología de estribos denominado flejeados en espiral (EFE) y su comparativa con los estribos tradicionales (EA). Este material (EFE), con variantes en la composición química y metalúrgica, así como el detallado físico respecto al estribo redondo tradicional, es producido por una empresa acerera de la zona metropolitana de Monterrey. Dicho estribo ha evidenciado una mejoría en la resistencia mecánica de castillos sometidos a la compresión comparado con elementos fabricados con estribos tradicionales, alcanzando un aumento de más del 78% en el confinamiento del concreto en la rama de descarga de la curva esfuerzo-deformación (Álvarez *et.al.*, 2020). Dicho comportamiento se atribuye al hecho de que existe un área de contacto expuesta mayor entre el acero y el concreto comparado con los estribos de sección cilíndrica. Adicionalmente, una vez que se ha alcanzado la resistencia a la compresión máxima de los castillos, la pérdida de rigidez es menor, siendo muy notoria la reducción en el volumen de acero empleado con una cuantía menor del 14%, ambos comparados con los estribos tradicionales.

De igual manera, en otros estudios (Shatarat *et.al.*, 2016), (Saha *et.al.*, 2019), evidenciaron que el comportamiento mecánico en los estribos en forma de espiral mostró más favorecido en máxima resistencia, rigidez, ductilidad y disipación de energía acumulada y capacidad de corte (mejoría del 31% al 40%), gracias al ángulo de inclinación de 80° entre las espirales y la separación, acorde a ACI 318M-14.



En este sentido, al hablar de estribos sometidos a la corrosión y su relación con el comportamiento estructural, (Juárez *et.al.*, 2011), (Chang *et.al.*, 2014) y (Wang *et.al.*, 2015) encontraron que el refuerzo transversal mediante la prueba de corrosión acelerada obtuvo mejoría sobre la degradación al corte en un 10% y la sección corroída disminuyó la rigidez, destacando que los estribos influyen en la eficiencia de remoción electroquímica de cloruros (ECR), retrasando el proceso de corrosión y el potencial de circuito se hizo más noble, lo que llevó a la lixiviación de los iones de calcio dentro del concreto.

Por otra parte, (Andrade *et.al.*, 1999), (Fajardo *et.al.*, 2009) y (Rivera *et. al.*, 2017), se ha destacado la utilidad de realizar pruebas electroquímicas LPR y EIS, así como la determinación de la concentración de cloruros, velocidad de pulso ultrasónico, porosidad o permeabilidad del ion cloruro y resistividad eléctrica en el concreto para conocer los parámetros de durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

Por tal razón, en este estudio se evaluaron las dos tipologías de estribos de acero al carbono en el concreto reforzado, tanto EFE como EA, obteniéndose la caracterización metalográfica, los parámetros de durabilidad del concreto reforzado, así como la evaluación electroquímica correspondiente para obtener valores de E_{corr} e i_{corr} y con ello determinar la pérdida de sección de acero y valorar la pertinencia del uso de la nueva tipología de estribos de acero al carbono acorde a ASTM C876 y RILEM TC – 154 (Martínez, 2018) y NTCC 2020 como alternativa de materiales de construcción de edificaciones.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se empleó un cemento portland ordinario (CPO 40) que cumple con la especificación NMX-C-414-ONNCCCE, TMN de $\frac{3}{4}$ " de agregado grueso; acero al carbono colado en frío grado industrial A60 acorde a la ASTM A370 correspondiente al estribo tradicional (EA) con sección circular \emptyset No 2 y también para el EFE de sección laminar rectangular con espesor de 1 mm. Véase Figura 1.

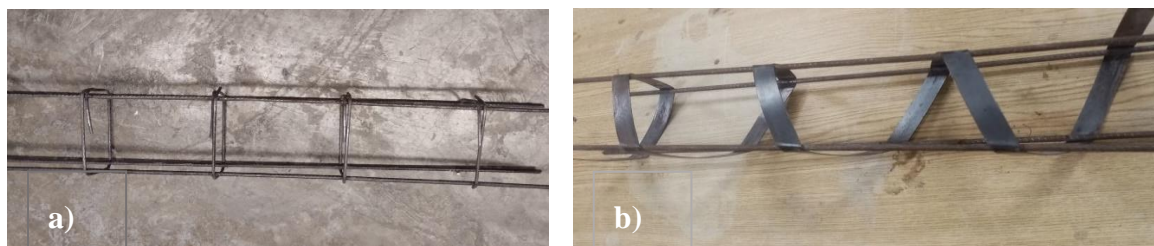


Figura 1. Estribos prefabricados: a) tradicional de alambrión (EA) y b) flejeado en espiral (EFE).

2.1.1 Diseño de mezcla

Por otra parte, se realizó un diseño de mezcla de concreto para una resistencia a la compresión de 20 MPa, representativo del concreto usado comúnmente en castillos de mampostería confinada. De acuerdo con lo especificado en NTCC 2017, el concreto para esta aplicación debe tener una resistencia a la compresión mínima de 150 kgf/cm^2 (15 MPa). Este diseño de mezcla se realizó en dos condiciones: la primera sin incorporar cloruros denominada referencia (REF) y la segunda con incorporación de cloruros (denominada CL). En la Tabla 1 se presenta el proporcionamiento.

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla empleada en la elaboración del concreto

Ingredientes	Cantidades
Agua, kg/m ³	150
Cemento, kg/m ³	190
Grava ¾", kg/m ³	865
Arena, kg/m ³	1185
Aditivo superplastificante (7cc), ml	1295
a/c	0.75
f'c diseño, MPa a 28 días	20

2.1.2 Resistencia a la compresión

Los valores de resistencia a la compresión alcanzados en las dos condiciones de concreto a los 28 días de exposición en el cuarto de curado con humedad relativa del 95%, fueron de 20.5 MPa para los especímenes con concreto de referencia; en tanto que en los especímenes de concreto con incorporación de cloruros en la mezcla fueron de 20 MPa. Cumpliendo con un valor mínimo de $f'c = 15$ MPa establecido en las NTCC 2020.

2.2 Caracterización química y metalográfica

2.2.1 Procedimiento

En esta etapa se caracterizaron piezas representativas del estribo tradicional (EA), estribo flejeado en espiral (EFE) y varilla de acero del estribo (VA), antes de someterlos al deterioro por corrosión. Por tal razón, se buscó identificar tanto las propiedades químicas y físicas del acero de los estribos en estudio.

El proceso de caracterización se llevó a cabo mediante el análisis químico, la metalografía y la Microdureza por Vickers.

2.2.2 Análisis químico del acero

Para esta prueba se usó la técnica de Espectroscopía de Emisión Atómica (conocido como arco y chispa). Se realizó bajo los criterios de la norma ASTM E-109 (ASTM E-109, 2003) con decapado apegado a la ASTM E407. En las pruebas de caracterización química del acero del EA (G 60) y del EFE y se aplicó DRX (rango 50-2θ, tamaño de paso 0.02, rango 250 cm, resolución 4 y número de escaneos 32) para conocer la estructura cristalina de las fases, FRX en la identificación de los elementos microscópicos y microscopía de emisión atómica (AES) para conocer la composición química del acero acorde a ASTM-A370, ASTM 8/E8M-09, ASTM-C39/C39-18, ASTM-C617/C617M-15. En la Tabla 2 se muestra la composición química del acero empleado.

Tabla 2. Composición química (% por peso) de los estribos EA, EFE y de varilla VA.

Elemento	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	P	Mo	Cu	Al	Co	V
EA (SAE 1016)	0.140	0.336	0.924	0.013	0.028	0.009	0.015	<0.001	0.012	<0.001	0.005	0.010
EFE (SAE 1006)	0.060	0.201	0.362	0.008	0.044	0.033	0.011	<0.001	0.038	<0.001	0.008	<0.001
VA (SAE 1018)	0.170	0.273	0.972	0.017	0.031	0.004	0.016	<0.001	0.037	<0.001	0.009	<0.001

2.2.3 Metalografía (identificación de fases)

En esta prueba se determinó la microestructura de la sección transversal con los contenidos de las fases ferrita y perlita del EA, EFE y VA.

Para realizar el pulido de los especímenes hasta llegar a un acabado espejo, las muestras fueron colocadas en un polímero que fue el soporte de manipulación, para después desbastarlos con papel silicio con diferentes tamaños de grano: 80, 240, 320, 360, 800, 1200 y 2400, utilizando una desbastadora Metallographic Grinder. Después, se pulió en un paño usando una pasta de diamante de 6 μm , 3 y $\frac{1}{4}$ como abrasivo y para evitar residuos, los residuos fueron sometidos a un baño ultrasónico.

Se analizaron 3 muestras de cada tipología de estribo y de la varilla del estribo tradicional, previamente pulidas, después fueron atacadas químicamente utilizando como reactivo NITAL al 2% (2% HNO_3 + 98% alcohol etílico) para revelar las fases (de acuerdo con ASTM E407). Posteriormente, las muestras fueron observadas en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), JEOL JSM 6510-LV.

2.2.4 Microdureza

En este estudio se analizó la dureza microestructural de los dos tipos de estribos y de varilla soldada a los estribos, para verificar el cumplimiento de las especificaciones acorde a las normas ASTM E384, ASTM E92, ISO 6507, lo cual sirvió como un indicador de la posible resistencia mecánica que puede alcanzar el acero ante las deformaciones plásticas provocadas por cargas portantes.

Para llevar a cabo este estudio se realizó, previamente, el pulido de un acabado espejo en las muestras, tal como se indicó en la sección anterior. Una vez pulidas, se realizaron incisiones sobre la sección de los estribos a analizar con la ayuda de un durómetro marca NAWAGE programado para aplicar una carga de 9.807 N en un tiempo de 15 s.

2.3 Elaboración de especímenes de concreto

Se elaboraron 60 especímenes de concreto con acero embebido, con las dos tipologías de estribos, (véase detalle en Figura 2). Para esto se cortaron 30 piezas de estribos de 9 cm de longitud (15 por cada tipo de estudio) y se cortaron 30 piezas de varillas de 15 cm de longitud soldadas a los dos tipos de estribos (15 por cada tipo). Enseguida, se siguió con el procedimiento de limpieza química acorde a la ASTM G-1 (ASTM G-1, 1999). Después, se realizó un corte en uno de los extremos para colocar el conductor eléctrico. Posteriormente, las piezas de acero fueron pesadas, identificando el área expuesta y protegiendo del resto de la superficie con pintura epóxica. De acuerdo con el diseño de experimentos, se duplicó la cantidad de especímenes debido a que se usaron dos condiciones en el diseño mezclas. La primera fue un concreto simple como referencia y la segunda con un concreto con incorporación de cloruros en el agua de la mezcla, para lograr una concentración de cloruros superior al 2% con respecto al peso de cemento usado.

Después de la elaboración de especímenes, acorde a ASTM C 192/C 192 fueron colocados en el cuarto de curado a $\pm 20^\circ\text{C}$ con un RH de 95% durante 24 h y luego fueron desmoldados y curados a $\pm 20^\circ\text{C}$ con un RH de 100% durante 28 días. Estos especímenes fueron destinados para las pruebas electroquímicas de resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

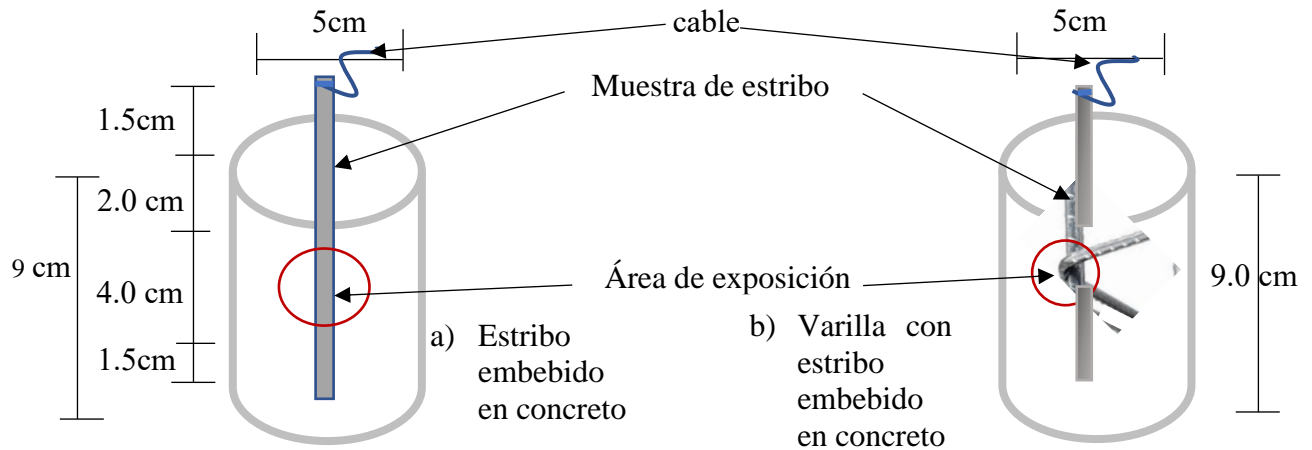


Figura 2. Detalle de especímenes de concreto con acero embebido.

Adicionalmente, se elaboraron 15 cilindros de concreto de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura para pruebas mecánicas con edades de 3, 7, 14, 28 y 56 días para cada condición de diseño de mezcla. Así mismo, se elaboraron 5 cilindros de concreto para determinar algunos indicadores de durabilidad del concreto.

Para la identificación de los especímenes durante la evaluación electroquímica se usó la nomenclatura que se señala en la Tabla 3.

Tabla 3. Nomenclatura de especímenes de concreto con acero embebido.

Especímenes sin cloruros (o de Referencia)	Especímenes con cloruros
Estribo tradicional de alambión, REF-EA	Estribo tradicional de alambión, EA-CL
Estribo flejeado en espiral, REF-EFE	Estribo flejeado en espiral, EFE-CL
Varilla con estribo tradicional, REF-VA	Varilla con estribo tradicional, VA-CL
Varilla con estribo flejeado, REF-VEFE	Varilla con estribo flejeado, VEFE-CL

2.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión

Para esta prueba se elaboraron 12 cilindros de concreto de 10x20 cm (diámetro x longitud), para dar seguimiento y verificar la resistencia a la compresión mínima de diseño a los 28 días y 3 cilindros restantes a los 56 días, acorde a la ASTM-C1152, ASTM 39. Se utilizó una máquina universal Instron 600 DX con una carga constante aplicada de 210 kgf/s. La resistencia a la compresión considerada fue de $f'_c=20$ MPa, acorde a la ASTM C-39 y ASTM C-1231 y NTCC 2020, cumpliendo con el requerimiento mínimo de $f'_c=15$ Mpa para castillos de mampostería confinada.

2.3.2 Determinación de índices de durabilidad del concreto

En relación con la determinación de los índices de durabilidad del concreto elaborado, se ha considerado realizar pruebas físicas no destructivas y/o semidestructivas.

2.3.3 Resistividad eléctrica del concreto

De la prueba electroquímica de EIS se obtiene la resistencia eléctrica del concreto y se incorpora en la expresión:

$$\rho = \frac{R_{conc}(2\pi)(L)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{-----(1)}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica del concreto, $k\Omega \cdot \text{cm}$.

R_{conc} = Resistencia eléctrica del concreto, Ω .

L = longitud la zona de estudio, cm .

r_1 = radio del acero, cm .

r_2 = radio del espécimen de concreto, cm .

Nota: Para el caso del EFL, r_1 = espesor de la muestra del EFE, cm .

En esta prueba se identificó el comportamiento del concreto ante el flujo de corriente eléctrica, mostrando aspectos del concreto como su microestructura, porosidad y grado de saturación.

Adicionalmente, se usó un equipo Resipod proceq acorde a ASTM-C 1152 y RILEM TC-154-EMC. Las mediciones se realizaron en 2 especímenes de 10x20 cm con los dos diseños de mezcla de concreto, con una programación de los 28, 56 y 90 días.

La resistividad eléctrica del concreto fue de 2.6 $k\Omega \cdot \text{cm}$, a los 21 días en especímenes con la condición de cloruros aplicados en el diseño de mezcla. Siendo esta $\rho < 5 k\Omega \cdot \text{cm}$, clasificado como un concreto con muy alta tasa de corrosión, poroso y permeable acorde a la ACI 318.

2.3.4 Contenido de cloruros

Esta prueba se realizó para determinar cuantitativamente el contenido de cloruros que ingresan en el concreto y con ello predecir el nivel de impacto en la durabilidad. Se aplicó la norma ASTM/C 1152 M-4 con el método estándar para análisis de cloruros totales. Al final del ensayo de determinación de la resistencia a la compresión a 28 días, se tomaron muestras de polvo de especímenes expuestos a cloruros (condición de daño al extremo). Posteriormente, se preparó el material con una solución de ácido nítrico con agua, 2.0 g/l. Enseguida, las muestras se enfriaron y se procedió a la medición en el equipo Titulador Metrohm a los 28, 56 y 90 días.

La concentración de cloruros totales (con incorporación de cloruros en la mezcla) y acero embebido, en la condición de concreto con incorporación de cloruros en la mezcla a los 28 días fue superior a 2.0%, valor superior al permitido de 0.15 % acorde a la ACI 318.

2.3.5 Permeabilidad del concreto

En esta prueba semidestructiva rápida se buscó identificar la permeabilidad del concreto ante el ingreso de iones cloruros. Para ello, se prepararon 3 muestras extraídas de los especímenes de concreto de 10x20cm, con cortes de 5 cm de altura, y se siguió el procedimiento experimental acorde a la ASTM C 1202.

Una vez preparadas las celdas fueron conectadas a los canales del equipo Proove it y se corrió la prueba, aplicando una carga constante de 60V durante 6 h. Finalmente, se determinaron los valores



de temperatura, carga eléctrica respecto al tiempo y nivel de permeabilidad del concreto ante el ingreso de iones cloruros.

Con esta prueba el concreto con la condición de cloruros incorporados en el diseño de mezclas medidos a los 28 días, con una carga eléctrica de 5,302 C, quedó clasificado como un concreto de alta permeabilidad con grado elevado de porosidad en la matriz cementante.

2.3.6 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Esta prueba no destructiva se realizó de acuerdo con la ASTM C1240, para la identificación, de manera predictiva, de la resistencia del concreto incluyendo algunas características físicas de los agregados, y/o algún parámetro de los proporcionamientos de los componentes. Para ello se identificó la velocidad de propagación de pulsos de onda de tensión longitudinal emitidos por un transductor electroacústico que se mantiene en contacto con el concreto que después de recorrer la muestra de concreto, estos pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor situado a una distancia de la transmisión del primer transductor; el tiempo de tránsito se mide electrónicamente y la velocidad del pulso ultrasónico se puede establecer dividiendo la distancia de los transductores entre el tiempo de tránsito. Para realizar la prueba se usó el equipo Pundit Lab, con dos transductores. Las edades programadas para la medición fueron 28, 56 y 90 días.

Los resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días en los especímenes fueron de 4662 m/s en un tiempo de 42.4 s, confirmando que la matriz cementante es porosa, con alto grado de permeabilidad que permite el fácil ingreso de iones cloruro.

2.4 Condiciones de exposición a cloruros

Como es sabido, en condiciones ambientales normales, la velocidad de ingreso de los iones cloruros en el concreto es lenta, lo cual puede llevar años la medición de la evolución del deterioro. Por ello, se usó un proceso de aceleramiento de la corrosión mediante la colocación de los especímenes en ciclos de inmersión parcial en solución con cloruros con una concentración de 35 g/l por 3 días, seguido de un secado de 4 días en horno a 40° C.

2.5 Mediciones electroquímicas

Después de haber curado los especímenes por 24 h se les realizó la medición electroquímica LPR usando el potencióstato AMETC PARSTAT, en un rango de corriente 20mA, frecuencia inicial 100000Hz, frecuencia final 0.1Hz, amplitud 20 mVRMS, 30 y 10 puntos por década. Para esta prueba se empleó un saturated calomel electrode (SCE).

La medición se realizó a 3 especímenes de concreto elaborados con cada serie empleando las dos tipologías de estribos, con una programación de 3, 7,14 y 28 días (etapa de curado) y se dio seguimiento con una programación de medición general de todos los especímenes cada 30 días (véase Figura 3).

Con esta técnica se identificaron las etapas de la corrosión en el acero (inicial, despasivación y propagación). Con la técnica LPR se ha obtenido el potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistencia a la polarización (R_p), que se ha incorporado a la ecuación de Stern- Geary y para obtener la densidad de corrosión del acero, o i_{corr} (eq. 2) (ASTM C-876, 2000) y (Andrade *et.al.*, 1999).



$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \text{-----(eq. 2)}$$

Donde

i_{corr} : Densidad de corriente, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

B: Pendiente anódica-catódica, mV.

R_p : Resistencia a la polarización, $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Los valores de B se asignan de acuerdo con el valor E_{corr} obtenido en la prueba de RPL, para estado pasivo, > -270 mV SCE será de $B=52$ mV, en tanto que para el estado activo de $B=26$ mV con valores de $E_{corr} < -270$ mV SCE.

Por otra parte, la medición de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), de acuerdo con la ASTM G-106, permitió identificar la resistencia a la corrosión o resistividad que ofreció la matriz cementante.

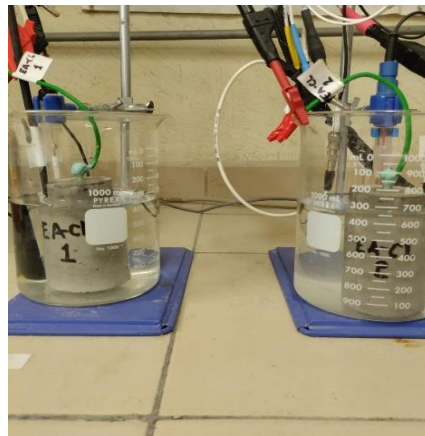


Figura 3. Detalle de la aplicación de pruebas electroquímicas a los especímenes.

3. RESULTADOS

3.1 Metalografía (identificación de fases)

En la Figura 4 se puede ver la microestructura de la sección transversal con las fases ferrita-perlita propias de cada espécimen de acero, tanto de los estribos EA y EFE, así como de la varilla VA.



Figura 4. Distribución de las fases ferrita-perlita en los estribos a) EA y b) EFE, así como de la varilla c) VA.

Como se observa en la Figura 4, la microestructura de la sección transversal contiene las fases ferrita-perlita propias de cada espécimen de acero, tanto de los estribos EA y EFE, así como de la varilla VA. En esta última, al disminuir la cantidad de ferrita existe la tendencia a contener martensita característica durante el proceso de temple del acero, lo cual mejora el comportamiento de resistencia de la sección transversal ante la corrosión y por consiguiente mejora la ductilidad en la resistencia mecánica (Rivera *et.al.*, 2017), (Guzmán, 2013) y (Quiroz *et.al.*, 2019).

3.1.1 Caracterización metalográfica

En la Tabla 4, se muestra el tipo de grano, el tamaño y los porcentajes de las fases que contiene cada espécimen del acero empleado, acorde a la normativa ASTM E-112. Se puede identificar que el estribo EFE contiene mayor cantidad de ferrita en comparación con EA y VA. Respecto a los contenidos de perlita es mayor la cantidad en VA, siendo característicos durante el proceso de templado (Khoma *et.al.*, 2018) y (Mnoka *et.al.*, 2024).

Tabla 4. Caracterización metalográfica de los especímenes de acero.

Espécimen	Granos	Tamaño	Diámetro	Ferrita	Perlita
E1-EA	Ligeramente alargados	9.0	22.40 μm	90%	10%
E2-EFE	Equixiales	8.5	19.15 μm	95%	5%
E3-VA	Ligeramente alargados	8.0	15.90 μm	85%	15%

3.2 Microdureza

En la Figura 5 se observa la microdureza de los estribos EA y EFE y la varilla VA en la sección transversal. La línea horizontal punteada indica el límite para diferenciar como dureza baja (<240 HV) y dureza media (>240 HV) según lo establecido en la norma ASTM E-384.

Las incisiones del EFE fueron muy similares durante la prueba y permitieron clasificar la microdureza como baja. Caso contrario, en el EA las incisiones 1-6 y 9-10 lo ubicaron con microdureza baja; en tanto las incisiones 7-8 le dieron una pequeña variante de microdureza media. Finalmente, las incisiones en VA correspondieron a una microdureza media. Estos resultados dan a conocer el posible comportamiento del EA, EFE y VA frente a la corrosión. Como se describirá más adelante, durante la etapa de propagación, el EFE presentó una menor resistencia al deterioro provocado por la corrosión comparada con la VA. Esto podría indicar que el EFE tiende a presentar menor durabilidad en un proceso de corrosión prolongada.

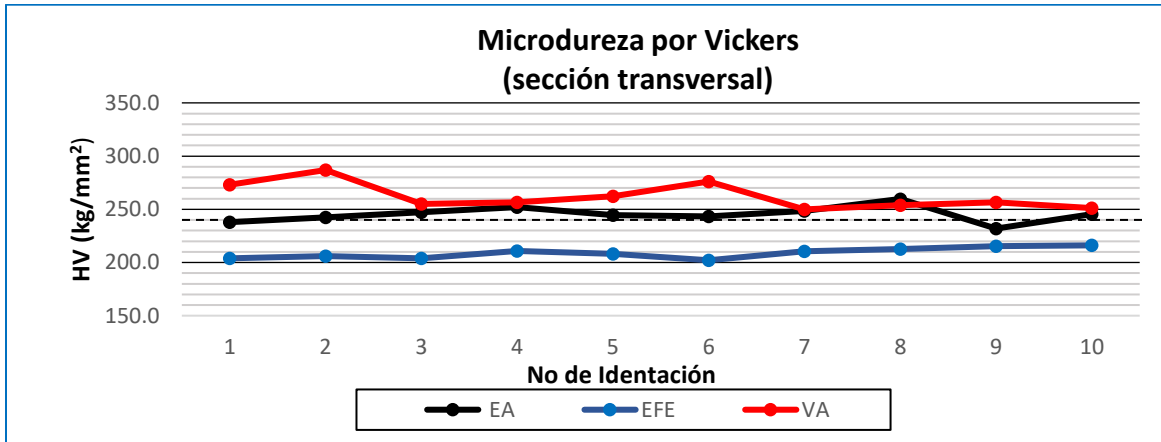


Figura 5. Microdureza por Vickers obtenida de EA, EFE y VA.

3.3 Potencial de corrosión, Ecorr

Como se muestra en las Figuras 6 y 7, desde la elaboración de los especímenes hasta los 28 días de curado los especímenes REF-EFE y REF-VEFE presentaron condiciones de baja probabilidad de corrosión con Ecorr más positivo a -270 mV comparados con los especímenes REF-EA y REF-VA que se ubicaron más negativos a la frontera de -270 mV y -720 mV. No obstante, después de los 60 días el Ecorr se movió a valores más negativos en los especímenes con EFE, siendo notoria una mayor probabilidad de corrosión, dando cabida a la etapa de despasivación e iniciación de la corrosión en el acero (Andrade *et.al.*, 1990).

En contraste, los especímenes de concreto con acero embebido con la condición de incorporación de cloruros en la mezcla EA-CL, EFE-CL, VA-CL y VEFE-CL, desde la etapa de curado, presentaron valores superiores al umbral de -798 mV, con una tendencia superior a la alta probabilidad de corrosión, la cual fue en aumento tan pronto avanzó la prueba LPR. De igual manera, en la etapa inicial los especímenes con EFE presentaron mejor comportamiento electroquímico frente a la corrosión, lo cual corresponde a un estado activo de corrosión de acuerdo a la ASTM C876.

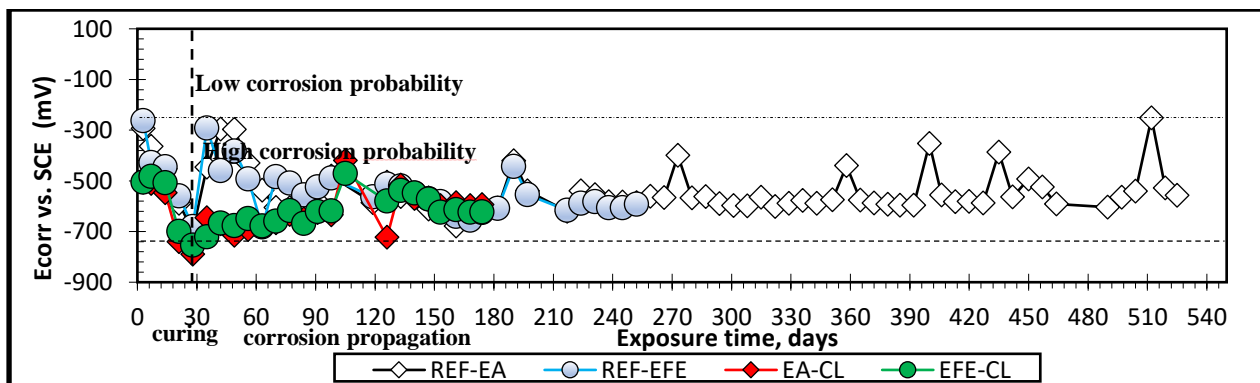


Figura 6. Seguimiento del Ecorr vs SCE, en especímenes de concreto con estribos de acero embebidos.

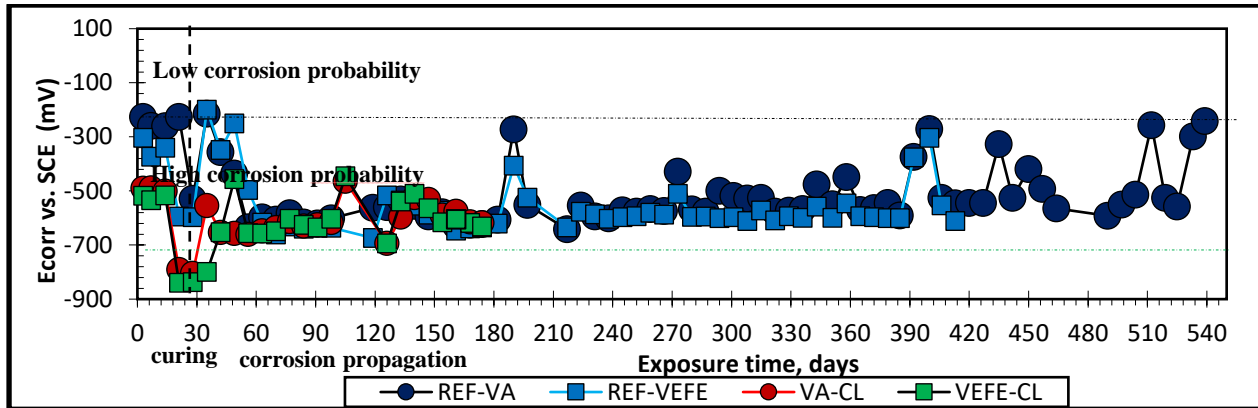


Figura 7. Seguimiento de Ecorr vs. SCE, en especímenes de concreto con estribos de acero embebidos y soldados a la varilla.

3.4 Densidad de corrosión, icorr

En las Figuras 8 y 9, se observa la evolución de la tasa de corrosión, icorr, en los especímenes de concreto con las dos tipologías de estribos de acero embebido. A los 3 días de curado los estribos REF-EA, REF-EFE, REF-VA y REF-VEFE se ubicaron en una despreciable tasa de corrosión con valores $<0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ debido a que la matriz cementante se encontraba en etapa de estabilización por el proceso inicial de curado. En esta etapa la actividad química y física del concreto promovió un ambiente de alta alcalinidad y por consiguiente la pasividad del acero como medida de protección.

Posteriormente, hasta los 28 días de curado, los especímenes de referencia antes indicados presentaron valores de 0.50, 0.38, 0.77 y $0.41 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, en todo caso inferiores $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a e, quedando ubicados en la zona de moderada corrosión, siendo más notoria la tendencia del deterioro en los estribos tradicionales EA.

Por otra parte, en esta edad, los especímenes de concreto EA-CL, EFE-CL, VA-CL y VEFE-CL con la condición de incorporación de cloruros en la mezcla, los valores de icorr fueron de 4.69, 3.36, 30.78 y $13.68 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente, lo cual corresponde como esperado a una tendencia de alta corrosión. En esta etapa también se logró determinar que la densidad de corriente es mayor en el estribo tradicional.

Caso contrario, en las cuatro series de especímenes con la condición de incorporación de cloruros, durante los 28 días de curado, los valores de la tasa de corrosión del acero han sido elevados, con valores $>1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En efecto, debido a las condiciones del concreto la etapa de iniciación fue prácticamente nula; pasando a la etapa de propagación.

Cabe señalar que a partir de los 180 días dio inicio la etapa de propagación de la corrosión en los especímenes de concreto sin cloruros en la mezcla, siendo los especímenes con EFE con una velocidad mayor que los que contenían el estribo tradicional.

Para el caso de los especímenes de concreto con cloruros en la mezcla el proceso de propagación empezó a los 60 días, en tanto que en los especímenes de concreto sin cloruros en la mezcla fue a partir de los 180 días. En las dos condiciones de concreto los especímenes EFE tuvieron un icorr mayor que el presentado en el estribo tradicional.

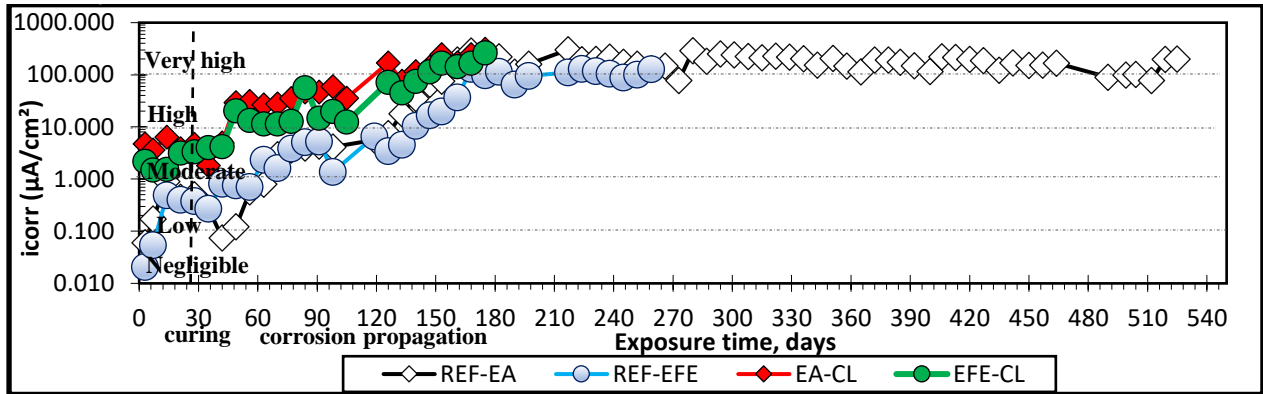


Figura 8. Medición de densidad de corrosión, $icorr$, en especímenes de concreto con estribos de acero embebidos.

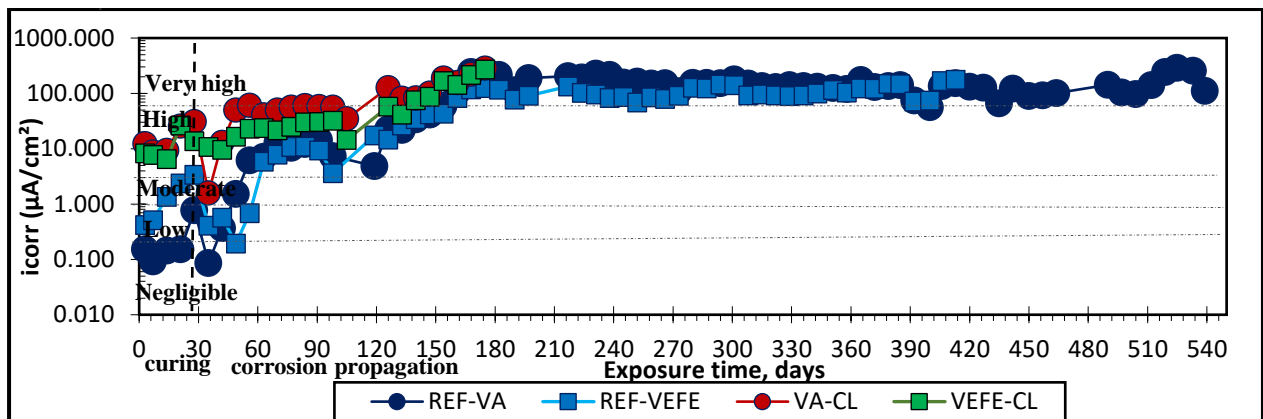


Figura 9. Medición de densidad de corrosión, $icorr$, en especímenes de concreto con estribos de acero embebidos y soldados a la varilla.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Primeramente, en la evaluación de la durabilidad del concreto reforzado se ha determinado que el concreto es altamente poroso o altamente permeable debido a la relación a/c de 0.75 usada en el diseño de la mezcla, a pesar de alcanzar la resistencia a la compresión de 20 MPa.

También el concreto presentó una tendencia de alto nivel de corrosión, con una resistividad eléctrica baja de $2.5\ k\Omega \cdot cm$ inferior a $5\ k\Omega \cdot cm$, de acuerdo con la ASTM-C 1152 y RILEM TC-154-EMC.

Adicionalmente, se corroboró la condición desfavorable de durabilidad con el valor de la velocidad de pulso ultrasónico de 4662 m/s y una concentración de cloruros cercana a 2.0% (Zhou *et.al.*, 2017) y (Whong *et.al.*, 2022).

Durante la evaluación electroquímica los valores E_{corr} e $icorr$, son importantes como aspectos de durabilidad, los cuales permiten inferir el probable comportamiento y vida útil de las estructuras de concreto reforzado (Andrade *et.al.*, 1996) y (Fajardo *et.al.*, 2009). En esta investigación con la técnica LPR de las dos tipologías de estribos y las varillas soldadas a las dos tipologías de estribos, usando el diseño de mezcla con la incorporación de cloruros y sin cloruros permitió identificar la etapa de despasivación del acero.

Como se muestra en la Figura 10, el umbral de cloruros en los especímenes REF se incrementó después de los 28 días hasta los 60 días, que fue cuando la fase de iniciación terminó y dio paso al presencia de la despasivación del acero. El umbral de cloruros al ser un valor que depende de la cantidad de cloruros necesaria para despasivar el acero, al obtenerlo coadvuyó a determinar el tiempo en que los estribos EFE y EA presentaron el avance del deterioro por corrosión en etapa de despasivación. Por tal razón, se encontraron las cantidades de concentración de cloruros que ingresaron en las cuatro series de especímenes.

En ese intervalo de tiempo los especímenes REF alcanzaron valores ligeramente mayores a 0.40% de Cl^- % por peso del cemento, remarcado con línea punteada en la figura 10, que es el máximo contenido permitido en el diseño de estructuras de concreto reforzado sometido a ambientes agresivos o costeros, tal como han señalado otros investigadores (Castro-Borges, 2020), (Alonso, *et.al.*, 2000), (Rivera, 2016) y (Sohail *et.al.*, 2020).

En esta etapa el REF-EA presentó el valor más crítico de ingreso de cloruros de 0.50% de los cuatro especímenes analizados y el REF-EFE presentó el valor menor de 0.43%. Este resultado dio a conocer que el REF-EA presentó primero la despasivación en comparación con REF-EFE, debido a las reacciones químicas con el concreto, teniendo una cantidad relativamente menor en el % por peso de Cr, Ni y Cu, siendo más susceptible a la corrosión en comparación con REF-EFE.

En tanto que en los especímenes con varillas y estribos soldados, el REF-VA presentó un contenido de Cl^- % de 0.45% muy cercano al REF-VEFE de 0.46%.

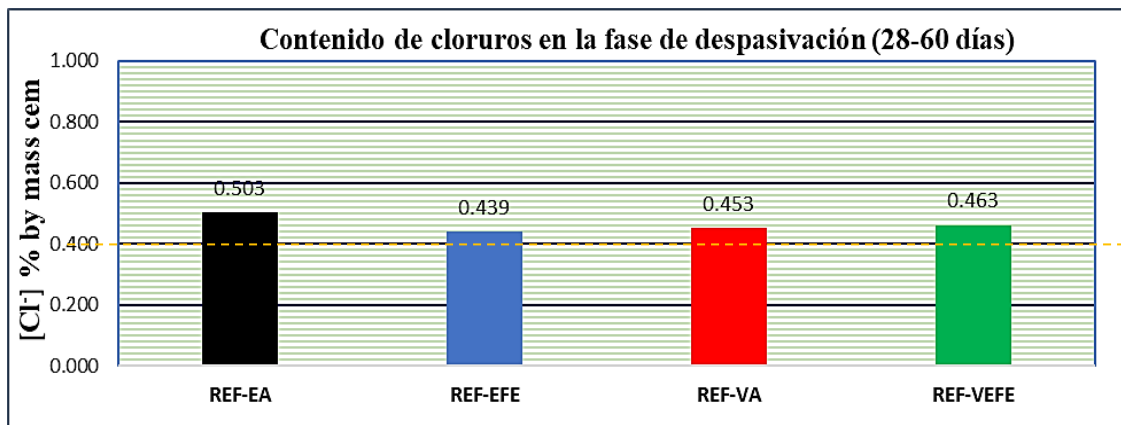


Figura 10. Concentración de cloruros en la interfaz acero-concreto de especímenes REF con estribos embebidos en concreto, rel a/c 0.75, a partir de la etapa final del curado.

Cabe enfatizar que el ingreso de iones cloruros provocó la despasivación del acero resultando más evidente en los especímenes con estribo tradicional (EA). En esta fase, la interfaz acero-concreto mostró mayor deterioro inicial en el EA comparado con el EFE, lo cual se pudo comprobar con los resultado de LPR y la exploración visual al abrir los especímenes y extraer el acero.

Por otra parte, cabe destacar que las series VA y VEFE mostraron una ligera mejoría de resistencia a la corrosión durante la etapa de transición entre la despasivación y propagación (60-120 días) debido a la presencia de una mayor área del acero al estar soldado el estribo con la varilla, lo cual favoreció a un mejor comportamiento de durabilidad del acero ya que retrasó parcialmente la velocidad de corrosión en dichas tipologías de estribos

Respecto a las mediciones electroquímicas, en la etapa de iniciación de la corrosión, en concretos con cloruros, el EFE mostró un mejor comportamiento de resistencia a la corrosión con E_{corr} más

positivo a los -270 mV y un i_{corr} inferior a -1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}$ en comparación con EA y con VA que presentaron una tendencia de mayor deterioro. Lo cual permitió, en ese momento clasificar al EFE como un acero con baja velocidad de corrosión ante un ambiente de alto contenido de cloruros.

Con dichas condiciones desfavorables en la durabilidad del concreto, se encontró que el acero de refuerzo transversal EA presentó una velocidad acelerada de la corrosión en su superficie, con una despasivación rápida comparado con EFE, siendo muy corta la etapa inicial, para luego ubicarse en la etapa de propagación de la corrosión, como lo han visto otros autores (Andrade *et.al.*, 1999), (Fajardo *et.al.*, 2013) y (Castro *et.al.*, 2020).

Dicho comportamiento electroquímico del EFE se debió a la composición química del acero que contiene una relativa cantidad mayor de cromo, lo cual favoreció a una mejor resistencia a la corrosión comparado con EA. Por consiguiente, la cantidad de ferrita (95%) prolongó un poco más la etapa despasivación al estar desarrollando su función anódica, (Sohail *et.al.*, 2020) y (Sarkar *et.al.*, 2005)

No obstante, como se observa en la figura 11, en la etapa de propagación los componentes químicos, la cantidad de perlita y la metalografía del EFE intervinieron en promover el incremento de la velocidad de corrosión antes que los especímenes EA. Esto se verificó al medir las pérdidas de la sección transversal y encontrar valores cercanos al 30%, lo cual también ha sido visto por (Rivera *et.al.*, 2017), (Juarez *et.al.*, 2011) y (Chang *et.al.*, 2014).

La pérdida de la sección del acero se debió a la disminución de la cantidad de ferrita durante el proceso de propagación de la corrosión, principalmente en el EFE. Posteriormente, el problema de disminución de sección se presentó en el EA y luego en las VEFE y VA, lo que se debió a la presencia de mayor contenido de ferrita (10% y 15%, respectivamente) que le dotó de una mejor durabilidad y resistencia al deterioro por corrosión, acorde a ACI 318, tal como informó otro autor (Rivera, 2016).



Figura 11. Deterioro en especímenes de acero embebidos en concreto, con el diseño de mezcla, con cloruros, durante la etapa de propagación de la corrosión: a) serie EA- CL, b) serie EFE-CL, c) serie VA-CL, d) serie VEFE-CL.

Nótese en la Figura 11 que el EFE, en la etapa de propagación, presentó un deterioro más avanzado frente a la corrosión por cloruros en comparación con el EA, al perder mayor sección transversal. En el caso de los especímenes de varillas VA y VEFE unidas a los estribos mediante soldadura, ofrecieron una mejor resistencia al deterioro por corrosión debido a las características químicas y metalográficas del SAE 1018 en comparación con las dos tipologías de estribos SAE 1016 y SAE

1006. Dicho resultado favorece a la durabilidad de estructuras de concreto, tal como han mencionado algunos autores (Zhu *et.al.*, 2017), (Abd-Elhamed *et.al.*, 2019) y (Youssef *et. al.*, 2019).

Para el empleo del EFE, como nueva tipología de estribos en el refuerzo transversal de la mampostería confinada y que tenga condiciones adecuadas de durabilidad (Alvarez *et.al.*, 2023), (Trejo *et.al.*, 1994) y (James *et.al.*, 2019) ante la corrosión (Fajardo *et.al.*, 2006), (Juarez *et.al.*, 2011) y (Landa *et.al.*, 2022), se sugiere un realizar un adecuado diseño de la mezcla con rel a/c de al menos 45, y usar la sustitución parcial del cemento Portland Ordinario (CPO). Para esto se sugiere la sustitución del 20% por puzolanas naturales (Castro *et.al.*, 2020), (Fajardo *et.al.*, 2009) y (Fragoso *et.al.*, 2021). Otras alternativas de sustitución pueden ser empleando ceniza volante (Landa *et.al.*, 2022) o empleando ceniza volante o bien usando como precursores metacaolín y carbonato de calcio, según (Vásquez *et.al.*, 2019).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la corrosión de el estribo en espiral flejeado (EFE) comparado con el estribo tradicional (EA), así como las varillas unidas a dichos estribos (VA y VEFE) llegando a establecer las siguientes conclusiones:

- Todos los especímenes elaborados, con el diseño de mezcla rel a/c=0.75, presentaron las mismas propiedades de durabilidad: el concreto fue altamente poroso, permeable, con una tendencia de alto nivel de corrosión y alto riesgo para la seguridad estructural, con una baja resistividad de 2.5 kΩ*cm, con una VPU de 4662 m/s y una Cl⁻ % del peso del cemento de 2% superior a los permisible de acuerdo con la ACI 318 y con la ASTM C-1218/C 1218M-93.
- El seguimiento del Ecorr e icorr en los especímenes de concreto con acero embebido, mediante las técnicas LPR y EIS, permitió identificar la fase de iniciación de la corrosión y despasivación del acero, para que luego se identificara el umbral de cloruros en los especímenes de acero.
- En la etapa inicial y despasivación el estribo flejeado en espiral (EFE) en las dos condiciones de concreto y presentó una ligera mejoría en el comportamiento frente a la corrosion comparado con el estribo tradicional (EA).
- Respecto al umbral de cloruros, en la fase de despasivación comprendido entre los 28 días y los 60 días, con un icorr > 1μA/cm², el EFE presentó una mínima mejoría en su resistencia al deterioro ocasionado por el ingreso de cloruros libres en la interfase concreto- acero, en comparación con el EA. Destacando el EFE con un Cl⁻ % del peso del cemento de 0.4% cercano al límite permitido de acuerdo con la normativa. En tanto, que el Cl⁻ % del peso del cemento en VEFE y VA fue similar con valores relativamente mayores a 0.4%.
- En contraste, el EA durante la etapa de propagación, con un icorr > 10 μA/cm², en una edad de 60 a 120 días, presentó una relativa estabilidad en la velocidad de corrosión respecto al EFE, el cual tuvo un proceso más acelerado de corrosión, con un Cl⁻ % del peso del cemento > 0.4%. De igual manera el VEFE presentó mejor estabilidad en el icorr durante la etapa de iniciación en comparación con los VA, pero en la etapa de propagación se incrementó el valor en VEFE.



- Los resultados de la velocidad de corrosión en los EFE se incrementaron más, en la etapa de propagación, que en los EA debido a la presencia de mayor cantidad de ferrita que perlita, ya que actuó como ánodo. Esto se pudo verificar con la composición química y los valores de baja microdureza del EFE.
- Para mejorar la resistencia del EFE ante la corrosión provocada por cloruros y retardar la etapa de despasivación, se sugiere un adecuado diseño de la mezcla del concreto empleando materiales suplementarios con respecto al cemento portland ordinario con una relación a/c de al menos 0.45, lo cual puede brindar mejores resultados de durabilidad en la construcción con mampostería confinada.

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación descrita en este trabajo fue financiada por los Proyectos CB-2016/285453 y IT1765-21. A. Capistrano-García agradece a CONAHCYT por la beca No 1015246 otorgada para su formación de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción de la FIC UANL. De igual manera, agradece al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA) de la UANL por las facilidades proporcionadas para realizar los ensayos metalúrgicos y al Dr. José Ángel Cabral Miramontes por su atención y asesoría en dichos ensayos. Se agradece también a grupo DEACERO por el material (EFE) facilitado para realizar el estudio experimental. Así mismo, el agradecimiento a la UAGro por las facilidades brindadas para realizar los estudios del doctorado y un agradecimiento especial a ALCONPAT para la difusión de este artículo científico.

7. REFERENCIAS

- Abd-Elhamed, M., Owida, M. (2020). *Effect of stirrups densification on ultimate capacity of rectangular reinforced concrete columns*. Structures, 728-764. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.016>
- ACI-308-92: *Estándar Practice for Curing Concrete*.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P. (2000). *Chloride threshold values to despassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research, 30, 1040-1055. Obtenido de PII:Sooo8-8846(00)00265-9. (2000)
- Andrade, C., Alonso, M, González, J. (1999) “*An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability*”. Symposium on corrosion rates of Steel in concrete, ASTM. Philadelphia P.A..pp 29-37
- Álvarez, J., Mesa, M., Chávez, J., Terán, B., Hermosillo, R. (2020). Estudio en estribos flejeados en castillos cortos para mampostería confinada. (X. C. Estructural, Ed.) *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. <https://www.researchgate.net/publication/349718834>
- Castro, P., Juárez, C., Soto, R., Briceño, J., Fajardo, G., Valdez . (2020). *Effect of corrosion in the transverse reinforcement in concrete beams: Suitable method to generate and measure deterioration*. Sustainability (Switzerland), 12(19). doi:<https://doi.org/10.3390/su12198105>
- Castro-Borges, P. M. (2020). *Influence of climate change on concrete durability in Yucatán peninsula*. Corrosion Engineering, Science and Technology, 45, 61-9. doi:<https://doi.org/10.1179/147842209X12489567719662>.(2010).



- Chang, Yeih., Chang, Huang. (2014). *Effects of stirrups on electrochemical chloride removal efficiency*. Construction and Building Materials, 692–700. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.091>
- Fajardo, G., Valdez, P., Pacheco, J. (2009). *Corrosion of steel rebar embedded in natural puzolan based mortars exposed to chlorides*. Construction and Building Materials, 23 (2), 768-774. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023>.
- Fajardo, G., Escadeilla, G., & Arliguie, G. (2006). *Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by "artificial" sea water*. Corrosio Science(48), 110-125. doi:110-125
- Fragoso, J., & J, V. (2021). *El uso de puzolana de origen natural en concreto hidráulico*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Garcés, F., Climent, M., Zornoza, E. (2008). “*Corrosión de armaduras*”. Edit. ECU. Printed in Alicante Spain.
- James, A., Bazarchi, E., Chiniforiush, A., Aghdam, P., Reza, M. A., & Gohdoosi, F. (2019). *Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced*. Construction and Building Materials, 224, 1026–1039. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.250>
- Juárez, C., Guevara, G., Fajardo, G., Castro, P. (2011). *Ultimate and nominal shear strenght in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion*. Engineering Structures, 31893196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.014>
- Landa, A., Fajardo, G., Cruz, D., & Galván, R. (2022). *Materiales Suplementarios como alternativa para la didminución del fenómeno de corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Nova Scientia, 14(19), 1-15. doi:doi.org/10.21640/ns.v14i29.3027
- Mc.Cafferty, E (2020). *Introduction to corrosion science*, Edit Springer. USA. ISBN 978-14419-0454-6.
- Normas Técnicas Complementarias para diseño construcción de estructuras de mampostería con comentarios 2020 (19 de octubre del 2023). En *Gaceta Oficial de la Ciudad de México* (Vol. No. 454). Ciudad de México.
- Rivera, O (2016). “*Evaluación del estado de degradación de diversos tipos de varilla utilizadas como refuerzo en concretos carbonatados y contaminados con cloruros*”. Nuevo León, México: UANL.
- Rojas, G. (2008). “*Evaluación de estructuras de concreto por corrosión*”. Tecnología en Marcha, 21(4), 69-78.
- Saha, P.,VaraPrasad., L. (2019) *Experimental investigation of reinforced SCC beam-column joint with*. Construction and Building Materials, 171–185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.192>
- Shatarat, N., Kathuda, H., Abdel, M., Alqam, M. (2016). *Experimental investigation of reinforced concrete beams with spiral reinforced in shear*. Construction and Building Materials, 125, 585-594. doi:[hhttps://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.070](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.070)
- Sohail, M., Kaharaman, R., Alnuaimi, N., Gencturk, B. A., Dawood, M., & Belarbi, A. (2020). *Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete*. Construction and Building Materials, 232(117205). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117205>
- Trejo, D., Monteiro, P., & Thomas, G. (1994). *Mechaniical properties and corrosion sseptibility of dual -phase steel in concrete*. 24.

- Vásquez, F., Mendoza, J., Pérez, P., & Escalante, J. (2019). *Comportamiento electroquímico de acero embebido en concreto activado alcalinamente de base metacaolín/adición mineral*. CONPAT 2019, 1. doi:<https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V1CC165>
- Wang, Zhang, Zhang, Maa, & Liu. (2015). Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior. *Construction and Building Materials*, 537–546. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.077>
- Whong, H., Angst, U., Geiker, M., Burkan, O., Elsener, B., Michel, A., Rasol, M. (2022). Methods for characterising the steel–concrete interface to enhance understanding of reinforcement corrosion: a critical review by RILEM TC 262-SCI. *Materials and Structures*. doi:<https://doi.org/10.1617/s11527-022-01961-5>
- Xia, J., Cheng, X., Liu, Q., Xie, H., Zhong, X., Jin, S., Mao, J. (2020). *Effect of stirrup on the transportation chloride removal in concrete structures*. *Construction and Building Materials*, 250 (2020)11 8898. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118898>.
- Youssef, M., Meshaly, M., Elansary, A. (2019). *Ductile corrosion-free-centering concrete elements*. *Engineering Structures*, 184 (2019), 52-56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstructur.2019.01.086>
- Zhang, W., François, R., Wang, R., Cai, Y., Yui, L. (2021). *Corrosion behavior of stirrups in corroded concrete beams exposed to chloride environment under sustained loading*. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121987>
- Zhao, P., Xu, G., Wang, Q., Zhao, J., Liu, L. (2018). *Influence of stirrup arrangements on the corrosion characteristics of Construction and Building Materials*, 683–695. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.144>
- Zhou, H., Liang, X., Zhang, J., Lu, F., Xing, L. (2017). *Variation and degradation of steel and concrete bond performance with corroded stirrups*. *Construction and Building Materials*, 138 (2017), 56-68. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.007>



Análisis de la aplicación de un nanomaterial mesoporoso de partículas de óxido de silicio sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado.

T. Torrez Pérez¹*, T. Torrez Pérez¹, A. Bacelis-Jiménez¹,
W. Talavera-Pech¹, P. F. J. Cano Barrita², T. Pérez López¹

*Autor de Contacto: al056053@uacam.mx

¹ Centro de Investigación en Corrosión, Laboratorio de Concreto,
Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.

³ CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

RESUMEN

Se analiza el efecto de la aplicación de un nanomaterial mesoporoso de partículas de SiO₂ con funcionalización hidrofóbica sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado, con lo que se pretende mejorar las condiciones de curado y obtener un material más durable. Se elaboraron muestras cilíndricas y prismáticas con una relación agua/cemento de 0.57, a las cuales se les aplicó un tratamiento superficial con nanopartículas de SiO₂. Las muestras fueron caracterizadas y analizadas por MEB y EDS, EFRX y RMN. Se evaluó la resistencia a la compresión a los 7, 14, 28 y 90 días de curado. Además, fueron sometidas en cámara de carbonatación acelerada durante 15 días, con humedad relativa de 65 +/- 5%, temperatura de 25 +/- 2 °C y concentración de CO₂ de 3.5 +/- 0.2%. Los resultados obtenidos indican que las propiedades hidrofóbicas con el tratamiento superficial de SiO₂ no tuvieron un efecto positivo en la hidratación del cemento, debido a que no se mantuvo el agua en los poros durante el periodo de curado y la cantidad de agua disponible en las reacciones de hidratación que se llevan a cabo no fue suficiente, por lo que no contribuyó a la disminución de la porosidad ni al aumento en la resistencia a la compresión.

Palabras clave: Concreto; Nanopartículas; Durabilidad; Carbonatación; Superficie.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es la unión de una matriz cementante con un refuerzo, en este caso el acero (Cormac y Brown, 2017). Este material combina las propiedades básicas de resistencia del concreto (compresión) con las del acero de refuerzo (tensión). Su durabilidad y comportamiento están sujetos al proporcionamiento de sus constituyentes, su fabricación (cuidado con el cual se mezclan los diferentes materiales constitutivos), el medio ambiente (condiciones de humedad y temperatura bajo las cuales se mantenga la mezcla desde el momento en que se coloca en los respectivos moldes hasta que se encuentra totalmente endurecida) y de los agentes químicos que inducen a la corrosión del acero, entre otros (Aguilar, 2002). En resumen, para obtener la producción de concretos de altos estándares se requiere un alto grado de supervisión y control por parte de personas con experiencia durante todo el proceso, desde el proporcionamiento en peso de los componentes, pasando por el mezclado y el vaciado, hasta la terminación del curado (Nilson y Darwin, 1997).

El mecanismo de curado juega un papel muy importante en la durabilidad final de estructuras de concreto reforzado (Nilson y Darwin, 1997), debido a que existe una clara influencia del curado interno en el desarrollo de las propiedades del concreto. Por medio de un buen proceso de curado se logra una mejora de las propiedades que hacen referencia a la durabilidad del concreto como por ejemplo menor porosidad, resistencia a la carbonatación, resistencia a la compresión. Además, se reducirían los aditivos agregados a una mezcla de concreto que tengan la función de mejorar la durabilidad, pues se lograría una matriz cementante más compacta y con un mejor desarrollo de sus propiedades, debido a la disponibilidad de agua que tendrá internamente para continuar su proceso de formación (Acero et al., 2005). Sin embargo, la mayoría de las veces el mecanismo de curado no se lleva a cabo de forma eficiente, es decir, no se realiza según lo estipulado por la norma.

Es importante destacar también que, a pesar de ser un material utilizado masivamente por la industria de la construcción, su producción mundial se estima en 20.000 millones de toneladas por año (Balaguru y Chong, 2006; Jafarbeglou et al., 2015), se ha visto que sufre deterioro debido a su interacción con el ambiente, ya sea a corto o largo plazo, provocando la pérdida de durabilidad, aumentando así los costos de mantenimiento y reparación (Morefield et al., 2008; Jo et al., 2007; Shi et al., 2012).

Mantener la durabilidad en las estructuras de concreto reforzado es sumamente complejo, ya que existen agentes externos a quienes se les atribuye principalmente la causa del inicio y propagación de los diferentes tipos de deterioro, tanto en el concreto como en el acero de refuerzo (Bertolini et al., 2004; Salta, 1994). La presencia de humedad, soluciones ácidas, sales o álcalis, originan un proceso de oxidación en el acero de refuerzo, ocasionando una disminución en la vida útil del elemento (Aguilar, 2002).

Como tal, la corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas del mantenimiento y reparaciones en todo el mundo de estructuras de concreto reforzado, como material compuesto (Ligia, 2010). A nivel mundial, se estima que aproximadamente un 40% del total de las estructuras de concreto reforzado deben seguir algún mantenimiento y/o rehabilitación, mientras que el resto debe ser reemplazado por completo. La mayoría de las estructuras de concreto tienen una vida útil de 50 o 100 años. Pero, lamentablemente, se encuentra que muchas de las estructuras actuales no están a la altura de las expectativas, ya que se han deteriorado anticipadamente por varios factores, muchas veces desde la selección de los cementos, la mezcla o el diseño de aplicación; o bien por el deficiente mantenimiento al concreto en los años subsecuentes (RedPREVENIR, 2012).



En lo que al sector de la construcción se refiere, el uso de nanopartículas de silicio se presenta como una opción factible, debido a su alta reactividad con las fases hidratadas del cemento portland, resultando en materiales con propiedades mejoradas e impactando positivamente en la durabilidad y vida útil. Generalmente, la aplicación de las nanopartículas de silicio se lleva a cabo mediante adición o sustitución al cemento portland (Al-Akhras, 2006; Jalal et al., 2012; Moslemi et al., 2014; Liu et al., 2018), cabe mencionar que recientemente se han utilizado en tratamientos superficiales, en donde la cantidad de nanopartículas disminuye drásticamente, respecto a cuando se utiliza como adición o sustitución (Cárdenas, 2006; Cárdenas, 2008; Cruz-Moreno et al., 2020; Vaca-Arciga, 2020). Esto ha despertado el interés por la mejora en las propiedades que le confiere a diversos materiales, debido a que modifica la estructura molecular de los materiales para cambiar sus propiedades intrínsecas y obtener otros con aplicaciones revolucionarias. Se tiene como principal objetivo obtener materiales a una escala nanométrica y, debido a esto, las propiedades fisicoquímicas de los objetos pueden ser moduladas sistemáticamente por la variación del tamaño, facilitando el diseño de nuevos materiales y promoviendo el menor consumo de recursos naturales, razón por la que se ha convertido en los últimos años en uno de los principales y más importantes campos de investigación.

Teniendo en cuenta la importancia de la aplicación de materiales a escalas nanométricas, el presente trabajo se centra en el estudio y análisis del efecto de la aplicación de un nanomaterial mesoporoso de partículas de SiO₂ con funcionalización hidrofóbica sobre las propiedades de durabilidad de muestras de concreto reforzado, con lo que se pretende mejorar las condiciones de curado, siendo este una alternativa viable ya que en la mayoría de los casos el mecanismo de curado no se lleva a cabo según lo estipulado por la norma, por lo cual no se alcanzan los resultados esperados lo que afecta la vida útil de las construcciones que se encuentran en servicio.

2. PROCEDIMIENTO

Tabla 1. Presentación de los valores (corregidos por humedad) de diseño en estado seco para un volumen total de 0.16182639 m³.

Presentación de los valores (corregidos por humedad) de diseño en estado seco para un volumen total de 0.16182639 m³				
Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Agua (L)	Aditivo (L)
61.30 Kg	125.50 Kg	125.80 Kg	34.24 L	0.2452 L

2.1 Colado de especímenes

La mezcla de concreto fue manipulada y homogeneizada con ayuda de una pala metálica. Posteriormente se llenaron los moldes de acero con mezcla. El llenado de los moldes se realizó de acuerdo con lo establecido por la Norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 (Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio).

Se llenó en 3 niveles diferentes, cada uno de los niveles se varilló con una varilla de punta redonda en 25 ocasiones, se golpeó el molde externamente con un mazo de hule para eliminar las oquedades producidas por la varilla y expulsar el aire atrapado.

Tabla 2. Nomenclatura de las muestras de concreto, para ensayos a los 7, 14, 28 y 90 días..

T	Muestras curadas en una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
N	Muestras con tratamiento superficial (nanopartículas mesoporosas tipo MCM-41 funcionalizadas para ser hidrofóbicas).
S/C	Muestras sin curar y sin tratamiento superficial.

2.2 Curado de las muestras (NMX-C-159-ONNCCE-2016)

Las muestras elaboradas se procedieron a desmoldar 6 horas después de su fabricación, posteriormente se curaron en una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante 28 días. Durante el mecanismo de curado se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 7, 14, 28 y 90 días.

2.3 Preparación y aplicación del tratamiento superficial

2.3.1 Suspensión de nanopartículas mesoporosas tipo MCM-41 funcionalizadas para ser hidrofóbicas en etanol al 1 %)

Las nanopartículas mesoporosas tipo MCM-41 funcionalizadas para ser hidrofóbicas fueron sintetizadas según el método previamente reportado por Uc-Fernández, et al., 2022, las cuales fueron adquiridas en el laboratorio de química orgánica y síntesis del Centro de Investigación en Corrosión. Estas se suspendieron en etanol al 1% peso/volumen, la suspensión se realizó por sonicación durante 30 minutos, posteriormente se aplicó la solución con ayuda de una brocha en toda la superficie de las muestras de concreto reforzado poco después de ser desmoldadas, este procedimiento se realizó en el laboratorio de concreto del Centro de Investigación en Corrosión.

2.4 Degradación química del concreto en cámara de carbonatación acelerada

El proceso de carbonatación (degradación química) a condiciones acelerada se llevó a cabo en el laboratorio de concreto en el Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) durante un periodo aproximado de 5 meses, dentro de los cuales 360 horas (15 días) la cámara de carbonatación estuvo en actividad. Las condiciones dentro de la cámara de carbonatación fueron las siguientes: la concentración de CO_2 dentro de la cámara fue de $3.5 + 0.5$ % y la humedad relativa estuvo en $65 + 5$ %.

Para determinar el avance de la carbonatación del concreto se utilizó el método de vía húmeda, haciendo uso de los indicadores acido-base timolftaleína y fenolftaleína.

El procedimiento consiste en realizar a la muestra un corte transversal de aproximadamente 3 cm de espesor, posteriormente se retira todo el material y polvo producido por el corte que se encuentra en la cara interna y finalmente se aplica con un atomizador el indicador ácido-base de forma homogénea. Con la ayuda de un vernier se realizaron tres mediciones de precisión de cada uno de sus lados.

2.5 Análisis de las propiedades mecánicas

2.5.1 Resistencia de compresión

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto permeable, esta depende de la influencia de ciertas variables como los materiales de fabricación, la relación a/c, la manipulación de la mezcla, etc. En este proyecto la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas se determinó a los 7, 14, 28 y 90 días de curado. La resistencia a la compresión se midió ensayando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se calcula según lo establecido por la norma mexicana



NMX-C-083-ONNCCE-2014 y su estándar internacional ASTM C-39-2015 (1).

$$\text{Resistencia de compresión} = \frac{\text{Carga de ruptura}}{\text{Área de la sección que resiste a la carga}} \quad (1)$$

2.6 Análisis de la termodinámica y cinética de la interfase acero-concreto

2.6.1 Medición de Potencial de Corrosión (E_{corr})

El potencial de corrosión de las muestras de concreto reforzado se midió a los 7, 14, 28 y 90 días de curado. La medición del potencial de corrosión es un indicador del estado de probabilidad de que ocurra el fenómeno de la corrosión (Troconis de Rincón et al., 2000).

Las mediciones de potencial de corrosión (E_{corr}) se realizaron con un electrodo de referencia externo de Cobre-Sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), conectado a un multímetro de alta impedancia.

Los valores obtenidos fueron interpretados según la norma ASTM C876 (ASTM, 2009) con lo que se obtiene una estimación de la corrosión en las varillas embebidas en el concreto.

Tabla 3. Potenciales de corrosión como criterio de la condición de la varilla.

Potencial de corrosión (E_{corr}) vs Cu/CuSO ₄	Condición
< - 270 mV	Activa
> - 270 mV	Pasiva
- 220 a -270 mV	Activa o pasiva

2.7 Caracterización y evaluación de muestras de concreto reforzado con propiedades hidrofóbicas

2.7.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS)

Las muestras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido (XL-30 ESEM-JEOL JSM-7600F, JEOL Ltd., Tokio Japón) acoplado un sistema de energía dispersiva en el cual se puede determinar la composición elemental de los materiales por la dispersión de energía de rayos-X (EDS). Las muestras evaluadas fueron pequeños fragmentos de las muestras cortados con la ayuda de una cortadora eléctrica.

2.7.2 Espectroscopia de Fotoelectrón de Rayos X (EFRX)

La Espectroscopia de fotoelectrón de rayos x también es conocida como espectroscopia electrónica de análisis químico (ESCA, por sus siglas en inglés de Electron Spectroscopy for Chemycal Analysis). Las muestras se analizaron con un espectrómetro de rayos X (XPS, K-Alpha, Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.) equipado con una fuente de radiación monocromática Al K-Alpha (1486,6 eV). La energía de paso fue de 50 eV y el tamaño del paso de energía fue de 0,1 eV para el escaneo de espectros XPS, mientras que, para los espectros de estudio, fueron 100 eV y 1 eV, respectivamente. Los espectros XPS se obtuvieron después de pulverizar la superficie de las muestras con una pistola de barrido de iones de argón durante 15 segundos. Los espectros se calibraron estableciendo la línea principal para la señal O1s de oxígeno en óxidos a 530,2 eV.

2.7.3 Resonancia Magnética nuclear (RMN)

Las muestras fueron cortadas con dimensiones de 3.5 x 3.5 x 5cm, haciendo uso de una cortadora de disco, las cuales posteriormente fueron saturadas al vacío con agua desionizada durante 1h y fueron cubiertas con cinta teflón para evitar la pérdida de agua en la muestra.

Se determinaron los tiempos de relajación T2 de RMN por medio del software WinDXP para los tres tipos de muestras. Se utilizó la técnica CPMG (Meiboom y Gill, 1958) de RMN para obtener los decaimientos de la magnetización transversal a partir de las cuales se obtuvieron los tiempos de relajación T2, los cuales brindan información sobre la distribución de tamaños de poros presentes en la muestra y la intensidad de la señal de RMN, cantidad de agua existente en las distintas poblaciones de poro en la muestra de concreto. Se hizo uso de esta técnica para conocer las poblaciones de poros existentes en las muestras que fueron previamente saturadas, utilizando los siguientes parámetros para la técnica CPMG.

Los decaimientos fueron procesados ajustando los datos a una función de decaimiento exponencial para tres componentes (2) para obtener las constantes de decaimiento T2 y las intensidades con que cada componente contribuye a la intensidad total de la señal.

Estas fueron obtenidas haciendo uso del software WinDXP el cual realiza un ajuste del decaimiento por medio de la Transformada Inversa de Laplace (proceso de inversión matemática) (Coates y Xiao 1999, p.53).

$$M(t) = M_{0,1} e^{-t T_{2,1}} + M_{0,2} e^{-t T_{2,2}} + M_{0,3} e^{-t T_{2,3}} \quad (2)$$

Donde $M(t)$ es la magnitud de la magnetización transversal en el tiempo t y M_0 es la magnetización al tiempo 0.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de las propiedades mecánicas

3.1.1 Resistencia de compresión

Comparando los resultados obtenidos de las muestras N y sin curar a los 90 días se observa que las muestras testigo y sin curar presentaron una resistencia a compresión mayor que las expuestas con el recubrimiento, debido a que la humedad relativa en el medio fue favorable, tal como se ha reportado por Powers, 1948, una alta humedad relativa durante la hidratación de los materiales cementantes favorece la resistencia del material de manera que se desarrollen en el concreto las propiedades deseadas. En las muestras con recubrimiento se observaron heterogeneidades superficiales, por las cuales probablemente se tuvo un flujo de agua que no permitió un curado eficiente.



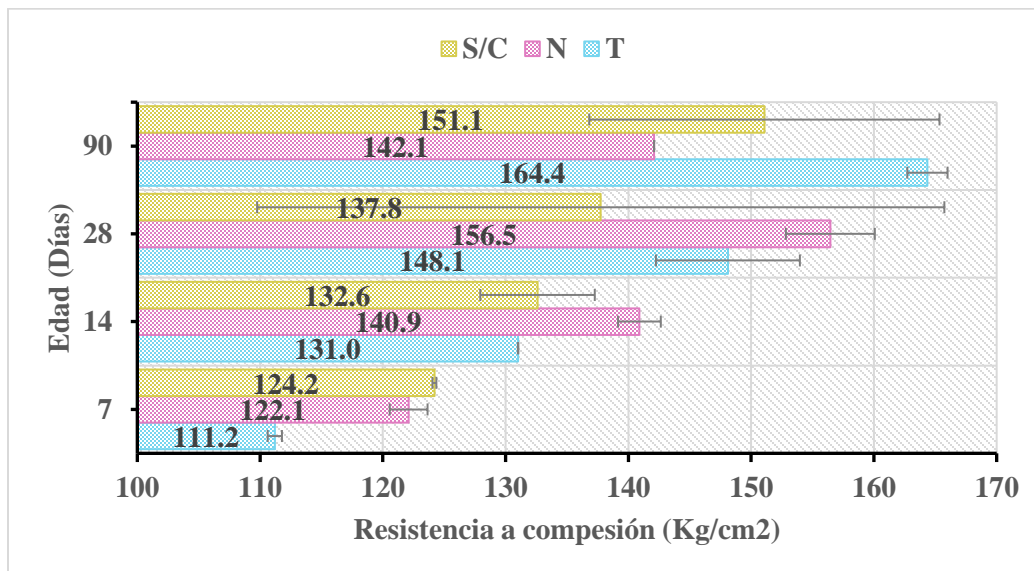


Figura 1. Resultados de resistencia a la compresión a los 7, 14, 28 y 90 días de curado.

3.2 Análisis de la termodinámica y cinética de la interfase acero-concreto

3.2.1 Medición de Potencial de Corrosión (*E_{corr}*)

A partir del criterio establecido en la norma ASTM C-876-91 (Tabla 4.2), se realizó el análisis de datos de potencial obtenidos durante el estudio del Gráfico 4.3. Los resultados del potencial de corrosión (*E_{corr}*) promedio que se observan en el Gráfico 4.3, realizados a los 7, 14, 28 y 90 días indican que en el caso de las muestras testigos (curadas en una solución saturada de hidróxido de calcio) el acero se mantuvo activo hasta los 28 días de curado obteniéndose valores que están sobre -350 mV vs Cu/CuSO₄, lo que indica que la probabilidad de corrosión es de 90% o más, lo cual se le atribuye a la actividad de la doble capa. Sin embargo, a los 90 días de curado se aprecia que los valores descendieron considerablemente alcanzando valores inferiores a -200 mV. A los 90 días de curado las muestras N (tratamiento hidrofóbico de SiO₂) y las muestras sin curar presentaron valores similares a las muestras testigo las cuales alcanzaron valores inferiores a -200 mV vs Cu/CuSO₄, lo que indica que la probabilidad de corrosión es de 10% o menos, lo que se atribuye a la formación de la capa de óxido pasivo sobre el refuerzo (Rodríguez et al., 2015).

Tabla 4. Potencial de corrosión según norma ASTM C876-91, (Rodríguez et al., 2015).

Voltaje medido vs Cu/CuSO ₄ (mV)	Probabilidad de corrosión
> - 200 mV	10% o menos
- 200 mV a - 350 mV	Región de incertidumbre
< - 350 mV	90% o mas

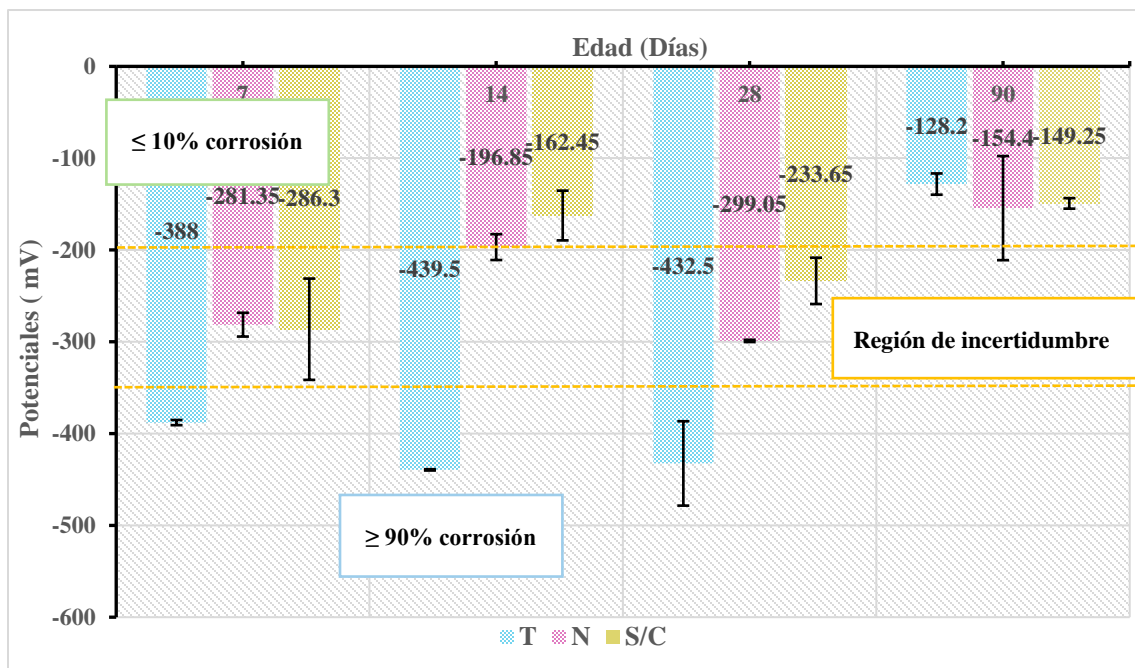


Figura 2. Resultados de la medición de potencial de corrosión de las muestras de concreto reforzado a los 7, 14, 28 y 90 días de curado.

3.3 Caracterización y evaluación de muestras de concreto reforzado con propiedades hidrofóbicas

3.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS)

Por medio del análisis MEB-EDS se realizó mapeo elemental y análisis puntual de la muestra, lo cual proporciona datos sobre la composición química de la muestra.

Muestras con nanopartículas de SiO₂ con propiedades hidrofóbicas a la edad de 90 días

A la edad de 90 días dentro de la distribución de los elementos (concentración de átomos) se observan formaciones ricas en oxígeno correspondientes al SiO₂, lo cual se atribuye al tratamiento superficial a base de nanopartículas de SiO₂ con propiedades hidrofóbicas, las cuales fueron aplicadas en las muestras de concreto el día de su fabricación. La presencia de potasio (K) en las muestras coincide con una etapa o fase de maduración de la pasta de cemento del concreto en estado endurecido (Franus y Panek, 2015),

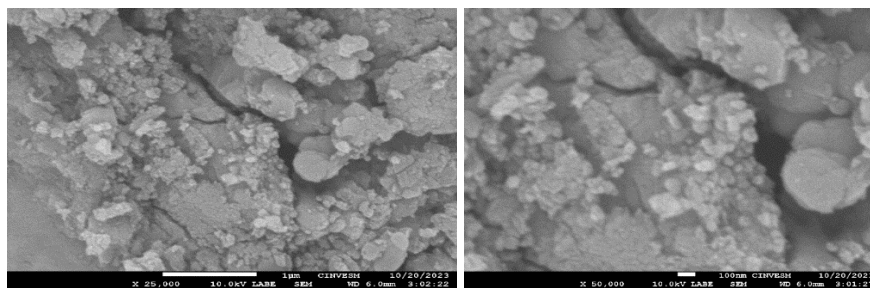


Figura 3. Microscopías electrónicas de la interfaz concreto-tratamiento superficial (SiO₂) funcionalizadas para ser hidrofóbicas.

Tabla 5. Distribución de los elementos que componen la muestra N.

<i>Elementos</i>	<i>% Peso</i>	<i>% Atómico</i>
C K	13.48	26.75
O K	28.53	42.51
Al K	0.59	0.52
Si K	2.90	2.46
K K	0.45	0.28
Ca K	43.74	26.01
Pd L	2.06	0.46
Au M	8.25	1.00
Total	100.00	

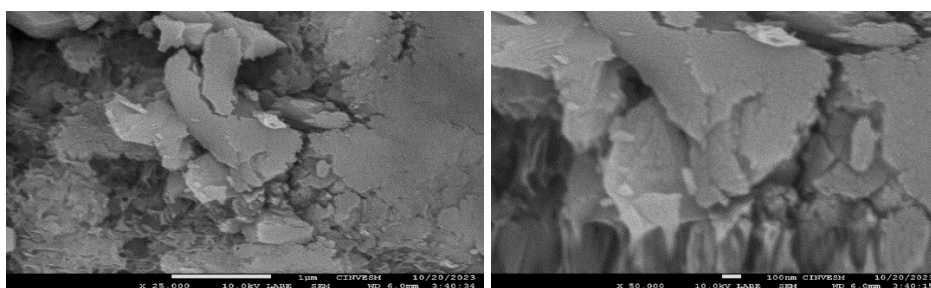


Figura 4. Microscopías electrónicas de la interfaz de muestras de concreto.

Tabla 6. Distribución de los elementos que componen la muestra T.

<i>Elementos</i>	<i>% Peso</i>	<i>% Atómico</i>
C K	23.45	35.32
O K	47.14	53.30
Mg K	0.20	0.15
Al K	0.39	0.26
Si K	0.43	0.28
Ca K	22.20	10.02
Pd L	1.21	0.21
Au M	4.97	0.46
Total	100.00	

3.3.2 Espectroscopía de Fotoelectrón de Rayos X (EFRX)

La línea Si 2p ocurre a energías de enlace cerca de 98 a 104 eV, lo que coincide con los resultados obtenidos por Luna (2007), estos picos han sido atribuidos a Si y SiO₂, lo cual coincide con la Tabla 4.11 y 4.12 (Pavan M. V. Raja & Andrew R. Barron). Este compuesto forma parte de los materiales de fabricación del cemento, siendo el porcentaje de SiO₂ disponible en el cemento de 20-27% (Iloro, 2015), el cual a su vez es aprovechado en las reacciones de hidratación del concreto. Teniendo en cuenta que la intensidad de un determinado pico elemental es proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra, tal como lo reportan diversos autores (JoVE Science Education Database), se puede determinar que para las muestras T y N hay una mayor

concentración de SiO_2 comparadas con las muestras sin curar, lo que se le atribuye en el caso de las muestras N al tratamiento superficial aplicado, mientras que en el caso de las muestras T la concentración de SiO_2 es atribuida al mecanismo de curado de las muestras. La composición superficial del oxígeno (O 1s) ocurre a energías de enlace cerca de 526.2 - 533.5 eV como se aprecia en la Tabla 4.11 y 4.12 (Pavan M. V. Raja & Andrew R. Barron), estas energías son atribuidas a O y SiO_2 , la variación en las intensidades es inferior para muestras N, sin embargo, esta diferencia no es significativa para los tres tipos de muestras, presentando las muestras T una intensidad mayor.

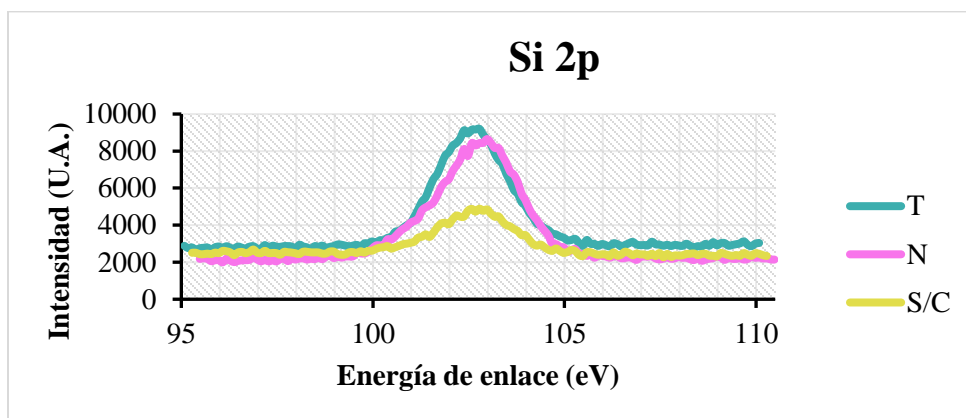


Figura 5. Comparación de los Espectros de los niveles internos Si 2p en muestras testigo (T), muestras con tratamiento de nanopartículas SiO_2 (N) y muestras sin curado con edad de curado de 90 días.

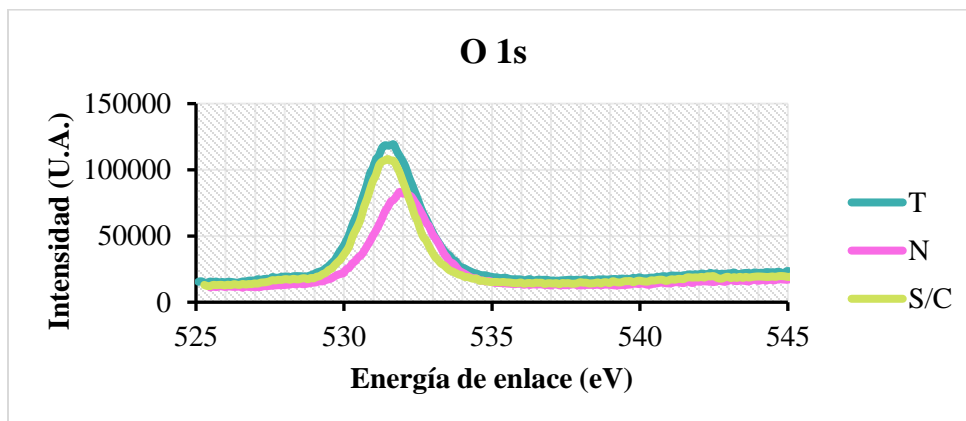


Figura 6. Comparación de los Espectros de los niveles internos O 1s en muestras testigo (T), muestras con tratamiento de nanopartículas SiO_2 (N) y muestras sin curado con edad de curado de 90 días.

3.3.3 Resonancia Magnética nuclear (RMN)

El decaimiento de la magnetización transversal procesada por medio de la transformada inversa de Laplace se considera un indicador de la distribución del tamaño de los poros llenos de agua (Fischer, Haerdtl y McDonald, 2015).

Se puede apreciar un cambio en la amplitud en muestras T y S/C, donde la intensidad de la señal en relación con la distribución de los tamaños de poros presentes en las muestras va disminuyendo

con respecto a la edad de curado, la intensidad de la señal está directamente relacionada con la presencia de agua en el concreto (Arrazola, 2012), por lo que la disminución de esta señal es atribuida a la disminución en cantidad y volumen de los poros presentes en las muestras (Gorce y Milestone, 2007). También se observa un ligero desplazamiento en la mayor amplitud lo que se le atribuye al refinamiento de los poros causado por el mecanismo de hidratación del cemento (Díaz, 2012). Sin embargo, en las muestras N se aprecia una mayor amplitud a los 28 días de curado, es decir, que la señal aumentó con respecto a la edad de curado en comparación con los resultados obtenidos a los 7 y 14 días, siendo que la intensidad está en función de la cantidad de agua presente en la muestra se puede concluir que la porosidad aumentó en las muestras a las que se les aplicó el tratamiento superficial a base de nanopartículas de SiO_2 con funcionalización hidrofóbica, esto puede deberse al carácter hidrofóbico que presentan las muestras lo que impediría el intercambio de agua con el medio, por lo que al consumirse el agua presente en las muestras no quedaría más para el consumo durante el mecanismo de hidratación obteniéndose un deficiente desarrollo en las reacciones de hidratación del cemento.

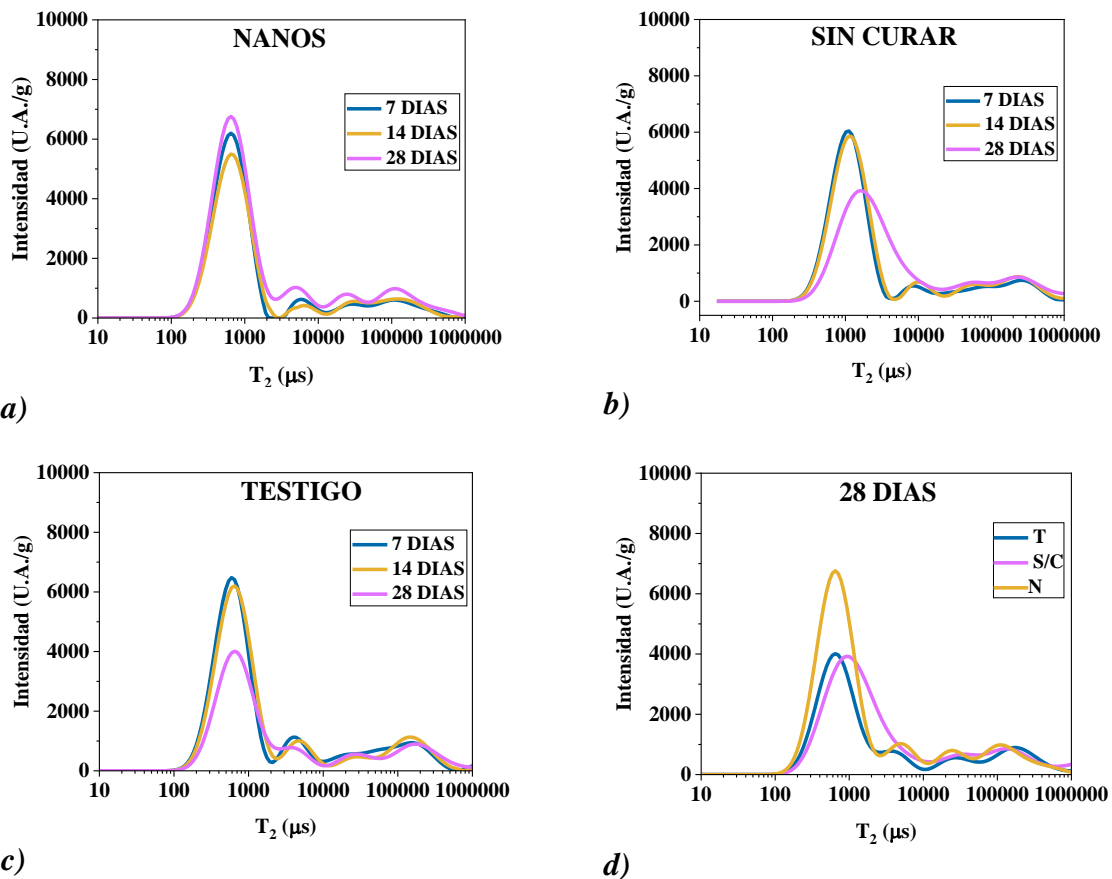


Figura 7. Cambios en la distribución de T_2 a diferentes edades de curado a) probetas con tratamiento de nanopartículas SiO_2 b) probetas sin curado c) probetas testigo con curado de 28 días d) comparación de las tres diferentes muestras a los 28 días (efectividad del tratamiento con nanopartículas).

4. CONCLUSIONES

Las muestras N presentan un aumento en la resistencia de compresión de los 7 a los 28 días con respecto a las muestras T, sin embargo, a los 90 días esta resistencia se ve afectada por la ausencia de agua debido a la hidrofobicidad del material, disminuyendo con esto la permeabilidad de la matriz cementante.

En cuanto a los potenciales de corrosión se observa que a los 90 días de curado los potenciales fueron menos negativos en comparación con los resultados obtenidos a los 7, 14 y 28 días lo que se le atribuyen a la formación de la capa de óxido pasivo (pasividad del acero).

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS) sugiere que a la edad de 90 días dentro de la distribución de los elementos (concentración de átomos) se observan formaciones ricas en oxígeno correspondientes al SiO_2 , lo cual se atribuye al tratamiento superficial de nanopartículas de SiO_2 con propiedades hidrofóbicas, las cuales fueron aplicadas en las muestras de concreto el día de su fabricación.

El análisis de espectroscopia de fluorescencia de rayos X (EFRX) indicó la presencia de SiO_2 en muestras N. La línea Si 2p ocurre a energías de enlace cerca de 98 a 104 eV lo cual se atribuye al Si y SiO_2 .

En los datos obtenidos mediante RMN para la evaluación de la porosidad los resultados sugieren que las muestras N presentaron un aumento en la porosidad con respecto al tiempo en comparación con las muestras T y S/C lo que se le atribuye al carácter hidrofóbico que presentan las muestras.

5. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, doy gracia a Dios quien a pesar de las dificultades me ha fortalecido, aconsejado y guiado por el buen camino, quien me ha dado la vida y la sabiduría para poder terminar esta etapa en mi vida.

A mi familia, especialmente a mis padres Juana y Efraín, y mis hermanos Tania y Alexis por su incondicional apoyo a pesar de mis fallas, por su amor y confianza.

A mi director de tesis, el Dr. Tezozómoc Pérez López, por su apoyo y por brindarme la oportunidad de colaborar en este proyecto de investigación.

Al Dr. William Alejandro Talavera Pech, mi codirector, por su apoyo y dedicación durante el desarrollo de este proyecto.

A las y los docentes de la Maestría en Ciencias de la Preservación de Materiales (MCPM), por su apoyo y sus conocimientos transmitidos, los cuales forman parte de mi formación profesional.

A mis revisores/sinodales, el Dr. Tezozómoc Pérez López, el Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y el Dr. Ángel Bacelis Jiménez por su colaboración en este proyecto, sugerencias y comentarios, los cuales ayudaron a enriquecer este trabajo.

Mi agradecimiento es también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría, gracias a la cual el término de este proyecto fue posible.

A la Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ingeniería Civil y Centro de Investigación en Corrosión (CICORR), por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto de investigación.



6. REFERENCIAS

- Aguilar-Conde, J. (2002). “*Reforzamiento de elementos de concreto con materiales compuestos*”. Ingeniería 6-1 (2002) 7-11.
- Acero-Sanchez, G., Quevedo-Morales, F. y Venegas-Buitrago, D. (2005). “*Influencia del curado interno en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto ligero usando como agregado grueso la piedra pómez*”. Universidad la gran Colombia. Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil.
- ACI Committee 308 (2002). “*Guide to Curing Concrete*”, ACI 308R-01, Detroit.
- Al-Akhras, N. M. (2006). “*Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and Concrete*”. Research, Vol. 36, p. 1727 – 1734.
- Balaguru, P. & Chong, K. (2006). *Nanotechnology and concrete: research opportunities*. Proceedings of the ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, November 7, 2006, Denver, USA.
- Cárdenas, H., Struble, L. (2006). *Electrokinetic Nanoparticle Treatment of Hardened Cement Paste for Reduction of Permeability*. J Mater. Civ. Engin.; 18(4): 554–60.
- Cruz-Moreno, D., Fajardo, G., Flores-Vivian, I., Orozco-Cruz, R., & Ramos-Rivera, C. (2020). *Multifunctional surfaces of Portland cement-based materials developed with functionalized silicon-based nanoparticles*. Applied Surface Science, 147355.
- Coates G., Xiao L, and Prammer M. (1999). “*NMR LOGGING; Principles & Applications*”, Halliburton Energy Services Houston. (pp. 1-28)
- Ligia M. (2010) “*Permeabilidad y porosidad en concretos*”. Rev. Tecnológicas No. 25, 169-187.
- Morefield S. W., Hock V. F. y Weiss C. A., Malone P. G. (2008). “*Applications of electrokinetics nanoparticle migrations in the production of novel concrete-based composite*”. (Rev. 8-98).
- Nilson, A. & Darwin, D. (1997). “*Diseño de estructuras de concreto*”. Santafé de Bogotá, Colombia. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes-Método de ensayo. (correspondiente con ASTM C-39-2015).
- NMX-C-495-ONNCCE-2015. Industria de la construcción-Durabilidad de estructuras de concreto reforzado-Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir en concreto-Especificaciones y método de ensayo. (correspondiente con ASTM C876-91).
- Red PREVENIR (2012). *Prevención de problemas patológicos en estructuras de concreto*, ISBN 978-607-00-4916-3 (formato ebook).
- Troconis de Rincón, O., Aleida, R. de C., Carmen, A., Paulo, H., & Isabel, D. (2000). “*Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*”. DURAR (pp. 5–206).



Análisis de corrosión en estructuras de concreto en una industria de alimentos y deterioro de concretos

A.A. Carreño Avila³, P. Vera Verde¹, L. D. López León¹, F. Almeraya Carderon²,
J. Cabral Miramontes², L. G. Lizarraga Mendiola¹, O. Areu Rangel¹,
O. Caballero, Garatachea¹, I. E. Castañeda Robles¹ y F. J. Olguin Coca^{1,2*}
Autor de Contacto: olguinc@uaeh.edu.mx

¹ Ingeniería Civil Sustentable y Tecnología de Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME, Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA), San Nicolás de los Garza, México.

³ Ingeniería Civil ciencias de ka Tierra, TECCNM campus. Pachuca, Pachuca Hidalgo México.

RESUMEN

Se fabricaron muestras de concreto hechas con una proporción de reemplazo del 30% de residuo de basalto (RB) y cemento Portland compuesto (CPC) para estudiarlos efectos del tiempo inicial de curado con agua sobre el comportamiento a la corrosión de la barra de acero incrustada. Los ejemplares fueron curados en un tanque de agua durante 5 días, 7 días, 14 días y 28 días respectivamente a una temperatura normal de 20°C, luego se saca y se almacena a un ambiente natural interior. En el tiempo de exposición de 60 días, 120 días y 180 días, las densidades de corriente de corrosión de las barras de acero icor. Se probaron los potenciales de corrosión E_{corr} en muestras de concreto RB y CPC sus resistividades eléctricas ρ_c .

Palabras clave: Concreto; Corrosión; Fisuras.

1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria es un sector vital de la economía, donde la integridad de los equipos y la calidad de los productos son fundamentales para garantizar la seguridad y satisfacción del consumidor. La industria de cereales es una de las principales empresas del mundo en la producción de alimentos. La corrosión, un fenómeno electroquímico que deteriora los materiales metálicos, representa un desafío importante en la industria alimentaria, ya que puede afectar la vida útil de los equipos, aumentar los costos de mantenimiento y, potencialmente, comprometer la calidad de los productos. En la planta de alimentos, donde se manejan grandes volúmenes de materias primas y se operan procesos continuos, la presencia de ambientes corrosivos es inevitable. Estos ambientes pueden originarse por el contacto con sustancias químicas, cambios de temperatura y humedad, y el uso de productos de limpieza agresivos, entre otros factores. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la magnitud y el impacto de la corrosión en las trabes de las estructuras de la planta de alimentos. A través de un análisis detallado, se busca identificar los factores que contribuyen a la corrosión y desarrollar estrategias para su mitigación. La metodología del estudio incluye inspecciones visuales, mediciones de espesores, análisis químicos y la implementación de técnicas de monitoreo en tiempo real. Los resultados de este estudio proporcionarán una base sólida para la implementación de prácticas de mantenimiento predictivo y preventivo, optimizando así los costos operativos y mejorando la sostenibilidad de la planta. Además, contribuirán a garantizar la calidad y seguridad de los productos, fortaleciendo la confianza del consumidor y el posicionamiento de la marca en el mercado.

En conclusión, la comprensión y el control de la corrosión son esenciales para el éxito operativo de la planta. Este estudio representa un paso importante hacia la mejora continua de los procesos industriales y la protección de los activos de la empresa, asegurando su competitividad y liderazgo en la industria alimentaria.

La planta de producción presentó daños en losas de concreto debido a las temperaturas y los agentes generados en la producción provocando un deterioro.

2. METODOLOGÍA

Los alcances del contrato incluyen una serie de estudios de campo y laboratorio, así como el análisis de estos y la ingeniería de detalle; estas actividades han servido para evaluar el nivel de servicio de la estructura desde el punto de vista de durabilidad y la realización de la propuesta de rehabilitación de las estructuras analizadas. Los estudios realizados se enuncian a continuación.

- Extracción de Núcleos para ensaye del concreto a la compresión. Incluye la evaluación del material
- Medición de potenciales de corrosión.
- Medición de velocidad de corrosión.



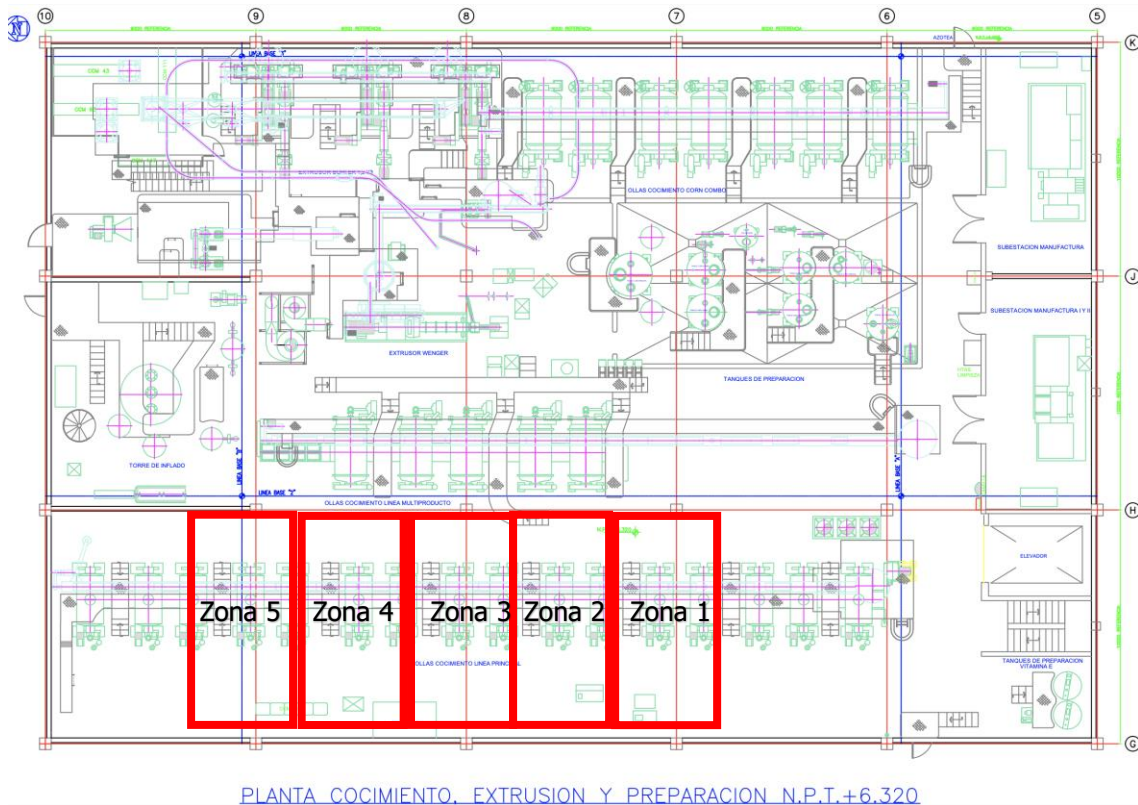


Figura 1 Planta general de cocimiento y extrusión.

La estructura en estudio, son losas de entre piso la cual trabaja con las cargas de las máquinas de extrusión y preparación, en la parte de la planta baja se encuentran las torres de inflado y el secador nacional lo que genera temperaturas superiores a los 40°C, las losas cuentan con fajas de fibra de carbono para mejorar la resistencia de las losas.

La zona de estudio se encuentra ubicada como se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde se dividieron en 5 zonas.

La inspección detallada de la losa, así como el diagnóstico de sus patologías por medio de ensayos, es sumamente necesaria para la toma oportuna de decisiones, así como para el análisis y el proyecto de reparación.

Una vez reconocida la estructura a través de la inspección visual, se realizó una división de las diferentes zonas, clasificándolas de acuerdo con ciertas características y condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura.

La clasificación de las zonas se basó en los objetivos de la inspección y orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños por corrosión en las armaduras. Para esta clasificación se procedió de la siguiente manera.

- Identificar las características originales del concreto.
- Establecer grados de deterioro en el concreto y las armaduras.

Realizada la división de la estructura se seleccionaron los ensayos, mediciones y/o análisis que se llevaron a cabo en la inspección detallada.

Realizada la división de la estructura se seleccionaron los ensayos, mediciones y análisis que se llevaron a cabo en la inspección detallada.

En esta etapa de la inspección detallada, se emplearon equipos calibrados y soluciones/compuestos químicos de acuerdo con la normativa vigente y se llevará a cabo un registro fotográfico de los ensayos realizados.

Los ensayos mínimos por realizar en esta inspección de enlistan a continuación:

2.1 Para la evaluación del concreto.

- Se realizó la extracción de núcleos en las zonas que se muestran en la figura 2
- Se realizó la resistencia a la compresión simple mediante ensayo a núcleos de concreto endurecido ASTM C39/C39M – 12a; NMX-C-083-ONNCCE 2020
- Profundidad de carbonatación. RILEM CPC-18; UNE 112-011-94

Ensayo de compresión de los especímenes de concreto

Para las pruebas de compresión de cada cilindro se realizó el ensayo de acuerdo con las especificaciones de la normativa (ASTM C39/C39M, 2018). Aplicar una carga axial gradual y continua a cada cilindro a una velocidad prescrita hasta que se alcance la falla, registrando la carga máxima aplicada. Registrar la resistencia a la compresión máxima alcanzada por cada cilindro. Por último, se compara los valores de resistencia a la compresión obtenidos de los distintos sistemas en estudio.

En la Figura 3 se observa la extracción de núcleos después de una revisión si contenían varilla de acero para poder realizar el barrenado en 5 puntos de la losa para analizar si tendrían una reducción en su resistencia a la compresión.

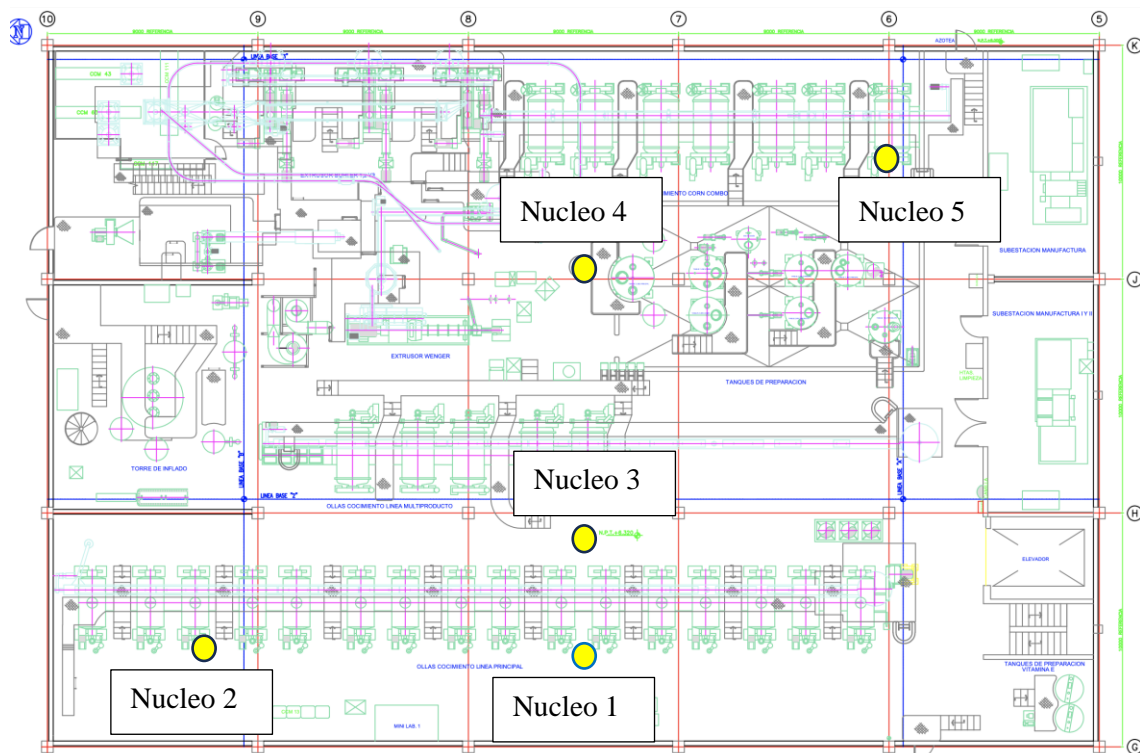


Figura 2. Zonas de extracción de núcleos



Figura 3. Extracción de núcleos

Tabla 1. características de los corazones de concreto

No. De Extracción	Muestra	Espesor de Losa	No. de Capas	Espesor de capa		
				Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3
No.	No.	cm		cm	cm	cm
1	1	15.20	1	8.60	-	-
2	2.1	22.00	2	12.40	-	-
	2.2			-	8.20	-
3	3.1	15.12	3	13.20	-	-
	3.2			-	3.80	8.00

2.2 Para la evaluación de la armadura.

- Medición de potenciales de corrosión. ASTM C876/99
- Medición de velocidad de corrosión STP 1276

2.2.1 Potenciales de corrosión

Potencial de equilibrio, en donde la intensidad del proceso anódico y del proceso catódico son iguales, al que se encuentra el metal que se corroe en un medio específico, relativo a un electrodo de referencia.

Medir el potencial de la concreto reforzado mediante el uso de electrodos de referencia

- Seleccionada la superficie a evaluar debe tenerse libre acceso a una sección del refuerzo del concreto.
- Limpiar la superficie seleccionada, limpiar la superficie del acero expuesto para la conexión.
- Se realiza un mapeo de los puntos donde se hará el monitoreo.
- Se efectua la medicion teniendo humectado el punto a evaluar.
- De los resultados obtenidos se realiza un mapeo con los resultados

Los criterios de evaluación para la evaluación de potenciales de corrosión

Tabla 2. Criterio de potencial para estructuras en ambientes con cloruros (C876-22b, 2022)

Potencial de corrosión E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	Riesgo de corrosión
< -350	Elevado
-350 a -200	Incierto
> -200	Bajo

Tabla 3. Criterios de evaluación de potenciales (DURAR)

CONDICIÓN	POTENCIAL (V) (ESC)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
ESTADO PASIVO	+0,200 a -0,200	Ausencia de Cl ⁻ pH > 12,5 H ₂ O (HR↑)	Despreciable
CORROSIÓN LOCALIZADA	-0,200 a -0,600	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Alto
CORROSIÓN UNIFORME	-0,150 a -0,600 +0,200 a -0,150 -0,400 a -0,600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR↑) Carbonatado O ₂ , Seco, (HR↓) Cl ⁻ Elevado ó Carbonatado H ₂ O, (HR↑)	Moderado Alto Bajo Alto
CORROSIÓN UNIFORME	< -0,600	↑Cl ⁻ , ↑H ₂ O (Sin O ₂)	Despreciable

2.2.2 Velocidad de corrosión

la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), es otro parámetro que permite una evaluación precisa del estado de las estructuras de concreto armado. Por medio de la técnica de medición de resistencia de polarización lineal (LPR) el acero de refuerzo es perturbado por una pequeña cantidad de su potencial de equilibrio. Esto se puede lograr cambiando el potencial del acero de refuerzo en una cantidad fija, ΔE , y observar la caída de corriente, ΔI , después de un tiempo establecido. La resistencia de polarización, R_p , del acero se calcula entonces a partir de la ecuación: $R_p = \Delta E / \Delta I$ del cual la corriente de corrosión es $I_{corr} = B / R_p$, donde B es la constante de Stern-Geary con valores de 25 mV para el acero activo y 50 mV para el acero pasivo.

Los siguientes criterios generales para la corrosión que se han desarrollado a partir de investigaciones de campo y de laboratorio se dan en las mediciones se ven afectadas por la temperatura y la humedad, por lo que las condiciones en el momento de la medición afectan a la interpretación de los límites definidos en la tabla. Las mediciones deben ser consideradas con una precisión de un factor de dos. Se ha trabajado en la correlación de I_{corr} con la pérdida de sección del acero de refuerzo y el tiempo de servicio.

Tabla 4. Corrosión del refuerzo por densidad de corriente para estructuras en operación

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevada
> 1	Muy elevada

3. RESULTADOS

3.1 Prueba de resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo utilizando una prensa de compresión de cilindros de concreto, marca Controls, modelo 50-C43C04, conforme a la normativa (NMX-C-083-ONNCCE, 2003).

Se realizaron ensayos de compresión simple a 3 especímenes de concreto, de los núcleos 1, 2 y 3 registrando la siguiente información:

- Concreto 1: Es la capa más antigua de concreto
- Concreto 2: Capa constituida de arena silica-grava de mármol-cemento-agua (tono azul)
- Concreto 3: capa constituida de arena-cemento-agua
- El espesor del concreto 1 es de 8.60 a 13.20 centímetros
- El espesor del concreto 2 es de 3.80 a 8.20 centímetros
- El espesor del concreto 3 es de 8.00 centímetros.

A los especímenes 2 y 3 presentar junta fría, su adherencia entre concreto es mínima, se ensayan en forma individual, registrando los siguientes resultados:

Esta deficiencia se debe a la fatiga del concreto

Para una resistencia de compresión simple (250 kg/cm²) de concreto, su módulo de elasticidad ideal aproximado sería de 320,000 kg/cm².

El concreto experimenta una disminución del 86%, significa que el concreto se vuelve mucho menos rígido y más flexible. Esta disminución significativa del módulo de elasticidad puede tener varias implicaciones:

1. *Mayor deformación:* El concreto será más susceptible a sufrir deformaciones bajo cargas aplicadas. Esto puede resultar en grietas, asentamientos o desplazamientos no deseados en la estructura.

2. *Menor capacidad de carga:* Con un módulo de elasticidad reducido, la capacidad del concreto para soportar cargas también se verá afectada. La estructura podría volverse menos resistente y tener una capacidad de carga reducida.

3. *Mayor vulnerabilidad ante movimientos sísmicos:* Un concreto menos rígido puede ser más vulnerable a los movimientos sísmicos. Puede experimentar mayores niveles de daño y tener un comportamiento menos predecible durante un terremoto.

4. *Necesidad de refuerzo adicional:* Si el módulo de elasticidad disminuye considerablemente, es posible que se requiera refuerzo adicional en la estructura para compensar esta pérdida de rigidez. Esto podría implicar la necesidad de agregar estructuras metálicas, vigas, columnas o refuerzos en las áreas afectadas.

Tabla 5. Resistencias a la compresión de elementos de concreto

No. de extracción	Muestra	Espesor de losa	No. de capas	Resistencia		
				Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3
No.	No.	cm	cm	Kg/cm ²		
1	1	15.20	1	237.32	-	-
2	2.1	22.00	2	282.73	-	-
	2.2			-	203.73	-
3	3.1	15.12	3	487.82	-	-
	3.2			-	111.38	

Los módulos elásticos de las muestras son los siguientes:

Tabla 6. Modulo elástico de elementos de concreto

No. de extracción	Muestra	Espesor de losa	No. de capas	Módulo elástico		
				Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3
No.	No.	cm	cm	Kg/cm ²		
1	1	15.20	1	43,693	-	-
2	2.1	22.00	2	-	-	-
	2.2			-	112,615	-
3	3.1	15.12	3	75,534	-	-
	3.2			-	29,522	

3.2 Evaluación no destructiva

3.2.1 Resistividad eléctrica

La evaluación se realizó en 5 zona teniendo mapeos como se muestran en la figura 4.

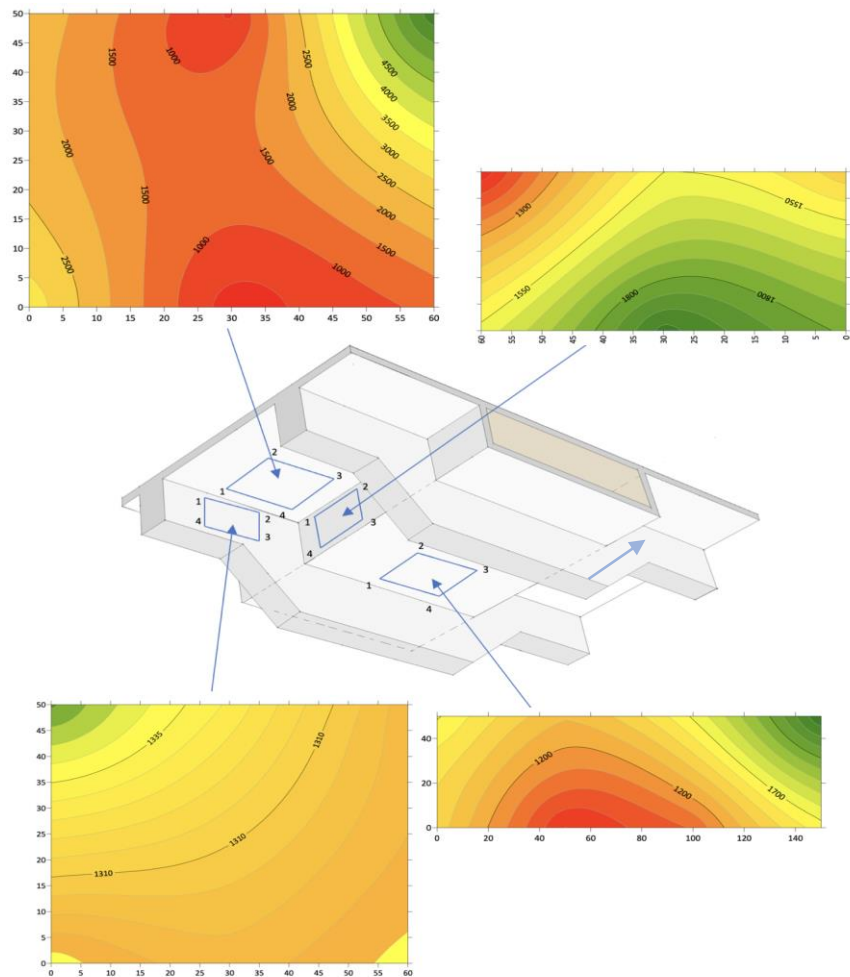


Figura 4. Mapeos de Resistividad electrica en zona. 1

La resistividad eléctrica del concreto en la zona 1, como se ilustra en el gráfico, exhibe un riesgo moderado, con valores que oscilan entre 1000 y 2200 Ohm*m. El concreto con una menor resistividad se localiza en el sector de la trabe, lo cual disminuye los efectos de la temperatura de exposición y el aumento de humedad permitiendo el reducir la resistividad del concreto generando el paso de iones agresivos, aumentando así el riesgo de corrosión.

El resumen de las resistividades muestra que los elementos de encuentran de riesgo a moderado a alto debido a las resistividades monitoreadas en las 5 zonas de estudio las cuales se muestran la zona 4 las zonas más susceptibles se presentaron en las losas y en las trabes centrales.

Tabla 7. Riesgo de resistividad en zonas de estudio

Elemento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Losa	Moderado	Moderado	Alto	Moderado	Alto
Trabe central	Moderado	Moderado	Alto	Moderado	Alto
Paño de trabe	Moderado	Moderado	Moderado	Alto	Moderado
Paño de estribo	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado

3.2.2 Potenciales de corrosión

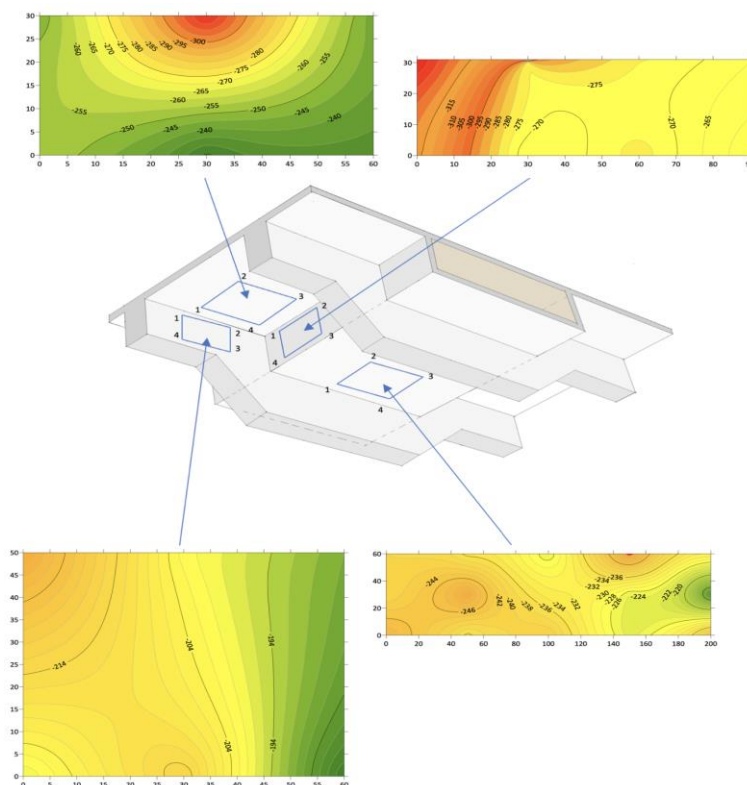


Figura 4. Potenciales de corrosión de la zona 1

Se realizó el monitoreo de potenciales de corrosión Mapeo de Potenciales de Corrosión de la zona 1 a) Losa, b) Tramo central de trabe, c) Paño de la trabe d) Cara B estribo 2 de columna se observa que la losa la zona central de la trabe y el paño de la trabe presentan potenciales con una probabilidad de corrosión en zona de incertidumbre, y en la zona del paño del estribo muestra resultados con 10 % de probabilidad de corrosión, conforme a lo que indica el criterio durar Tabla 9 Criterios de evaluación de potenciales (DURAR) los potenciales y las condiciones de la atmosféricas o de ambiente en la zona inducen a una corrosión uniforme.

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los mapeos de potenciales de corrosión de las zonas de estudio donde se presenta zonas. De incertidumbre con excepción de la zona 4, elementos como la losa presenta 90% de probabilidad de corrosión corroborando que la zona 4 presenta un mayor riesgo de corrosión y con mayor susceptibilidad.

Tabla 8. Riesgo de Potenciales de Corrosión en zonas de estudio

Elemento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Losa	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	90%	Incertidumbre
Trabe central	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	90%	Incertidumbre
Paño de trabe	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre
Paño de estribo	10%	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre

3.2.3 Velocidad de corrosión

Los resultados de la velocidad de corrosión se mapearon como se muestra en la figura 5 el Mapeo de Velocidad de Corrosión de la zona 1 a) Losa, b) Tramo central de trabe, c) Paño de la trabe d) Cara B estribo 2 de columna donde se presentan resultados que muestran una corrosión de moderada a elevada en la losa, en la zona central de la trabe muestra una velocidad moderada así como en el paño de la trabe y el paño del estribo. La velocidad en la zona de la losa en la esquina presenta el incremento en su cinética de corrosión.

Después de realizar un resumen de la velocidad de corrosión en las diferentes zonas del estudio como se identifica en la tabla 9 donde las zonas 3, 4 y 5 muestran un riesgo elevado debido a la velocidad es mayor de $1\text{mA}/\text{cm}^2$ los resultados presentan que toda la estructura. Se encuentran en riesgo por Corrosión necesitando realizar una acción importante de las estructuras de estudio.

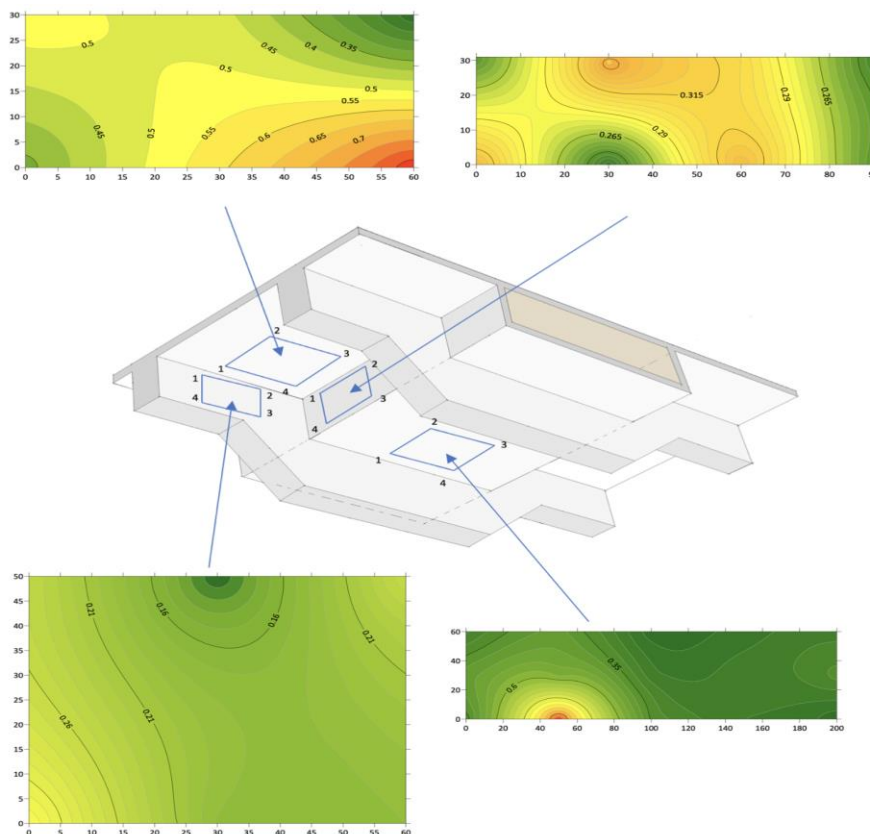


Figura 5. Velocidad de corrosión de la zona 1

Tabla 9. Riesgo de Velocidad de Corrosión en zonas de estudio

Elemento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Losa	Elevado	Moderado	Muy elevado	Muy elevado	Muy elevado
Trabe central	Elevado	Moderado	Muy elevado	Muy elevado	Muy elevado
Paño de trabe	Moderado	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado
Paño de estribo	Moderado	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado

4. CONCLUSIONES

De lo definido en la tabla anterior donde se hace concluir lo siguiente:

La zona 1, se encuentra con riesgo moderado presenta un avance, pero la pintura epóxica ha protegido a la estructura, en cuestión a su resistividad da validez con a los resultados de carbonatación porque está en un riesgo moderado, el concreto ha perdido propiedades repelentes a los agentes deletéreos, las zonas de la trabe, así como la losa tienen un mayor riesgo debido a la exposición directa, las zonas de los paños y estribo se encuentran con menor riesgo que las antes mencionadas. La velocidad de corrosión en la zona se encuentra en un nivel de corrosión elevado.

La zona 2, esta zona estructural presenta 1 cm de carbonatación con lo que los agentes han afectado al concreto, aunado con la resistividad deja la estructura en un riesgo moderado, con los potenciales que presentan según la normativa se tiene la estructura en zona de incertidumbre que con los resultados se tiene una activación, la velocidad de corrosión presenta una mayor actividad en la losa y la trabe en la zona central, el paño de la trabe y el estribo se encuentran el una velocidad moderada.

La zona 3, los efectos ambientales han incrementado en esta zona debido a que en una zona que ha vulnerado la estructura, la resistividad ha bajado en la losa a un riesgo elevado, con una velocidad de corrosión muy elevada e incrementando su velocidad los resultados indican que se tiene una corrosión uniforme por lo que la losa y la trabe en su zona central tienen un mayor deterioro por lo que se sugiere ya realizar trabajos para su mantenimiento y reposición de zonas con mayor vulnerabilidad. En cuestión de los paños ya muestran un riesgo elevado y una corrosión de moderada a elevada.

La zona 4, los elementos estructurales de esta zona presentan un riesgo muy elevado el concreto ya se encuentra con un deterioro notable con carbonatación y una resistividad de moderada a elevada, la velocidad de corrosión se encuentra muy elevada en. La losa y la trabe central, en los estribos de la trabe y el estribo se encuentra menos deteriorado con riesgos moderados, esto se ha dado porque en los paños no llegan los ataques de forma directa.

La zona 5, en esta zona la losa y la trabe central se encuentran con un riesgo muy elevado debido a que la corrosión se encuentra con parámetros muy elevados por lo que es importante ya realizar trabajos de mantenimiento en las estas estructuras, los concretos ya presentan un decremento de sus propiedades mecánicas, la trabe en el paño y el estribo en el paño muestra resultados con valores moderados, pero es importante darle mantenimiento para minimizar el riesgo.

5. REFERENCIAS

- ASTM International. (2001). "ASTM C 31/C 31M: Cast and laboratory cure two sets of two standard cylinder specimens for each composite sample."
- ASTM International. (2017). "ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens."
- ASTM International. (2018). "ASTM C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". West Conshohocken, PA.
- Bai, W., Shen, J., Guan, J., Wang, J., & Yuan, C. (2022). Study on compressive mechanical properties of recycled aggregate concrete with silica fume at different strain rates. "Materials Today Communications", 31, 103444.
- Bian, X., Mei, C., Wu, L., & Zhao, Z. (2023). Experimental study on synergistic treatment of dredged sludge with cement-waste concrete fine aggregate. "Construction and Building Materials", 409, 133903.
- Martínez, L. (2018). Cementos especiales: propiedades y aplicaciones en México. "Revista de Ingeniería Civil", 30(2), 78-91.
- Noh, H. W., Lee, S., Cho, J. Y., & Kim, D. J. (2024). Investigating dynamic compressive strength of concrete by using high-rate hydraulic universal testing machine. "Construction and Building Materials", 411, 134402.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC. (2003). “NMX-C-083-ONNCCE-2002: Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto-Método de prueba.”

Ou, Y. C., Joju, J., Lai, B. C., & Wang, J. C. (2023). Development and seismic performance evaluation of New high strength reinforced concrete column and steel beam (New-RCS) joint. “Engineering Structures”, 288, 116186.

Pérez, A. (2017). “Innovaciones en la industria del cemento en México”. Editorial Tecnología de Materiales.

IMCYC. (1997). Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson . Mexico: ONNCCE.

David, O. J. (2008). ¿QUÉ ES EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN EL CONCRETO?

Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/elasticidad-del-concreto/> C1876-19, A.

(2019). ASTM C1876-19 Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete. ASTM.

C876-22b, A. (2022). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM Standars.



Estudio de la durabilidad del concreto modificado con PET-reciclado, mediante la determinación de la resistividad por el método Wenner.

A.C. Espíndola Flores^{1*}, E. Onofre-Bustamante¹

*Autor de Contacto: aespindolaf@ipn.mx

¹ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad
Altamira, Altamira, México.

RESUMEN

Actualmente a nivel mundial la industria de la construcción se encuentra desarrollando materiales sustentables, contribuyendo en la reducción de emisiones de contaminantes a la atmosfera, así como la sobre explotación de recursos naturales, en busca de edificaciones sostenibles. Investigaciones recientes han incorporado distintos materiales de desecho para desarrollar concretos amigables con el medio ambiente. Sin embargo, es necesario cumplir con los requerimientos de los tecnólogos del concreto, como encontrar propiedades de ingeniería superiores tales como alta durabilidad, ductilidad, bajo costo de mantenimiento, alta resistencia mecánica y prolongar la vida útil. En este sentido este proyecto de investigación propone el desarrollo de concretos modificados a partir de PET-reciclado, sustituyendo parcialmente el agregado fino (arena). Se determino la resistencia a la compresión de forma convencional y la durabilidad por el método de Wenner. Los resultados muestran que sustituyendo el 5% de PET-reciclado por agregado fino, se obtuvo un concreto con propiedades mecánicas superiores al concreto comercial y mayor durabilidad. El concreto obtenido, contribuye en la disminución de la sobreexplotación de los recursos naturales, la huella de carbón y el uso y aprovechamiento de residuos.

Palabras clave: PET-reciclado; Durabilidad; huella de carbón; Sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El nacimiento del cemento Portland en los años 1824, revolucionó la industria de la construcción, debió a su excelente propiedad de resistencia a la compresión. Sin embargo, fue hasta los inicios de 1900, cuando se implementó el uso del sistema concreto-acero de refuerzo. Este sistema cuenta con excelentes propiedades mecánicas como son resistencia a la compresión y flexión, además de ser un material fácil de manipular, versátil para utilizar en distintas estructuras y durable.

En la actualidad es el material más utilizado, se ha reportado en el 2017 un consumo aproximado de 30 mil millones de toneladas anuales (Monteiro et al., 2017). Sin embargo tiene una gran desventaja, su producción causa graves problemas ambientales. La elaboración del cemento es una de las fuentes principales de contaminación de CO₂ y responsable del calentamiento global, se ha reportado que contribuye con más del 7% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI). Adicionalmente, los agregados fino (arena) y grueso (grava), que son recursos de origen natural (Mo et al., 2020; Alqahtani et al., 2021) y representan más del 79%, de la composición del concreto. Como consecuencia del uso de estos recursos ha traído la sobre explotación de los bancos de arena y grava, modificando los paisajes terrestres (Timofeeva et al., 2021), así como la modificación en el cauce y geometría de los ríos (Meador et al., 1998), alteración y cambios en la fauna y flora (Byrnes et al., 2004; Padmalal et al., 2008), y un daño irreversible en la calidad del agua subterránea y superficial (Peck Yen et al., 2013; Bayram et al., 2015).

Para mitigar el daño antropogénico que está causando la fabricación de este material, se han desarrollado diversas investigaciones sobre el uso de materiales alternativos para sustituir parcialmente el uso de los agregados fino y grueso además del cemento y agua. Destacando el uso de aguas residuales e industriales tratadas (Al-Ghusain et al., 2003; Asadollahfardi et al., 2016; Kanwal et al., 2018), aguas residuales de lavado de autos (Al-Jabri et al., 2011; Shahidan et al., 2017), para los agregados fino y grueso, se ha utilizado material de escoria (Dong et al., 2021), reciclado de concreto (Revilla-Cuesta et al., 2020), desechos plásticos (Basha et al., 2020) y caucho (Li et al., 2019) entre otros.

En este sentido es necesario continuar con la búsqueda de alternativas que ayuden a obtener materiales de construcción causando menos daño al medio ambiente. Este trabajo de investigación propone el uso de Polietileno Tereftalato Reciclado (PET-R), como sustitución parcial del agregado fino, para obtener un concreto con mejores propiedades mecánicas que el concreto tradicional y durable. Para determinar sus propiedades mecánicas, se evaluará la resistencia a la compresión. Mientras que por el método Wenner o de las cuatro puntas, se evaluará la durabilidad del concreto modificado. Con el objetivo principal de desarrollar un concreto modificado utilizando materiales de desecho para contribuir en la construcción de viviendas sostenibles, minimiza la sobre explotación de los bancos de arena, la reducción en la generación de CO₂, así como contribuir en el cumplimiento de las agendas ambientales 2023 “Objetivos de desarrollo sostenible” y 2050 “cero emisiones”.

2. METODOLOGÍA

2.1 Recolección, limpieza y trituración del PET.

Las botellas de PET-reciclado, se obtuvieron de la campaña de recolección que realiza CICATA, Unidad Altamira, como parte de las actividades del comité ambiental. Posteriormente se realizó una limpieza de las botellas que consistió en retirar todo el material que no corresponde al PET, como son etiquetas, taparrosca y el excedente del líquido que contenían las botellas. Consecutivamente se realizó la molienda, hasta obtener un tamaño similar al agregado fino (arena).

2.2 Determinación del módulo de finura del agregado fino.

Se obtuvo una muestra homogénea del agregado fino de 500g empleando el método de cuarteo. La muestra se tamizó en mallas de diferentes aberturas como lo marca la norma “ONNCCE, NMX-C-077-1997-ONNCCE. Agregados para concreto. Análisis granulométrico. Métodos de prueba.” Posteriormente se realizan los cálculos para obtener el módulo de finura, utilizando la ecuación (1).

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenido-acumulado } (N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100} \quad (1)$$

2.3 Diseño de mezcla.

Para la elaboración de los especímenes se utilizó un diseño de mezcla de acuerdo con las especificaciones que describe el método del American Concrete Institute (ACI), con una relación a/c de 0.45 y una $f'c$ de 40MPa.

2.4 Caracterización mecánica.

2.4.1 Revenimiento

Para las pruebas de revenimiento se utilizó un cono Abrams de 4". El procedimiento consiste en verter la mezcla en el cono en tres “capas”. Cada una de las capas deberá ser varillada de manera uniforme en 25 ocasiones con una varilla cilíndrica de acero lisa, al finalizar se enraza y se procede a desmoldar. Posteriormente se invierte el cono y se procede con un flexómetro a medir la diferencia de altura tomando como referencia la parte superior del cono y la parte inferior la mezcla del concreto.

2.4.2 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas se empleó una máquina universal de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 “Industria de la construcción–concreto–determinación de resistencia a la compresión de especímenes–método de prueba”, donde las probetas se llevaron hasta la fractura.

2.5 Medición de resistividad por el método Wenner.

Para llevar a cabo la determinación de la resistividad se utilizaron probetas rectangulares de concreto con dimensiones de 25 X 20 X 10 cm. Utilizando un resistometro, marca Nilsson Electrical Laboratory, modelo 400, se conectaron los electrodos externos de acero al resistometro en las terminales de corriente y los electrodos de acero internos se conectaron al resistometro en las terminales de potencial y se procedió a obtener la lectura de la resistencia de las muestras evaluadas.



3. RESULTADOS

3.1 Molienda de las botellas de PET-reciclado

Una vez recolectadas las botellas, se retiró la etiqueta, taparrosca y todo el material que no fuera PET, así como algún residuo líquido excedente. Posteriormente se trituraron las botellas de PET-reciclado, hasta obtener un tamaño de partícula homogéneo como se muestra en la Figura 1. El tamaño de muestra que se obtuvo después del proceso de molienda es de 0.06 y 0.20mm, similar al agregado fino (arena).



Figura 1. Imagen de las partículas de PET-reciclado triturado

3.2 Determinación del módulo de finura del agregado fino

Para poder sustituir parcialmente el agregado fino por PET-reciclado, es necesario realizar la granulometría de los agregados para conocer su dispersión. Se calculó el módulo de finura para el PET-reciclado triturado, utilizando una muestra de 500 gr y se cribó, posteriormente se pesó la muestra retenida en cada una de las mallas y con los datos obtenidos se calcula el MF (Figura 2).

Módulo de finura del PET-reciclado triturado				
Malla mm (designación)	Peso retenido (gr)	% retenido	% acumulado	% que pasa
4	0.0	0	0	100
8	0.1	0.02	0.02	99.98
16	56.9	11.38	11.40	88.60
30	125.4	25.08	36.48	63.52
50	268.3	53.66	90.14	9.86
100	42.8	8.56	98.7	1.3
Charola	6.5	1.3	100	0
TOTAL	500	100	-	-



Figura 2. Datos y proceso de la granulometría del PET-reciclado triturado

De acuerdo con los datos obtenidos el módulo de finura para el PET-reciclado triturado es:

$$MF = \frac{0.02+11.40+36.48+90.14+98.70}{100} = 2.36 \quad (2)$$

El resultado de módulo de finura del PET-reciclado triturado, fue de 2.36 (2). De acuerdo con la norma N-CMT-2-02-002/19, es un valor aceptado por lo tanto, el agregado fino (arena) que se utilizó para el diseño de mezcla cumple con las características de agregado fino.

3.3 Diseño de mezcla

La mezcla se diseñó para trabajar un volumen de 35 litros de concreto, con una relación agua/cemento (a/c) de 0.45, una $f'c$ de 40 MPa, de acuerdo con la American Concrete Institute "ACI". Tomando como base el diseño de mezcla de la muestra testigo, se realizaron los diseños para el concreto modificado, sustituyendo en porcentaje peso de agregado fino (arena) de PET-2.5%, PET-5% y PET-10% (Figura 3).

Probeta	Componente de la mezcla, peso en (kg) para un volumen de 35 litros, $f'c$ 40 MPa				
	Cemento	Agua	Grava	Arena	PET
Testigo	14.18	6.4	33.81	29.90	0
PET-2.5%	14.18	6.4	33.81	29.15	0.747
PET-5%	14.18	6.4	33.81	28.40	1.495
PET-10%	14.18	6.4	33.81	26.91	2.99








Figura 3, Dosificación de los componentes de la mezcla y su proceso de elaboración.

3.4 Caracterización mecánica

3.4.1 Revenimiento

La prueba de revenimiento es importante para conocer la consistencia de la mezcla fresca de concreto y poder determinar la trabajabilidad, colocar y compactar el concreto en la aplicación final. Los resultados obtenidos de los diseños de concreto-PET-reciclado, se clasificaron como líquidas o trabajabilidad aceptable. En comparación con la muestra control, no se observó diferencia y esto se atribuye a la hidrofobicidad del PET. Por lo tanto, se deduce que las partículas de PET-reciclado no absorben agua (Tabla 1).

Tabla 11. Resultados de las pruebas de revenimiento

Muestra	Revenimiento (cm)	Clasificación
Testigo	19	Líquida (L)
PET-2.5%	18	Líquida (L)
PET-5%	19	Líquida (L)
PET-10%	16	Líquida (L)

3.4.2 Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de compresión fueron obtenidos en dos periodos de tiempo: el primer periodo de 7, 14 y 28 días y posteriormente 18 meses.

El concreto modificado con PET-reciclado, se diseñó para cumplir con una resistencia máxima de 40 MPa y de acuerdo con los resultados obtenidos correspondientes al primer periodo de tiempo de curado, todas las muestras de concreto modificado con PET-reciclado cumplen con la resistencia a la compresión mínima de diseño, como se muestran en la Figura 4.

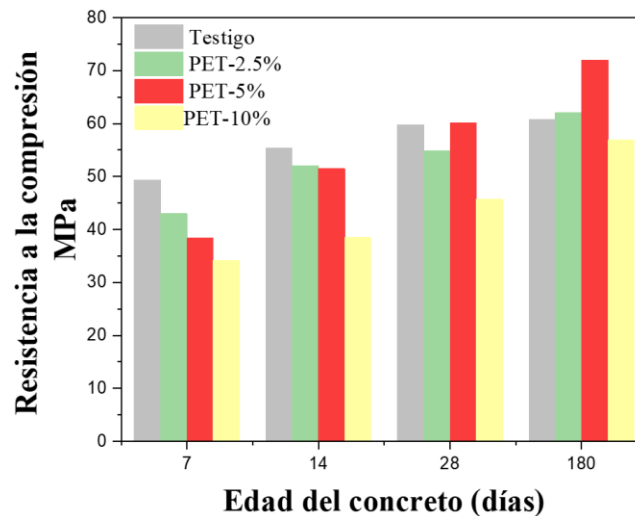


Figura 4. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.

Adicionalmente a los 180 días de curado se observa un comportamiento mecánico superior a la muestra de referencia. El sistema que mejor se comporta es el concreto modificado con PET-5%. Esto se atribuye a que las reacciones álcali-hidrolisis se lleva de una manera más lenta, por lo tanto tarda más tiempo para alcanzar su mayor resistencia a la compresión, debido a que el PET funciona como una barrera aislante que disminuye la velocidad de las reacciones álcali-hidrolisis.

3.5 Medición de resistividad por el método de las cuatro puntas

Las muestras utilizadas de concreto modificado con PET-reciclado fueron rectangulares con dimensiones de 25 cm de largo por 20 cm de ancho y 5 cm de profundidad. El diseño utilizado para las colocar los electrodos consistió en dividir en 4 partes equidistantes de 5 centímetros de distancia entre cada punto. Se conectaron los electrodos externos de acero al resistometro en las terminales de corriente (marcados con letra C) y los electrodos de acero internos se conectaron en las terminales de potencial (marcados con letra P), como se muestra en la Figura 5 y se procedió a obtener la lectura de la resistencia de las muestras evaluadas

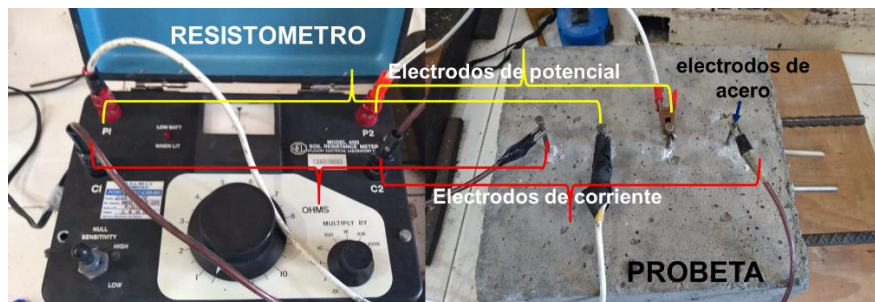


Figura 5. Sistema de conexión de resistómetro con electrodos de la probeta de estudio.

Los especímenes evaluados corresponden a los diseños de mezcla testigo, PET-2.5%, PET-5% y PET-10% (Figura 6).

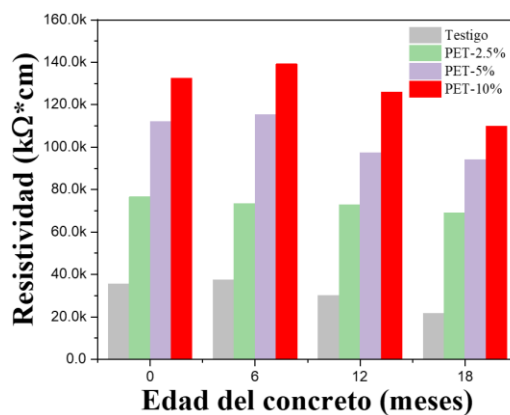


Figura 6. Resultados de la prueba de resistividad .

Los resultados muestran en los primeros 12 meses de evaluación valores de resistividad muy altos ($\approx 120 \text{ K}\Omega$), característicos del concreto estructural comercial. Sin embargo, después de 18 meses de exposición a la atmósfera los valores de resistividad son ligeramente menores ($100\text{-}110 \text{ K}\Omega$). Este comportamiento se puede asociar con la humectación del concreto después de un año de exposición a una atmósfera controlada con una humedad relativa alta ($\approx 75\%$). Adicionalmente se puede observar perfectamente en todas graficas que las muestras evaluadas los valores de resistividad incrementan drásticamente al añadir el PET-reciclado en la mezcla. Este resultado se puede explicar considerando que el PET-reciclado no es un material conductor. Por lo tanto, dentro de la matriz del concreto la presencia y distribución homogénea del PET-reciclado impide el paso de la corriente y como consecuencia el incremento de la resistividad, mostrando un comportamiento directamente proporcional al contenido de PET-reciclado.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se substituyo parcialmente el agregado fino en una mezcla de concreto por PET-reciclado con el objetivo principal de obtener un concreto verde con propiedades mecánicas iguales o superiores al concreto estructural comercial y mayor durabilidad. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

A partir de una molienda en dos pasos se obtuvo un tamaño de partícula de PET-reciclado homogéneo, con un módulo de finura cercano al agregado fino ($\approx 0.35 \text{ mm}$), lo que favoreció la incorporación a la mezcla incrementando las propiedades mecánicas del concreto.

El diseño de mezcla de la muestra del concreto modificado con PET 5% presento un incremento de la resistencia a la compresión en un 20% superior al valor de la muestra de referencia y un 80% superior al diseño de mezcla de referencia como lo marca la normatividad (40 Mpa).

Los resultados de resistividad sobre las muestras modificadas con PET-reciclado muestran un incremento proporcional al porcentaje de sustitución del PET-reciclado, lo que indica un concreto con mayor durabilidad, debido a que no favorece el paso de los iones agresivos, incrementando el tiempo de vida útil.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación se ha realizado con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional, con los proyectos SIP 20241778 y SIP 20241400. Agradecemos la colaboración de las empresas Concretos Tancol S.A. de C.V., bajo la supervisión del Ing. José Antonio Cristóbal Hernández, para el desarrollo de las mezclas de concreto y M&G Polímeros S.A. de C.V., por la trituración del PET.

6. REFERENCIAS

Basha, S.I., Ali, M.R., Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., 2020. *Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete*. *J. Build. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101710>

Bayram, A., Onsoy, H., 2015. *Sand and gravel mining impact on the surface water quality: a case study from the city of Tirebolu (Giresun Province, NE Turkey)*. *Environ. Earth Sci.* 73 (5), 1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3549-2>.

Byrnes, M.R., Hammer, R.M., Thibaut, T.D., Snyder, D.B., 2004. *Effects of sand mining on physical processes and biological communities offshore New Jersey, U.S.A.* *J. Coast Res.* 20 (1), 25–43. [https://doi.org/10.2112/1551-5036_2004_20\[25:eosmop\]2.0.co;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036_2004_20[25:eosmop]2.0.co;2).

Dong, Q., Wang, G., Chen, X., Tan, J., Gu, X., 2021. *Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: an overview*. *J. Clean. Prod.* 282, 124447.

F.K. Alqahtani, I. Zafar. *Plastic-based sustainable synthetic aggregate in Green Lightweight concrete – a review*. *Construct. Build. Mater.*, 292 (2021), Article 123321, [10.1016/j.conbuildmat.2021.123321](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123321)

G. Asadollahfardi, M. Delnavaz, V. Rashnoiee, N. Ghonabadi, *Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete*, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 253–261, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.039>.

H. Kanwal, S. Arif, M.A. Jawaid, A. Farooq, M.A. Khan, *Effect on compressive strength of concrete using treated waste water for mixing and curing of concrete*, *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.* 37 (2018) 445–452, <https://doi.org/10.22581/muet1982.1802.20>.

I. Al-Ghusain, M.J. Terro, *Use of treated wastewater for concrete mixing in Kuwait*, *Kuwait J. Sci. Eng.* 30 (2003) 213–228.

K.H. Mo, B.S. Thomas, S.P. Yap, F. Abutaha, C.G. Tan. *Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability-related properties* *J. Clean. Prod.*, 275 (2020), Article 123062, [10.1016/j.jclepro.2020.123062](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123062)

K.S. Al-Jabri, A.H. Al-Saidy, R. Taha, A.J. Al-Kemyani, *Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete*, *Procedia Eng.* 14 (2011) 370–376, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.046>.

- Li, N., Long, G., Ma, C., Fu, Q., Zeng, X., Ma, K., et al., 2019. *Properties of self- compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: a comprehensive study*. J. Clean. Prod. 236, 117707.
- Meador, M.R., Layher, A.O., 1998. *Instream sand and gravel mining: Environmental issues and regulatory process in the United States*. Fisheries 23 (11), 6–13. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1998\)023<0006:ISAGM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1998)023<0006:ISAGM>2.0.CO;2).
- Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., Horvath, A., 2017. *Towards sustainable concrete*. Nat. Mater. 16, 698–699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
- Padmalal, D., Maya, K., Sreebha, S., Sreeja, R., 2008. *Environmental effects of river sand mining: A case from the river catchments of Vembanad lake, Southwest coast of India*. Environ. Geol. 54 (4), 879–889. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0870-z>.
- Peck Yen, T., Rohasliney, H., 2013. *Status of water quality subject to sand mining in the Kelantan River, Kelantan*. Trop. Life Sci. Res. 24 (1), 19–34.
- Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Faleschini, F., Manso, J.M., Ortega-López, V., 2020. *Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: an overview*. J. Clean. Prod. 262, 121362.
- S. Shahidan, A. Abdul Kadir, L. Hai Yee, N.I.R. Ramzi, F. Sheikh, *Utilizing slurry and carwash wastewater as fresh water replacement in concrete properties*, MATEC Web Conf 103 (2017), <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301020>.
- Timofeeva, Y.R., Suhacheva, E.Yu, Zakharova, M.K., 2021. *Soil cover of areas of mining sand and sand-gravel material in the Leningrad region*. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 862 (1), 012064 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012064>.



RECUPERACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES

SECCIÓN 3

RECUPERACIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES (RC)

Evaluación geotécnica del comportamiento del fenómeno de agrietamiento del edificio de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la zona Histórica de Morelia, Michoacán, México. <i>F. J. Jerónimo-Rodríguez, W. Martínez-Molina, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez-García, M. A. Navarrete Seras, M. Arreola-Sánchez, J. A. Bedolla-Arroyo (RC-208-MX).</i>	1
Respuesta térmica y energética del sistema alternativo muro de bahareque. <i>R. Alavez Ramirez, M. Ortiz Guzmán, V. J. Morales Domínguez, J. L. Caballero Montes (RC-276-MX)</i>	15
Prueba química de la argamasa de cimentación de un monumento histórico del siglo XVIII, respecto a la argamasa de restauración del INAH Oaxaca. <i>A. M. Hernández-López, H. Gómez-Barranco, A. Parra-Parra (RC-301-MX)</i>	28
Comparativa de propiedades térmicas de pasta de cal y morteros de cal con incorporación de PET y carbonato de calcio para mejorar el aislamiento en edificaciones. <i>E. G. Navarro Mendoza, E. M. Alonso Guzmán, J. A. Ojeda Sánchez, H. Becerra Santacruz, J. A. Bedolla Arroyo (RC-333-MX)</i>	39
Proceso constructivo de represa de ferrocemento para captar agua de lluvia en arroyos secos en Valles Centrales de Oaxaca. <i>M. Ortiz Guzmán, V. J. Morales Dominguez, R. Alavez Ramírez, V. G. Jiménez Quero (RC-347-MX)</i>	49



Evaluación geotécnica del comportamiento del fenómeno de agrietamiento del edificio de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la zona Histórica de Morelia, Michoacán, México

F. J. Jeronimo-Rodriguez^{1*}, W. Martínez-Molina¹, E. M. Alonso-Guzmán^{1,2}, H. L. Chávez-García¹, M. A. Navarrete Seras¹, M. Arreola-Sánchez¹ y J. A. Bedolla-Arroyo²

*Autor de Contacto: felipe.jeronimo@umich.mx

¹Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

²Especialidad en Restauración de Sitios y Monumentos, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el comportamiento del fenómeno de agrietamiento de la Facultad de Derecho y Ciencia Sociales y las posibles alternativas de solución a partir del conocimiento geotécnico de las propiedades índice y mecánicas del suelo. Investigación de los antecedentes del fenómeno de agrietamiento en monumentos históricos, muestreo de los materiales del lugar, para la realización de ensayos de laboratorio, determinación de propiedades índice, mecánicas y ensayos no destructivos, con los resultados obtenidos de las pruebas geotécnicas del suelo, se realiza evaluación del fenómeno de agrietamiento. Se realiza la caracterización de los parámetros de los materiales. Dado que se trata de monumentos históricos, el número de muestreo queda restringido y se complementa con pruebas no destructivas como son las tomografías del suelo. Se trata de construcciones de la época virreinal, protegidas como patrimonio monumentos históricos. Se concluye lo siguiente: El suelo está compuesto por arenas arcillosas (SC), arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH) y arena limosa ó tobas riolíticas (SM ó Ta). Se encontró 3 problemas principales: 1). Diseño de la mampostería de cimentación y dimensionamiento. 2). Deformación lateral del suelo, 3). Capacidad de carga y asentamientos.

Palabras clave: Agrietamientos; Pruebas no destructivas; Monumentos históricos.

1. INTRODUCCIÓN

En este tema de investigación, se utiliza la aplicación de la ingeniería geotécnica, ya que no es común mencionar la geotecnia, en las construcciones antiguas, como son los monumentos históricos, porque generalmente se enfocan en los materiales de construcción (roca, mortero de suelo como aglutinante, madera y acabados), en este caso aplicaremos la geotecnia como el estudio inicial, para ello, es importante recordar que la geotécnica, es la rama de la ingeniería que trata con el estudio y la solución de los problemas relacionados con el comportamiento de los suelos y rocas, con relación a las obras de ingeniería civil, por lo que se realizó el estudio geotécnico (mecánica de suelos, mecánica de rocas y geofísica), para realizar el Diagnóstico de Comportamiento (Fenómeno de agrietamiento) y en particular nos referimos a la problemática que se ha presentado en la Columna, Muro, Piso de la Dirección, de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, de la UMSNH, Morelia, México, donde se tienen específicamente deformaciones y agrietamientos en los muros, pisos. Para ello es necesario realizar la evaluación de la problemática presentada y realizar el diagnóstico y análisis correspondiente, ubicada en la Av. Tata Vasco #200, Colonia Centro, Morelia, Mich. Por lo cual fue necesario realizar un estudio integral, para definir previamente las condiciones geotécnicas del sitio, tales como: las propiedades índices (contenido natural de agua, granulometrías, límites, pesos volumétricos, etc.) y mecánicas (cohesión, ángulo de fricción interna, etc.). Esto es con el fin principal de determinar la capacidad de carga del terreno, conclusiones y recomendaciones generales, para el análisis de comportamiento del proyecto ya mencionado. El estudio se realizó mediante la exploración y el muestreo de un Pozo a Cielo Abierto (PCA-1) de 2.00 m de profundidad y la determinación de una tomografía eléctrica, mediante un estudio geofísico eléctrico hasta 15.30 m de profundidad, distribuidos en el terreno en forma representativa para el mejor reconocimiento estratigráfico.

2. METODOLOGÍA

La conceptualización de este trabajo de investigación, fue necesario realizar el reconocimiento de campo, para planificar y considerar aquellos factores que pueden influir en la investigación, como son los accesos, limitaciones y características fisiográficas de la zona, con base a ello programar los métodos de exploración y muestreo de campo, que sean los más representativos, de tal manera que el proyecto se estructuró de la siguiente manera:

Fase 1: Determinar las condiciones geotécnicas del sitio, mediante la investigación, métodos exploración y muestreo en sitio, tomando en cuenta que se trata de una construcción antigua (monumento histórico), por lo que se limita a un número mínimo de muestreo, con métodos destructivos como en nuestro caso, fue mediante un (1.0) pozo a cielo abierto (PCA-1) y por tal motivo se hace la utilización de métodos de exploración no destructivos como es el caso del uso de ensayos geofísicos eléctricos y en nuestro caso fue mediante técnica de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), mediante una línea calicata eléctrica.

Fase 2: Una de las maneras más comunes para obtener los parámetros mecánicos de un material es mediante las pruebas de laboratorio. En esta fase se describe los ensayos de laboratorio, de las muestras geotécnicas (alteradas e inalteradas) tomadas del pozo a cielo abierto (PCA-1), con el fin de obtener los parámetros ó características de las propiedades índices y mecánicas del suelo.

Fase 3: De los resultados obtenidos de las pruebas geotécnicas del suelo, se realiza el análisis e interpretación de los resultados y las alternativas de solución al fenómeno de agrietamiento al área



de la dirección de la Facultad de Derecho y Ciencia Sociales de la zona historia de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México.

2.1 Información general de la zona

El sitio en estudio se localiza geográficamente a una altura promedio de 1920 m.s.n.m., en las coordenadas geográficas 19°42'01.50'' de latitud norte y 101° 10' 39.74'' de longitud oeste. La zona en estudio se localiza en la Plaza San Diego ó Plaza Morelos, en la zona Este, en dirección Oriente, en la Dirección de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, de la UMSNH, aproximadamente a 1.56 km del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia, hacia el sitio en estudio, que se ubica en la Av. Tata Vasco No. 200, Colonia Centro, de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. (Figura 1, Figura 2), al sur del Templo a San Diego (Virgen de Guadalupe), en la Plaza Morelos, la Colonia Centro, colinda al norte con la colonia Obrera, Colonia Industrial y la Colonia Melchor Ocampo, al poniente colinda con la Colonia Las Flores, Gertrudis Bocanegra, La Nueva Valladolid y la Colonia Morelos, al sur colinda con Molino de Parras, Benito Juárez, Ventura Puente y la Colonia Cuauhtémoc, al oriente colinda con la Colonia Vasco de Quiroga, Colonia Independencia y la Colonia Cuauhtémoc. El municipio de Morelia colinda al norte con Huaniqueo, Chucandiro, Copándaro, Tarímbaro y al poniente con Coeneo, Quiroga, Lagunilla, Tzintzuntzan, Huiramba, Patzcuaro, al sur con Acuitzio, Villa Madero y al oriente con Charo y Tzitzio. El clima que predomina en la zona en estudio es el clima Templado, de régimen térmico aproximado de 14 a 18 °C y una precipitación pluvial total anual de 700 a 1,000 mm, cuya vegetación corresponde a zonas de matorrales subtropicales, localizados hacia la parte septentrional del estado, las que se caracterizan por sus cultivos de temporal. En general se encuentra ubicado en una zona plana de ligera pendiente sur-norte, donde se encuentran superficialmente arcillas inorgánicas de alta plasticidad negra (CH) y subyaciendo se tienen limos inorgánicos de alta compresibilidad (MH), cafés claros y arenas limosas café blanquizcos (SM).

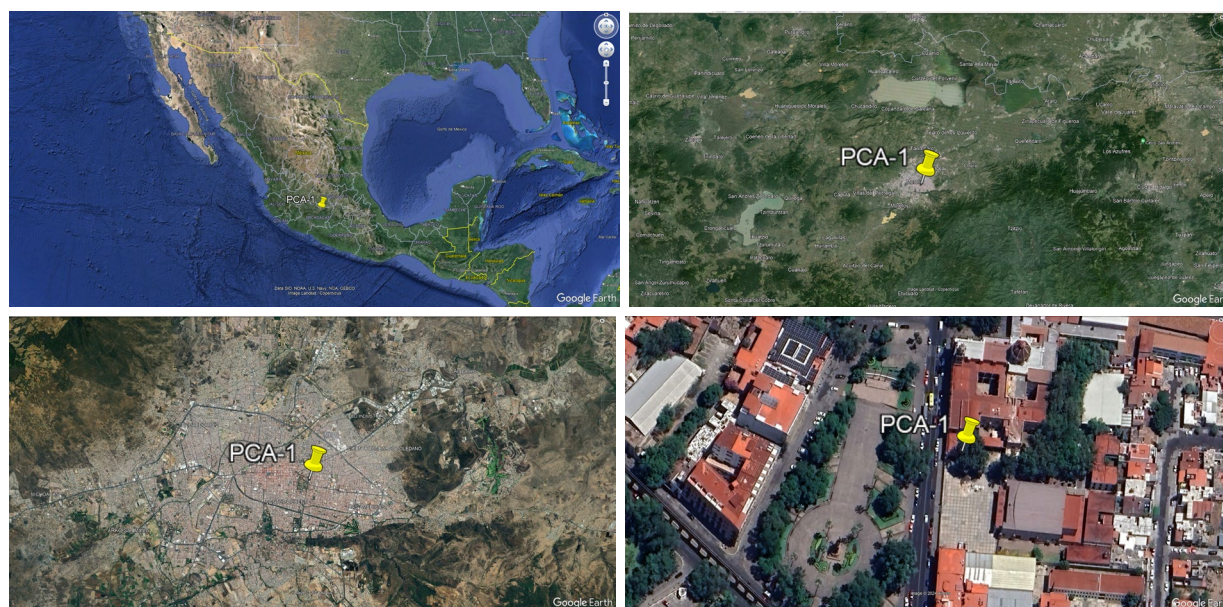


Figura 1. Croquis de localización (Ubicación satelital de Google Earth al sitio en estudio), ubicado en la Dirección de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, de la UMSNH, de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México.



Figura 2. Vista panorámica, diferentes vistas, de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, de la UMSNH, de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México.

2.2 Métodos exploración y muestreo en sitio

2.2.1 Mediante pozos a cielo abierto (P.C.A.)

Se realiza una excavación, manualmente ó con maquinaria (retroexcavadora), con dimensiones tales que sea posible el acceso de un hombre para observar el material, extraer muestras alteradas e inalteradas y realizar pruebas de resistencia en el lugar (comúnmente el diámetro ó ancho del pozo es al menos de 1.0 m). Se recomienda que la forma de la excavación sea rectangular con el fin de poder realizar adecuadamente el muestreo del suelo, para suelos muy blandos se colocará un ademe (madera o concreto) para evitar desprendimientos locales de material.

En nuestro caso los trabajos de campo consistieron en la exploración y el muestreo de los diferentes materiales que forman el subsuelo, observado en un (1.0) pozo a cielo abierto (NMX-C-430-ONNCCE-2002) ver Figura 3.

Se extrajeron muestras inalteradas (M.I.) del PCA, además la consistencia natural del suelo varió de “muy firme” a “dura” en la zona de muestreo y posteriormente en el laboratorio determinar sus propiedades índice y mecánicas (NMX-C-432-ONNCCE-2002), de esa forma poder calcular los parámetros de resistencia.

Además, se extrajeron muestras alteradas (M.A.) de los materiales que constituyen los distintos estratos del subsuelo, para determinar sus propiedades índices (NMX-C-493-ONNCCE-2018), lo cual se observa también en el perfil estratigráfico y resultados de laboratorio.



Figura 3. Proceso de excavación y muestreo de los pozos a cielo abierto (PCA).

2.2.2 Mediante exploración geofísica (TRE)

En el presente estudio se llevó a cabo un levantamiento de geofísico, aplicando la técnica geoelectrica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), con el fin de caracterizar mediante una imagen bidimensional, los cambios resistivos de las unidades de suelo y litológicas que hacen parte de la configuración geológica del subsuelo. La técnica de TRE, ha sido un gran aliado para la interpretación de variaciones geoelectricas y/o cambios abruptos en las líneas de iso-resistividad, que dan indicio sobre la presencia de fracturas, fallas, cavidades, subsidencias, entre otros; incluyendo la distribución espacial de las unidades litológicas.

De acuerdo con los objetivos y alcances de los trabajos de exploración geofísica, los trabajos de campo consistieron en la ejecución de las siguientes actividades. En la Tabla 1, se enlistan las TRE realizadas con su respectivo punto de coordenada inicial y final.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), se realizó la exploración dentro de la dirección de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la UMSNH, las coordenadas se muestran en la Tabla 1. La adquisición se llevó a cabo con arreglo Polo-Dipolo y una profundidad de investigación máxima de 15 metros; para la adquisición se empleó un resistivímetro con accesorios especializados para dicha técnica.

La instrumentación, en cuanto al equipo geofísico usado para el levantamiento de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, se hizo uso del instrumento manual para sondeos geoelectricos EAG-2KX.

- Transmisor con una potencia de 600 W.
- Potencia = 600 W. Corriente hasta 2.0 A.
- Voltaje hasta 2000 V. Voltaje de salida, de 100 a 600 V.
- Protección: Fusible de cerámica de 10 A 600 V.
- Receptor de Potencial. Rango de Potencial Inducido. de 200 mV hasta 20 V. (0.200 < 20 V).
- Error por lectura= $\pm 0.5 \%$.

- Receptor de inyección de Corriente. Ambos receptores funcionan en intervalos de temperatura de funcionamiento de 0 °C a 40 °C (32 °F a 104 °F).
- Los receptores cuentan con un fusible de protección de entrada de 10 A (fusible cerámico de 10 A 600 V) y alimentación interna mediante una batería de 9 VCD.
- Impedancia de los receptores = 10 MOhms con 1.2 % de error, si la impedancia del circuito es < 10 MOhms, el error se reduce por debajo del 0.1 %.
- La fuente de alimentación del EAG-2KX es una batería recargable de ácido plomo de 12 V, 24 Ah o planta de generación eléctrica con potencia superior a los 700 watt.

Tabla 1. Coordenadas de localización de la TRE.

Prueba realizada	Coordenadas UTM (14Q)				Longitud y profundidad de exploración	
	Inicio		Fin		Long (m)	Prof (m)
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)		
TRE-1 Dirección	271,719.80	2,179,782.19	271,794.22	2,179,773.79	74	15

La resistividad es una medida de la dificultad de paso de la corriente eléctrica a través de un material determinado; la resistencia de un conductor es independiente de la corriente y del voltaje aplicado. Por lo tanto, el valor de la resistividad resulta como la ecuación (1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Donde:

- ρ_a : resistividad aparente (Ohm*m).
 K: constante del arreglo geométrico empleado (m).
 ΔV : diferencia absoluta de voltaje natural e inducido (Volts).
 I: corriente inyectada (Ampere).

En las siguientes imágenes de la Figura 4, se muestra el habilitado y proceso de realización de la tomografía de resistividad eléctrica, para el caso de la zona de estudio y debido a sus condiciones geotécnicas y geológicas, se puede tomar como base la siguiente Tabla 2, que es una combinación de las realizadas por Orellana (1972) y la propuesta por Astier (1975), en las que se reportan valores típicos de arcillas y roca volcánica como en este caso de estudio particular.



Figura 4. El instrumento de medición es un resistivímetro en corriente continua de la Tomografía Geoeléctrica.

Tabla 2. Valores de resistividad y materiales geológicos. Orellana (1972), Astier (1975).

Resistividad [Ohm*m]	Tipo de material
1-100	Arcillas
50-100	Limos
100-1000	Arenas
1000-100000	Rocas volcánicas sana
10-100	Agua dulce

2.3 Ensayes realizados en el laboratorio

Los trabajos de laboratorio consistieron en realizar los ensayos correspondientes como se muestra en la Figura 5, para determinar las propiedades índice y mecánicas de los materiales y en este caso las propiedades índices: son el Contenido natural de agua (w %), Porosidad (n), Relación de vacíos (e), Peso Volumétrico (γ_m), Granulometría, Grado de saturación (G_w), Compacidad o Densidad relativa (D_r), Límites de consistencia (LL, LP, IP, CV, CL, etc.), Consistencia Natural (q_u) y son aquellos ensayos de clasificación de los suelos, que nos indican desde el punto de vista cualitativo el comportamiento mecánico del suelo y el nombre de los suelos con base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos llamado SUCS. Y las propiedades mecánicas (Compresión sin confinar, Compresión triaxial UU, Compresión Triaxial rápida, no consolidada y no drenada, Consolidación unidimensional), son aquellas propiedades que predicen el comportamiento mecánico del suelo, desde el punto de vista cuantitativo.



Figura 5. Proceso de realización de las propiedades índice y mecánicas (contenido de agua, granulometrías, límites de consistencia, densidad de sólidos, PVHL, compresión simple, triaxiales, consolidación.).

3. RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron en nuestro laboratorio se resumen en la Tabla 3 y Tabla 4, donde todas las pruebas fueron realizadas mediante un adecuado control de calidad, con la finalidad de dar la confiabilidad requerida a los resultados.

3.1 Resultados obtenidos del pozo a cielo a abierto (PCA)

A continuación, se presenta los parámetros de los suelos, determinados en los ensayos de laboratorio, como son las propiedades índices (NMX-C-493-ONNCCE-2018) y mecánicas (NMX-C-432-ONNCCE-2002), en donde los suelos encontrados fueron como relleno una arena limosa (SC), de consistencia natural muy firme, color gris oscuro y subyaciendo se tiene una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH), de consistencia natural muy firme, color negro, a mayor profundidad se tiene el limo inorgánico de alta compresibilidad (MH), de consistencia natural dura, color café blanquizco, de acuerdo a la clasificación SUCS de las siguientes tablas, Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de laboratorio de las propiedades índices.

Parámetros obtenidos de las propiedades índices			
PCA No.	1	1	1
Estrato No.	Relleno	1	2
Profundidad de la muestra (m)	0.60	1.20	1.90
Tipo de muestra	M.A.	M.I.	M.I.
Granulometría			
% De fragmentos de roca	0	0	0
% Pasa malla 3"	100	100	100
100% pasa malla No. 4	79	100	100
% Pasa malla No. 40	50	94	96
% Pasa malla No. 200	38	80	86

Tabla 4. Resultados de las pruebas de laboratorio de las propiedades índices y mecánicas. (continuación).

Parámetros obtenidos de las propiedades índices			
PCA No.	1	1	1
Estrato No.	Relleno	1	2
Profundidad de la muestra (m)	0.60	1.20	1.90
Tipo de muestra	M.A.	M.I.	M.I.
Límites de consistencia			
% Humedad natural (w)	19.16	39.26	20.20
% Limite líquido. (LL)	48.32	58.31	71.16
% Limite plástico. (LP)	24.29	25.90	41.82
% Índice plástico (IP)	24.53	32.41	29.34
% Contracción lineal (CL)	8.49	15.65	12.94
% Limite de contracción (CV)	20.50	16.80	25.40
Clasificación SUCS	SC	CH	MH
Consistencia natural / densidad relativa	Muy firme	Muy firme	Dura
Con penetrómetro de bolsillo (kg/cm ²)	3.50	2.75	>4.00
Relaciones volumétricas y gravimétricas			
Peso volumétrico del lugar en γ_m (tn/m ³)	1.552	1.686	1.506
Densidad de sólidos (Ss)	-	2.72	2.56
Relación de vacíos (e)	-	1.2	1.0
Porosidad en % (n)	-	55.5	51.1
Grado de saturación en % (Gw)	-	85.7	49.6
Parámetros obtenidos de las propiedades mecánicas			
Prueba de compresión sin confinar			
Resistencia en kg/cm ² (qu)	-	1.10	2.00
Cohesión en kg/cm ² (c)	-	0.55	1.00
Prueba de compresión Triaxial UU (No consolidada no drenada)			
Cohesión en kg/cm ² (c)	-	0.32	0.45
Angulo de fricción (ϕ)	-	19°	26°
Prueba de consolidación			
Carga de preconsolidación en kg/cm ² (Pc)	-	0.86	

3.2 Resultados obtenidos mediante la exploración geofísica (TRE)

Este capítulo tiene el propósito de presentar los resultados del estudio geofísico, correspondiente a la línea de exploración mediante la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) con arreglo Polo-Dipolo y longitud horizontal de 74 metros. Derivado de las inversiones de los resultados adquiridos en campo y tratados en gabinete, se interpretó con el cambio de contrato de la línea de iso-resistividad y sus correlaciones geotécnico, geológico-estructurales en el subsuelo. A continuación, se presenta el resultado obtenido a partir de la línea de inspección mediante TRE con un arreglo eléctrico Polo - Dipolo, los cuales incluyen el contenido siguiente:

- Modelo inverso de la sección de resistividad 2D.
- Interpretación de resultados.



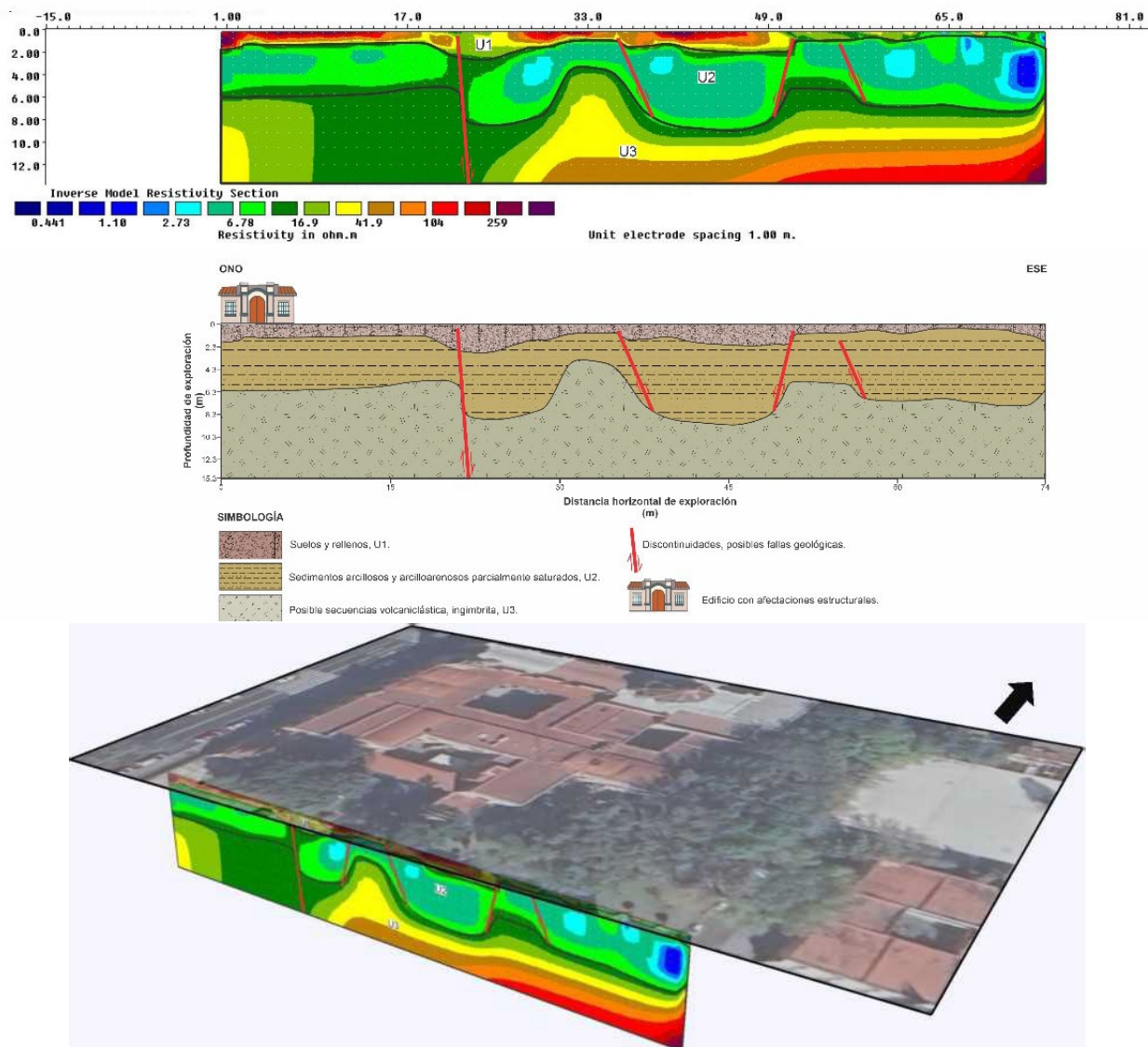


Figura 6. Tomografía de Resistividad Eléctrica e interpretación geológica a partir de los datos recabados en campo.

El procesamiento de los datos obtenidos en campo permitió obtener el modelo de la Figura 6, el cual es coherente con las condiciones geotécnicas y geológicas del sitio. La TRE obtenida muestra de manera clara de acuerdo a las variaciones de los valores de resistividad, tres unidades que hacen parte de la estratigrafía del sitio.

3.3 Cálculo de capacidad de carga

Con base a los resultados obtenidos de laboratorio y la caracterización de los parámetros geotécnicos, se puede considerar que toda estructura debe apoyarse necesariamente en el terreno estable. Sin embargo, en comparación con el resto de los materiales estructurales, como el concreto ó el acero, el suelo es menos resistente. Por consiguientes, no puede resistir los mismos esfuerzos y es necesario proporcionar a la estructura, una cimentación que distribuyan y transmitan al terreno

los esfuerzos que sean compatibles con su resistencia y con su deformación. A continuación, se hace el cálculo de capacidad de carga ver Tabla 5 y Tabla 6.

Ecuación general de Terzaghi -Vesic:

$$q_u = cN_cS_c + Df\gamma_mN_q + 0.5\gamma_mN_\gamma S_\gamma B \tag{2}$$

Ecuación para falla local de acuerdo a la consistencia natural del suelo:

$$q_u = 2/3[cN_cS_c] + Df\gamma_mN_q + 0.5\gamma_mN_\gamma S_\gamma B \tag{3}$$

$$\phi' = \tan^{-1}[2/3(\tan \phi)] \tag{4}$$

$$q_{adm} = \frac{q_u}{F.S.} \tag{5}$$

Tabla 5. Parámetros de resistencia del suelo para el PCA-1.

PCA	Estrato	Prof.		Esp.	γ_m	qu Penetróm. de bolsillo	qu	c	ϕ	Tipo de suelo
		de	a							
No.	No.	(m)	(m)	(m)	(t/m ³)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	(°)	
PCA-1	Relleno	0.20	0.80	0.60	1.552	3.50	-	-	-	SC
	1	0.80	1.60	0.80	1.686	2.75	1.10	0.32	19°	CH
	2	1.60	2.00	0.40	1.506	>4.00	2.00	0.45	26°	MH

Sustituyendo en la ecuación anterior se tiene lo siguiente y por la rigidez del suelo por tener una consistencia natural del suelo “firme” a “dura”, se considera que es de falla local:

Tabla 6. Cálculo de capacidad de carga para las diferentes profundidades.

Zapatas Continuas					Zapatas Aisladas				Tipo de Suelo
Df	q adm (t/m ²)				q adm (t/m ²)				SUCS
1.00	8.77	+	0.55	B	10.85	+	0.44	B	Estrato 1 (CH negro).
1.20	9.13	+	0.55	B	11.22	+	0.44	B	
1.50	9.68	+	0.55	B	11.76	+	0.44	B	
1.60	9.86	+	0.55	B	11.95	+	0.44	B	
1.65	16.16	±	1.02	B	20.10	±	0.82	B	Estrato 2 (MH).
1.80	16.56	+	1.02	B	20.49	+	0.82	B	
2.00	17.09	+	1.02	B	21.02	+	0.82	B	
2.50	18.41	+	1.02	B	22.34	+	0.82	B	
3.00	19.73	+	1.02	B	23.66	+	0.82	B	



3.4 Inspección visual de la visita de obra

Con relación a la Dirección de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, que se ubica en la Av. Tata Vasco #200, Col. Centro, Morelia, Mich., donde se realizó la visita de obra y se detectó físicamente fisuras, grietas en muros y pisos, para ello se hacen los siguientes comentarios, se observan 3 problemas principales: a) Problemas de diseño de la mampostería de cimentación (dimensionamiento), del lado oriente. b) Problema de deformación lateral de la arcilla negra, por saturación en temporada de lluvias y por el sistema de riego del jardín que se ubica a un costado. c) Problema de capacidad de carga y asentamientos al saturarse. La cimentación actual, requiere de un tratamiento, es necesario recimentar, ampliar el dimensionamiento ó reforzar toda la estructura, mediante la restauración, por ser una estructura antigua y estar en la zona colonial y de monumentos históricos, como se puede apreciar en la Figura 7.



Figura 7. Vista general del sitio en estudio, donde se observan algunas grietas en los pisos, pero principalmente en los muros y columnas.

3.5 Alternativas de solución al fenómeno de agrietamiento

Tratamientos a seguir para disminuir ó eliminar las deformaciones verticales, horizontales y agrietamientos, generados por las arcillas deformables y principalmente para mejorar su comportamiento. Dado que se observan 3 factores ó problemas principales que originaron el fenómeno de agrietamiento como son: a) Problema de diseño de la mampostería debido al dimensionamiento de la cimentación y materiales que componen a la estructura de la cimentación. b) Problema de deformación lateral de la arcilla negra que confina a la cimentación, por la saturación en temporada de lluvias y sistema de riego al jardín que se ubica a un costado. c) Problema de capacidad de carga y asentamientos, como consecuencia de los 2 problemas anteriores.

1ª. Alternativa, mediante la recimentación con zapatas continuas de concreto armado: Esta alternativa es utilizar la cimentación continua de concreto armado, puesto que la cimentación actual, se encuentra desplantado en la transición de los estratos de suelo, es decir, en la transición del estrato 1, formado por una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH) negra y el estrato 2 formado por un limo inorgánico de alta compresibilidad (MH), de consistencia natural dura, color café claro, y predomina en la profundidad del desplante de la cimentación, el estrato de arcilla negra (CH), por lo que, este suelo es deformable. Además, la cimentación existente está formada por mampostería cementada con arcilla, el cual se vuelve una cimentación deformable, por la degradación del cementante ó el mortero de suelo que aglutina a la cimentación formada por la mampostería, por la presencia del agua. Por lo que, de preferencia se recomienda una cimentación rígida, que no tenga el problema de la deformación por la presencia del agua. Es por eso que se recomienda una cimentación a base de zapatas continuas de concreto reforzado.

2ª. Alternativa, mediante mampostería, con cementación natural, a base de arcilla con cal. Se puede utilizar una cimentación a base de mampostería cementada con arcilla de baja plasticidad (CL, suelo cohesivo) y cal, de acuerdo a las recomendaciones ó protocolo de restauración que marca INAH. La desventaja de esta alternativa es que es susceptible a la deformación y degradación ante la presencia del agua, principalmente porque estará debajo del suelo (por temporada de lluvias ó por sistema de riego a los jardines que se encuentra cerca). Por este motivo es necesario valorar el uso de esta alternativa, mediante sus ventajas y desventajas.

3ª. Alternativa, mediante mampostería con suelo-cemento fluido ó suelo-cemento ciclópeo. Esta alternativa es usar un suelo inerte (No cohesivo ó friccionante), puede ser una ceniza volcánica (SM) ó un tepetate inerte (SM), mezclado con cemento en menor cantidad, es decir, únicamente para darle la cementación necesaria al suelo. El concepto general del suelo-cemento fluido (Cemento en 5 % a un 15 %, Suelo fino y Agua), a diferencia del concreto hidráulico (Cemento, Grava, Arena, Agua, el material pétreo, debe ser graduado), es que el suelo-cemento fluido, presenta la apariencia de un suelo cementado (tepetate formado artificialmente) y puede utilizarse como mortero, para la mampostería de roca, la ventaja es que tiene la apariencia de un suelo y puede ser de poco a nula deformación, ante la presencia del agua. Si el suelo es inerte, la presencia del agua le favorece al fraguado a través del tiempo. Además, del cemento, existen también aditivos (MAXEh) que inciden en la adherencia y petrificado de las mezclas del suelo-cemento fluido. Por lo que puede ser una alternativa de solución a los problemas de los monumentos históricos.

4ª. Adicional a las propuestas anteriores, construir un muro pantalla, en forma perimetral en el lado oriente, donde se encuentra el jardín, que viene siendo, la zona en donde se humedece más, por el sistema de riego al jardín, desplantado en el estrato 2 (MH), mediante suelo-cemento fluido ó suelo-cemento ciclópeo. Esto reducirá en gran medida la saturación del estrato de suelo arcilloso que presenta el fenómeno de variación volumétrica y disminución del esfuerzo cortante del suelo. Estas alternativas tienen que ser valorados, por los especialistas del área de Ingeniería Estructural, por especialista en monumentos históricos y por INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia).

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de laboratorio, el suelo está compuesto superficialmente por un relleno formado por una arena arcillosa (SC), de consistencia natural muy firme y el estrato de arcilla inorgánica de alta plasticidad negra (CH), de consistencia natural muy firme, subyaciendo se tienen limos inorgánicos de alta compresibilidad café claro (MH), de consistencia natural dura, arena limosa ó tobas riolítica (SM ó Ta), prevaleciendo la consistencia natural “dura” a nivel de la cimentación.

Finalmente, con base al estudio geotécnico y geofísica realizado, evaluación de la visita de obra, y comportamiento general, se concluye lo siguiente: Se encontró 3 problemas principales, como son: 1). Problemas de diseño de la mampostería de cimentación (dimensionamiento). 2. Problema de deformación lateral del estrato 1, formado por la arcilla negra (CH), por la saturación en temporada de lluvias y sistema de riego al jardín que se ubica a un costado. 3. Problema de la capacidad de carga y asentamientos, por los dos problemas presentados anteriormente y como consecuencia, se tiene físicamente el fenómeno de agrietamientos en el muro y en el piso. También, influyo por ser construcciones antiguas, los materiales empleados, como es el caso de la degradación del cementante ó material de mortero que aglutina a la mampostería, por estar formado por una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL), que con la presencia de agua (temporada de lluvias y sistema de riego de los jardines), se saturo y deformó, generando el fenómeno de agrietamiento. Existen diferentes alternativas de solución, sin embargo, por ser una estructura colonial, deberá restaurarse con base al protocolo que maneja INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) y con las recomendaciones geotécnicas señaladas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos, a la coordinación del Programa de Doctorado en Ingeniería Civil al Dr. Francisco Domínguez Mota, a la Facultad de Ingeniería Civil, al Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que otorgaron el apoyo necesario para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece al CONAHCYT por el apoyo otorgado al programa de posgrado, Doctorado en Ingeniería Civil y del autor M. en I. Felipe de Jesús Jerónimo Rodríguez. Especial el agradecimiento para los Dr. Wilfrido Martínez Molina y la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por motivarnos a la realización de estos trabajos de investigación.

6. REFERENCIAS

- Astier, J. (1975), “*Geofísica Aplicada a la hidrogeología*”. Paraninfo, Madrid. p. 341.
- Orellana, E. (1972), “*Prospección geoeléctrica en corriente continua*”. Segunda edición corregida y ampliada. Paraninfo, Madrid, p. 569.
- NMX-C-430-ONNCCE-2002. (2002). *Industria de la Construcción, Geotecnia, Cimentaciones, Sondeos de Pozo a Cielo Abierto*. CDMX, México. ONNCCE.
- NMX-C-432-ONNCCE-2002. (2002). *Industria de la Construcción, Geotecnia, Cimentaciones, Ensayo de Compresión Triaxial - Método de Prueba*. CDMX, México. ONNCCE.
- NMX-C-493-ONNCCE-2018. (2018). *Industria de la Construcción, Geotecnia, Límites de consistencia de suelos, Método de ensayo*. CDMX, México. ONNCCE.





Respuesta térmica y energética del sistema alternativo de muro de bahareque

R. Alavez Ramirez^{1*}, M. Ortiz Guzmán¹, V. J. Morales Domínguez¹, J. L. Caballero Montes¹

*Autor de Contacto: arrafael@yahoo.com.mx

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México.

RESUMEN

El sector de la construcción consume alrededor de un tercio del consumo total de energía en el mundo, por tanto, la arquitectura debe adoptar criterios de diseño sostenible. En el presente trabajo se caracterizó térmicamente el sistema de bahareque, técnica constructiva monolítica de tierra y fibras. El análisis experimental se basó en la climatología dinámica. En una primera fase se determinó la conductividad térmica de la matriz de tierra y fibra utilizada en el sistema de muro; para el análisis del amortiguamiento y retardo termico del sistema de muro se tomaron en cuenta la radiación solar y temperaturas superficiales. Para el análisis energético se utilizó el software Ener-Habitat. Las propiedades térmicas fueron mejores en el muro de bahareque respecto a un sistema convencional. La conductividad térmica obtenida en la matriz suelo-fibra del bahareque fue de 0.09 W/m² valor considerado como un material aislante, El retraso termico fue de dos horas y amortiguamiento termico de 0.57, mientras que para un muro de concreto el retraso termico fue de una hora y un amortiguamiento termico de .8275. Se concluye que el sistema de muros de bahareque sigue siendo una alternativa ecológica para lograr condiciones de confort termico y ahorro de energía.

Palabras clave: Muro de bahareque, inercia térmica, análisis energético

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en la edificación es un factor importante en la contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La edificación y el sector de la construcción representa el 30% y 40% de todo el mundo en consumo de energía (United Nations Development Programme; Paris, France). En México aproximadamente el 30% del total de consumo de energía corresponde a los sectores residencial, comercial y de servicios. Se estima que cerca del 35% de esta energía es empleada para el acondicionamiento de las edificaciones (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica). Por lo tanto, la calefacción y refrigeración de espacios representan la mayor oportunidad de reducir el consumo de energía en el sector de la edificación. La envolvente de un edificio energéticamente eficiente puede jugar un papel crucial en reducir la demanda de refrigeración del edificio mediante la regulación del comportamiento térmico interior del edificio [F. Kheiri, 2018]. En México y Latinoamérica uno de los aspectos que contribuye al derroche energético son los sistemas de construcción industrializados. El conocimiento de las propiedades térmicas en los materiales de construcción puede incidir significativamente en el ahorro de la energía en México. Esta situación obliga a proponer materiales alternativos que ayuden a mejorar las condiciones de habitabilidad de la vivienda tanto rural como urbana. México cuenta con 34 inscripciones en la lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO, de las cuales 11 están vinculadas a la arquitectura de tierra, colocando al país en el primer lugar en América Latina y el sexto a nivel mundial en esta categoría. Estas construcciones vernáculas no solo demuestran eficiencia en el uso de materiales locales, sino que también reflejan la continua vigencia de sistemas constructivos como el adobe, el bahareque y la pared de mano en numerosos asentamientos humanos de México (Dani et al., 2022). La problemática del abandono de la arquitectura vernácula también ha sido reconocida por diversos autores que han trabajado en proyectos enfocados en el mejoramiento de la sustentabilidad y habitabilidad de la vivienda (León-Venegas, 2017), la aplicación de estrategias pasivas y diseño bioclimático (Ventura, 2022; D’Auria, 2015), así como en la preservación de conocimientos indígenas y tradiciones constructivas (Dani et al., 2022). El sistema constructivo de bahareque ha sido tradicionalmente utilizado en climas cálidos por sus habitantes. El sistema se ha desarrollado desde la época prehispánica en todo el continente, principalmente en Centro y Sudamérica, y se sigue utilizando hasta nuestros días gracias a su facilidad constructiva, los materiales utilizados son endémicos y económicos al alcance de las familias y sus capacidades de generar confort térmico al interior de los espacios. Bahareque se conoce como una técnica constructiva de tierra utilizada por los pueblos indígenas de diferentes partes del mundo, principalmente en las zonas tropicales, ya que para su realización se requiere de vegetación. La tierra se mezcla con fibras vegetales para rellenar la estructura y formar una unidad monolítica. Este sistema constructivo de bahareque consiste en un entramado de varas, maderas y/o ramas que dispuestas en forma vertical y horizontal se forma una capa doble que crea un espacio interior que se rellena con una mezcla de zacate y tierra del lugar, los diferentes colores del suelo del lugar integran el sistema al entorno dándole calidez. Las propiedades térmicas importantes de los elementos constructivos son la conductividad térmica, el amortiguamiento y retraso térmico. Se considera que la conductividad térmica sola no es un indicador confiable de ahorro de energía sobre todo cuando se trata de utilizar esta como un medio natural, además que no representa con exactitud el comportamiento térmico dinámico de un sistema (Tsilingiris, 2006). Fatiha et al. (2003), considera que la edificación debe ser diseñada para tener inercia térmica alta para conseguir temperaturas con ambientes confortables, sin embargo, la inercia térmica depende del



intervalo de tiempo y el factor de decremento que a su vez depende de una interacción compleja de la densidad del material, la capacidad de calor específico y la conductividad térmica. En el presente trabajo se caracterizó térmicamente el sistema de bahareque, Se determinó la conductividad térmica de la matriz de tierra y fibra utilizada en el sistema de muro; para el análisis del amortiguamiento y retardo termico del sistema de muro se tomaron en cuenta la radiación solar y temperaturas superficiales. Para el análisis energético se utilizó el software Ener-Habitat.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Estrategias de diseño bioclimático en climas cálidos.

Se determinaron estrategias de diseño bioclimático para la localidad Ixtaltepec Oaxaca del sur de México. Esta ciudad se encuentra en la Región del Istmo de Tehuantepec y tiene un clima cálido. Ixtaltepec ha utilizado la tecnología de bahareque en sus construcciones. Oaxaca limita al norte con Puebla y Veracruz, al sur con el Océano Pacífico, al este con Chiapas y al oeste con Guerrero (CIEED 2013). Se utilizó la herramienta BAT (Bioclimatic Analysis Tool), desarrollada por Víctor Fuentes Freixanet, para caracterizar el clima de Ixtaltepec (Rincón 2014). Se emplearon datos normalizados del periodo 1951-2010 del Servicio Meteorológico Nacional, obtenidos en la estación meteorológica 00020052 en Asunción Ixtaltepec, Oaxaca. Estos datos se utilizaron para analizar mensualmente la temperatura, radiación y humedad relativa. El análisis realizado por BAT incluye evaluaciones mensuales, horarias y paramétricas, esta última determina las estrategias de diseño basadas en el diagrama bioclimático de Olgyay (Olgyay, 1992), los triángulos de confort de Martin y las tablas de Mahoney (John, 1999; Koenigsberger, 1970).

2.2 Diseño y construcción de componentes constructivos a) Muro de bahareque (MB), b) Muro de concreto (MC).

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para comprender las características de construcción del sistema de muro de bahareque. Además, se realizaron visitas de campo en las áreas de estudio, donde se observó que el tipo de muro más utilizado es el de bahareque relleno con tierra y zacate. Se identificaron tres tipos de muros de bahareque: relleno con tierra, relleno con piedra y relleno con Zacate. Todos estos muros se basan en un marco de madera con un entramado de carrizo cada 10 cm, formando un entramado doble. El espesor del muro más común es de 18 cm. Tras analizar la información recopilada, se decidió realizar un análisis térmico del muro de bahareque relleno de Zacate y tierra siendo este el más utilizado.

La selección del suelo manejado en el muro de bahareque fue hecha considerando la textura del material que correspondió a un suelo con contenido de arcilla. En el banco de suelo se obtuvo un muestreo por cuarteo para obtener una muestra de suelo representativa de la zona de acuerdo con la normativa oficial Mexicana NOM-AA-61. Se realizó un análisis granulométrico del suelo tamizado de acuerdo con la norma ASTM D422, para esto se determinó el peso volumétrico seco del suelo utilizado. La prueba de granulometría se realizó de forma seca, para la fracción gruesa y húmeda para el material que pasó la malla número 4. Con la prueba granulométrica, se obtuvo el porcentaje de tamaño de partículas del suelo, indicando la cantidad que pasó a través de los tamices utilizados hasta la malla número 200. La figura 1 muestra la curva granulométrica para el material de banco. Se observa que el 100% del material paso el tamiz # 4, por lo que no se registraron retenidos. El análisis granulométrico del material fino muestra que el 31% paso la malla # 200 (0.075 mm) y el 69% se retuvo en la misma malla. La clasificación granulométrica se realizó de acuerdo con los



límites de consistencia y la carta de plasticidad (Casa grande; 1948). Los resultados de los límites fueron los siguientes: límite líquido (23.3), límite plástico (15.8), índice plástico (7.5) y contracción lineal (4.7). Por otra parte, al graficar el índice plástico y el límite líquido en la carta de plasticidad, se observó que el cruce de ambos se ubica por arriba de la línea A, con un $I_p > 7.5$ (Figura 2) esto indica de acuerdo con el Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) el suelo seleccionado con un 69% de finos se clasifica como suelo tipo CL o arena arcillosa de baja plasticidad.

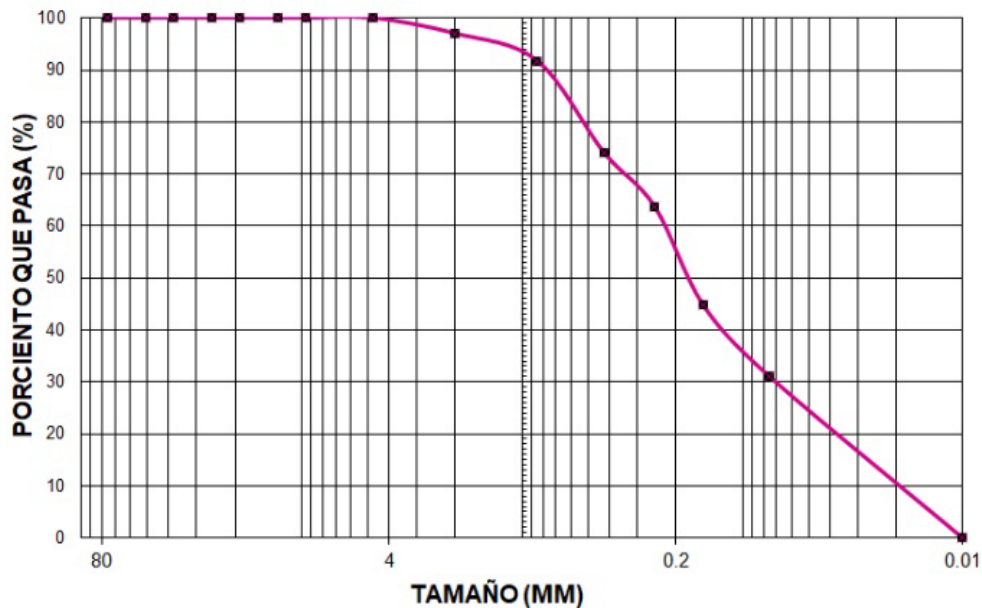


Figura 1. Granulometría del suelo utilizado en el muro de bahareque.

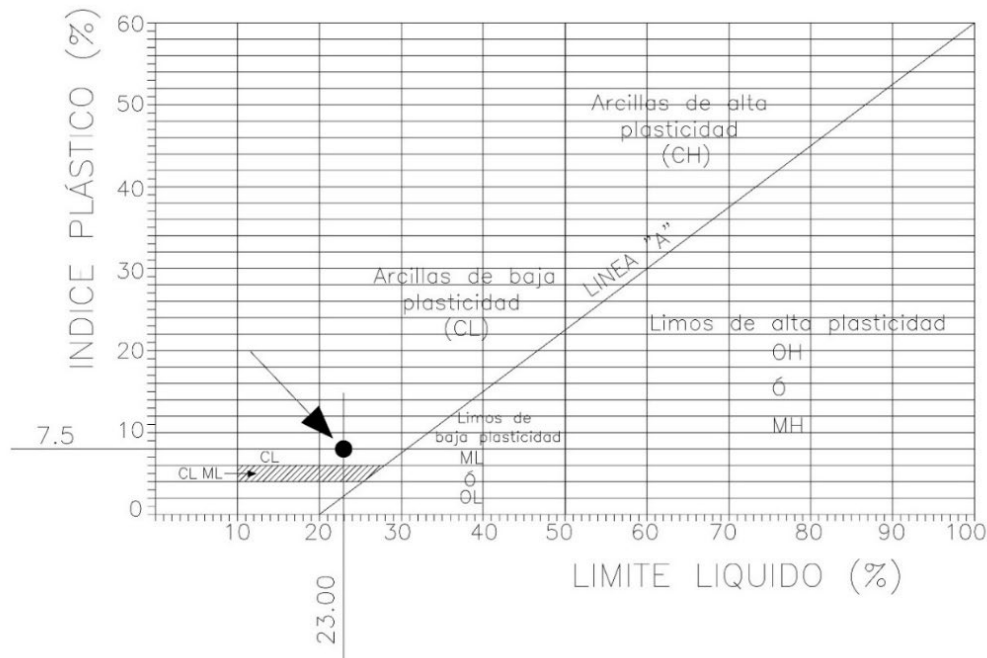


Figura 2. Clasificación del suelo de acuerdo con los límites de consistencia

2.3. Pruebas térmicas: Conductividad térmica, capacidad calorífica, densidad y calor específico de la matriz suelo y zacate.

En el laboratorio de Arquitectura Bioclimática del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca, se llevaron a cabo las pruebas para determinar las propiedades termofísicas del suelo. Para esto, se utilizó el equipo Meter de la marca TEMPOS, el cual cumple con las Normas ASTM D5334 e IEEE 442/D3. Este dispositivo es un medidor de conductividad y resistividad térmica, basado en el método del hilo caliente. El Meter consta de un medidor que registra y almacena las medidas, y un sensor que mide la propiedad térmica deseada. Los sensores son agujas de distintas longitudes, que contienen un hilo interno que se calienta y enfría, midiendo así el diferencial de calor. El medidor proporciona el valor de la propiedad térmica del suelo. Dependiendo del tipo de material y sensor utilizado, se puede ajustar el tiempo de calentamiento y medición de 1 a 10 minutos. Para determinar la conductividad térmica del suelo, se preparó una matriz de suelo con forma cilíndrica de 15 cm de diámetro por 15 cm de alto. Para colocar el sensor TR3, se marcó y perforó la punta del sensor a una longitud de 100 mm desde la superficie del cilindro. Los orificios se ubicaron en la parte central del cilindro para minimizar las pérdidas de calor y obtener lecturas más precisas. La muestra se colocó dentro de una célula térmicamente aislada durante la prueba. Se configuró el equipo Meter indicando parámetros como la fecha, hora, nombre de la muestra, sensor utilizado, temperatura de la prueba y duración de la misma. Después de configurar el equipo, se realizó la prueba observando varios pasos, como el equilibrio de temperatura en el sensor y la inyección de calor en la punta del mismo. Los datos de conductividad y resistividad térmica se mostraron en la pantalla del equipo una vez completada la medición, y se registraron para su análisis posterior.

Para determinar la capacidad calorífica en la matriz de suelo y zacate, también se utilizó el equipo TEMPOS, diseñado con los estándares ISO 2008 y cumple con ASTM 5334 y IEEE 442. El equipo cuenta con calefacción controlada que garantiza que el calor sea constante, por otra parte, la pantalla interactiva a color identifica automáticamente el sensor instalado e ilustra la calefacción. El sensor utilizado fue el SH-3 y el periodo de medición fue de dos minutos. Para determinar la densidad de la matriz suelo-zacate primero se preparó el espécimen de prueba, para esto se mezclaron 10 kg de suelo arcilloso con 1.4 kg de zacate seco, a esta mezcla se le adicionó agua hasta que la mezcla estuviese trabajable. Con esta mezcla se elaboró una placa de aproximadamente 7 centímetros de espesor y se dejó secar a la sombra durante una semana, de esta placa se extrajo una probeta de aproximadamente 10 centímetros por lado. La probeta se secó hasta masa constante y se perfilaron sus caras, se pesó y posteriormente, empleando el método de la parafina (norma M-MMP-1-08/03), adecuado al tipo de material en análisis, se determinó el volumen del espécimen de suelo y paja, con esta información se calculó la densidad de la probeta citada.

Para determinar el calor específico se utilizó el valor de la capacidad calorífica volumétrica obtenida previamente en el equipo Tempos- Meter, la ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\text{Calor específico} = \frac{\text{Capacidad calorífica volumétrica}}{\text{Masa}}$$

Tomando en cuenta los valores de las dos variables (capacidad calorífica volumétrica y masa) se llevó una conversión de las unidades, debido a que los resultados de la capacidad calorífica volumétrica se dan en $\text{J/m}^3 \text{K}$ y las unidades más comunes del calor específico son: $\text{J/kg}^\circ\text{C}$. Por lo tanto, para determinar el valor de la capacidad calorífica volumétrica se tomó el valor promedio de las mediciones obtenidas con el equipo Tempos.



2.4 Propiedades de amortiguamiento y retardo térmico

La efectividad del desempeño térmico de los componentes constructivos fue calculada a través de su factor de decremento utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = \Delta T_{In} / \Delta T_{Out} \quad (1)$$

Donde μ es el factor de decremento del componente, ΔT_{In} es la diferencia de temperaturas superficiales máximas y mínimas alcanzadas al interior del componente, ΔT_{Out} es la diferencia de temperaturas superficiales máximas y mínimas alcanzadas al exterior del componente. Para medir el retardo térmico se tomaron en cuenta las temperaturas superficiales máximas del exterior respecto a las máximas del interior. Para la evaluación térmica se construyeron componentes constructivos de 1 m x 1m de lado.

2.4.1 Instrumentación para la medición de amortiguamiento y retardo térmico

Para las mediciones de temperatura, se utilizaron 4 sensores superficiales tipo TMC6-HD (rango de 40°C a 100°C), conectados a un registrador de datos HOBO U12 de 12 bits. Este sistema incluye software HOBOware y un Kit de calibración estándar NIST, capaz de almacenar hasta 43,000 lecturas a una velocidad de muestreo de 1 s durante 18 horas.

2.5 Análisis energético del sistema de muro de bahareque

Para el análisis termo-energético del sistema de muro de bahareque, se empleó el software Ener-Hábitat, una herramienta de simulación numérica de acceso libre. Esta herramienta es crucial para comparar el rendimiento térmico de diferentes sistemas constructivos en techos y paredes de edificaciones, considerando las condiciones climáticas de las principales ciudades de México. Desarrollado por varias instituciones, incluyendo la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Ener-Hábitat permite ingresar las propiedades térmicas del material utilizado en el muro de bahareque, como la conductividad térmica, densidad y calor específico. Se compararon el factor de decremento térmico y el consumo de energía del sistema de muro de bahareque con sistemas convencionales como el muro de tabique y el muro de concreto.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Resultados de las estrategias de diseño bioclimático

La herramienta BAT (Bioclimatic Analysis Tool), desarrollada por Rincón y Fuentes en 2014, permitió realizar un análisis mensual y paramétrico para caracterizar el clima del sitio con precisión. Se utilizaron diferentes diagramas bioclimáticos para establecer estrategias de diseño adecuadas para el lugar. La figura 3 muestra los triángulos de confort para la localidad de Ixtaltepec, Oaxaca. Se identificó que la estrategia principal recomendada es la ventilación selectiva combinada con la inercia térmica durante los meses de enero, febrero, marzo, diciembre y noviembre. Para el resto de los meses, no se encontraron dentro de ninguna estrategia bioclimática recomendada.

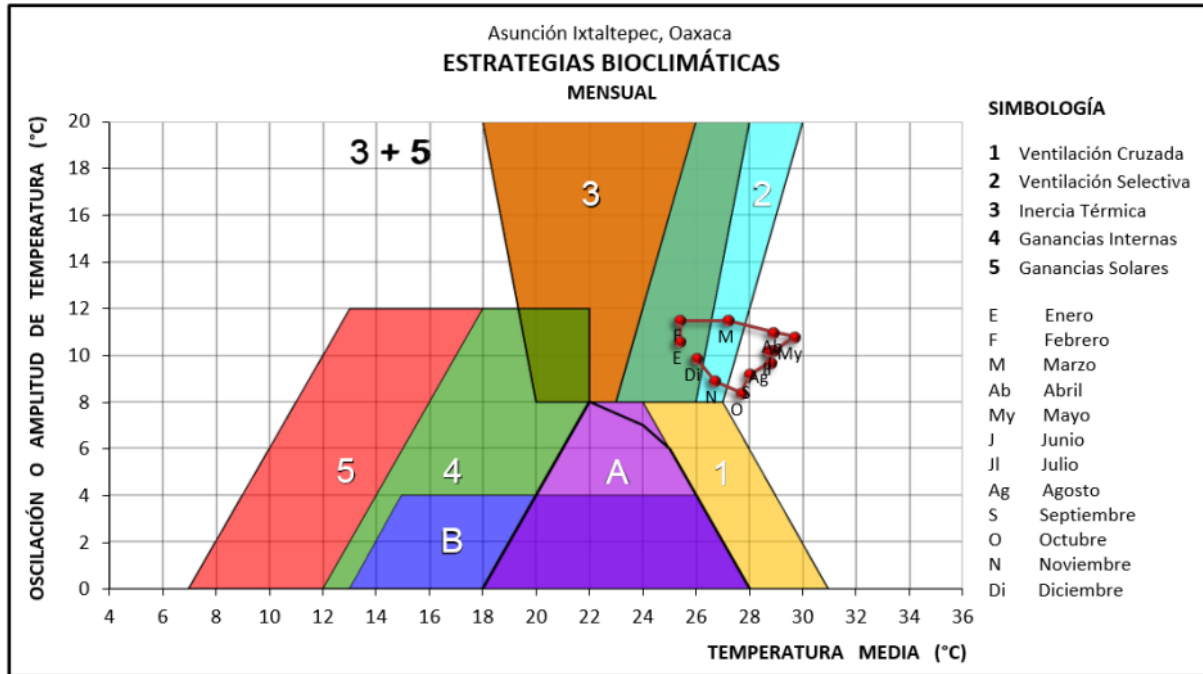


Figura 3. Estrategias bioclimáticas de Asunción Ixtaltepec, Oaxaca (Software BAT)

Las tablas de Mahoney, desarrolladas por Carl Mahoney (John, 1999; Koenigsberger, 1970), son un método para el diseño de viviendas en regiones tropicales. Se basan en datos climáticos locales para generar recomendaciones de diseño. Para la localidad de Asunción de Ixtaltepec, las tablas sugieren que los muros y pisos sean ligeros, con baja capacidad térmica. Las cubiertas deben ser ligeras, reflectantes y con cavidades. Además, se recomienda que los espacios exteriores nocturnos sean amplios y que se proporcionen drenajes pluviales adecuados. Como resultado final del análisis bioclimático, tanto los triángulos de confort térmico como las tablas de Mahoney indican que las estrategias principales de diseño bioclimático para la localidad de Asunción de Ixtaltepec, Oaxaca, son la inercia y la aislación térmica. En este contexto, se propone analizar el comportamiento térmico del muro de bahareque para comprender su eficacia en relación con estas estrategias de diseño.

3.2 Resultados de las propiedades termofísicas de la matriz de muro de bahareque

Resultados de la conductividad térmica

La tabla 1 muestra los valores de conductividad térmica realizada a la matriz suelo-paja. La conductividad térmica promedio obtenida fue de **0.0895 W/m.K**.

Tabla 1. Resultados de conductividad térmica de la matriz de suelo-paja.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
Título	SUELO + PAJA	SUELO + PAJA	SUELO + PAJA
Tiempo	23/02/2024 20:25:59 p. m.	23/02/2024 20:34:30 p. m.	23/02/2024 20:42:29 p. m.
Modo	Conductividad/resistividad	Conductividad/resistividad	Conductividad/resistividad
Sensor	TR-3	TR-3	TR-3
Modo de energía	Alto	Alto	Alto
Tiempo de lectura	Un minuto	Un minuto	Un minuto
K (W/m•K)	0.0874	0.0949	0.0864
Rho (°C•cm/W)	1144.630	1053.500	1117.427
K (W/m•K) promedio			0.0895

3.3 Resultados de la densidad de la matriz Suelo-zacate

Se determinó el volumen de la muestra de suelo – zacate con parafina, introduciendo la muestra en 500 ml de agua. El volumen desplazado por muestra fue de 380 cm³, este valor permitió calcular el volumen de la muestra sin parafina de la siguiente manera:

$$\text{Volumen muestra} = \text{Volumen muestra con parafina} - \text{volumen de parafina}$$

$$\text{Volumen muestra} = 380.00 \text{ cm}^3 - 28.46 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen muestra} = 350.66 \text{ cm}^3$$

Finalmente se pudo calcular la densidad de la matriz suelo-zacate con los datos del peso de la muestra (301.82 gr) entre el volumen de la muestra suelo-zacate (350.66 cm³) el valor obtenido fue de 0.86 gr/cm³.

3.4 Resultados de la determinación del calor específico

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la capacidad calorífica volumétrica donde el valor promedio fue 1.00 MJ/m³°K.

Tabla 2. Resultados de la prueba de capacidad calorífica con la cual se determinó el calor específico

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	Heat Capacity	Diffusivity/Heat Capacity	Diffusivity/Heat Capacity
Power Mode	High	High	High
C (Mj/m³.k)	0.988	0.9902	1.024
Cap.Cal.Vol.			
Sys. Error	0.0045	0.0099	0.0098



Con los valores de la capacidad calorífica volumétrica (**1.00 MJ/m³°K**), conductividad térmica (**0.0895**) y la densidad=**860 kg/m³**, se obtuvo la capacidad calorífica mediante la siguiente ecuación:

$$1\text{MJ}=1,000.000\text{J}$$

$$\frac{1.00 \text{ MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \frac{1,000,000\text{J}}{1\text{MJ}} \frac{1\text{m}^3}{860 \text{ kg}} \frac{1^\circ\text{K}}{1^\circ\text{C}} = 1162.79 \frac{\text{J}}{\text{kg}}^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, el calor específico obtenido en la matriz suelo-paja fue de **1162.79 J/k°C**.

3.5 Resultados de las propiedades de amortiguamiento y retraso térmico

Para llevar a cabo un análisis detallado del gradiente de temperaturas y el amortiguamiento térmico en el componente, se seleccionaron los cinco días más calurosos y estables, específicamente los primeros cinco días de marzo. La Figura 4 muestra que las temperaturas máximas promedio alcanzaron los 45°C. Al estudiar el desfase entre las temperaturas máximas superficiales externas e internas, se encontró que el retardo térmico promedio fue de 2 horas. Al relacionar la diferencia de las temperaturas máximas superficiales del interior respecto al exterior se encontró que el amortiguamiento termico fue de 0.573

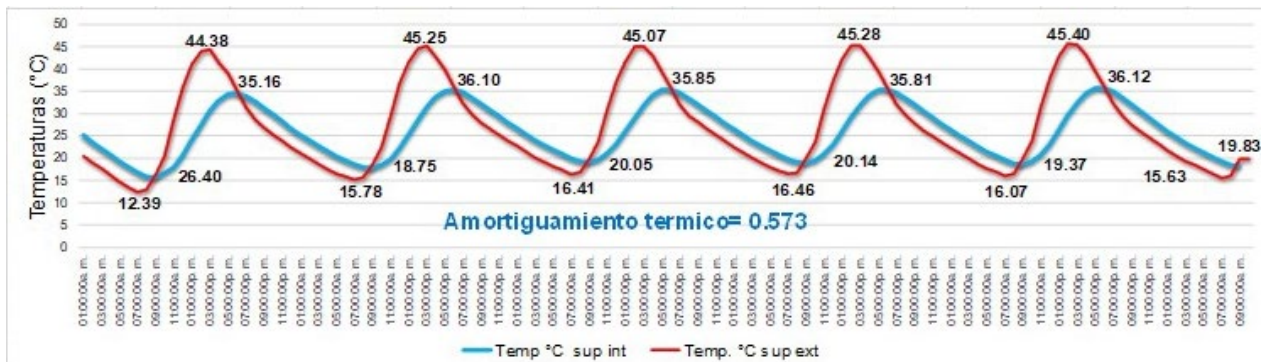


Figura 4. Diferencia de temperaturas y amortiguamiento en componente MBSZ.

Con la finalidad de poder comparar los valores obtenidos en el muro de bahareque con matriz suelo-pasto respecto a un sistema convencional se realizó un análisis del retardo y amortiguamiento térmico de un muro de concreto. La figura 5 muestra un análisis a detalle del retardo térmico del componente de muro de concreto. Al analizar el desfase de las temperaturas máximas superficiales del exterior respecto al interior se encontró que el retardo térmico promedio en el componente fue de 1 hora, mientras que el amortiguamiento térmico fue de 0.8275 (figura 5).

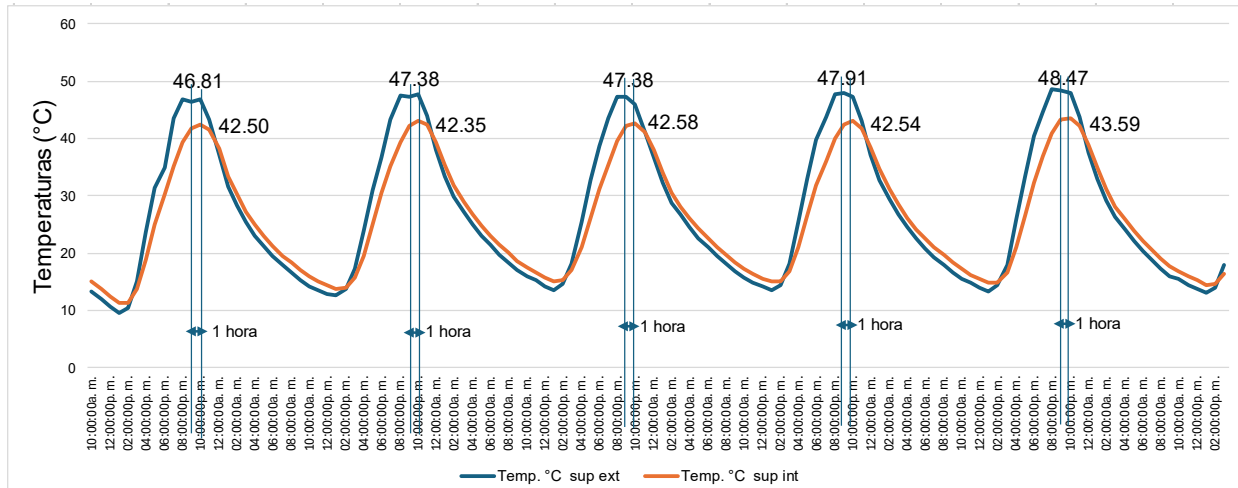


Figura 5. Diferencia de temperaturas y retardo térmico en componente MC.

A manera de conclusión el muro de bahareque presentó ventajas térmicas respecto al muro de concreto ya que obtuvo un retardo termico de dos horas, mientras que el muro de concreto fue de una hora. Por otra parte, el amortiguamiento del muro de bahareque termico fue menor (0.573) respecto al muro de concreto (0.8275) lo que indica que almacena la energía mayor tiempo respecto al muro de concreto.

3.6 Resultados del análisis energético del sistema de muro de bahareque

3.5.1 Evaluación térmica energética con Ener-Habitat

Para llevar a cabo la simulación térmica-energética del sistema muro de bahareque se utilizó el Software Ener Hábitat. Por lo tanto, se ingresaron los valores de las propiedades térmicas del material conductividad térmica, densidad y calor específico (obtenidos previamente en la matriz de suelo y zacate) que constituye el muro de bahareque. La figura 6 muestra que el factor de decremento anual del muro de bahareque fue menor (0.21) respecto a los demás sistemas, el muro de ladrillo fue de 0.42 y el sistema muro de concreto fue de 0.51, significa que el sistema de muro de bahareque fue el mejor debido a que almacena mayor tiempo la energía, esto que permitirá tener mayores horas de confort termico al interior de la habitación.

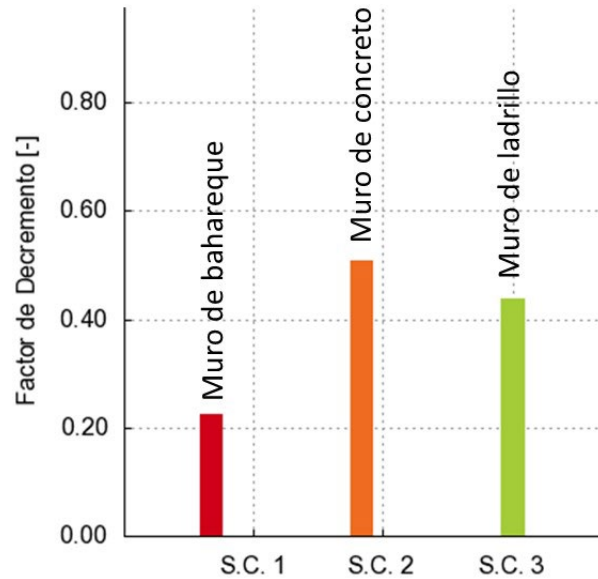


Figura 6. Factor de decremento anual de los sistemas constructivos: Muro de bahareque (S.C.1), muro de ladrillo (S.C.3) y muro de concreto (S.C.2).

En la figura 7, se analiza el consumo de energía de varios sistemas constructivos. El muro de bahareque destaca por necesitar menos energía para enfriarse, gracias a su baja conductividad térmica, atribuida a los materiales como arcilla y paja. En la figura 8, se confirma que este sistema también demanda menos energía para calentarse y alcanzar el confort térmico.

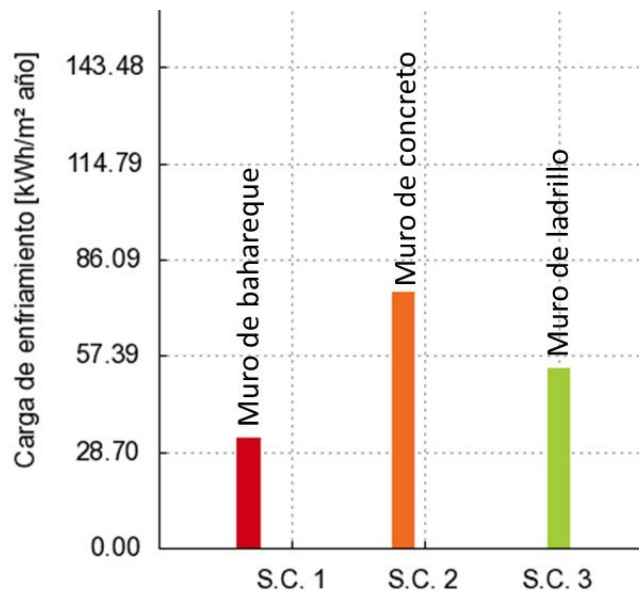


Figura 7. Carga de enfriamiento

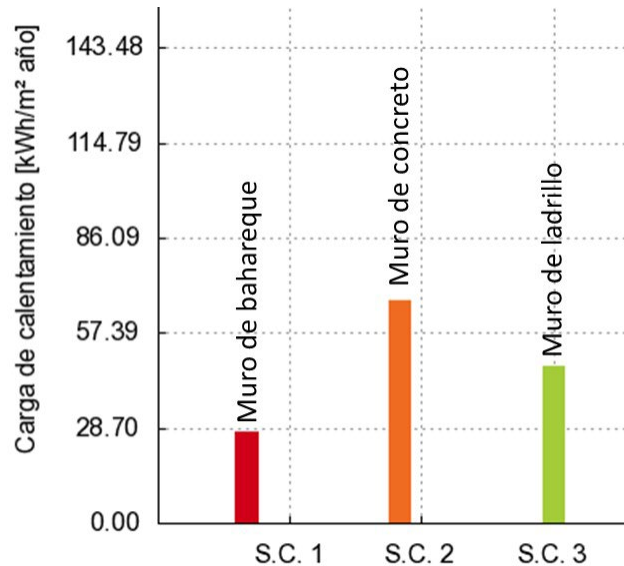


Figura 8. Carga de calentamiento

4. CONCLUSIONES

El análisis bioclimático de Asunción de Ixtaltepec, Oaxaca, reveló que las estrategias clave de diseño para adaptarse al clima local son la inercia térmica y la aislación. Esto se refleja en los triángulos de confort térmico y las tablas de Mahoney.

En la matriz suelo-paja, se logró una baja conductividad térmica, lo que favorece un óptimo comportamiento térmico en el muro de bahareque.

En resumen, el muro de bahareque demostró ser más eficiente térmicamente en comparación con el muro de concreto. Además, el muro de bahareque presentó un menor amortiguamiento térmico en comparación con el muro de concreto y su capacidad para almacenar energía durante períodos prolongados fue superior.

El muro de bahareque destacó por necesitar menos energía para enfriarse, también demandó menos energía para calentarse y alcanzar el confort térmico.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio recibió el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), el Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Unidad Oaxaca, en el proyecto de Investigación Caracterización mecánica de muros de bahareque como sistema alternativo en el pacífico sur de Oaxaca, Mexico clave sip 20242121.

6. REFERENCIAS

D'Auria, S. (2015) Participación y diseño bioclimático para la elaboración de proyectos arquitectónicos en contextos rurales [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional:
http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/147.

Dani, A., Sanchez-Medina F., Minier, S., Rodriguez, J. & Murillo, D., (2022). Enseñanza aprendizaje de la construcción con tierra para impulsar un futuro regenerativo. En A. Ferrero, Z. Salcedo y C. Neves (eds.), *Memorias del 200 Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*. Trinidad, Cuba, Trinidad: Oficina del Conservador y Proterra, 661-674.

F. Kheiri, A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design, *Renew. Sustain. Energy Rev. Elsevier Ltd*, 92 (2018) 897–920.

Fatiha YE, Nacer M, Abd-El-Hamid A, Sauvageot H. (2003). Temperature variations in a housing of the semi-arid region of Djelfa (Algeria). *Building and Environment*; 38:511–519.

J.M. Evans, 30 years of the Mahoney's Tables, in: S. Szokolay (Ed.), *Proceedings of PLEA'99*, University of Queensland, Brisbane, 1999.

Koenigberger, O. H., Mahoney, C. y Evans, J. M. (1970), *Climate and house design*, United Nations, New York (También en castellano, *Clima y el diseño de casas*).

León-Venegas, U. (2017). Proyecto participativo de Vivienda Vernácula Sustentable en la comunidad de Santo Domingo Teojomulco, Sola de Vega, Oaxaca [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Institucional:

http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/141

Olgay V. *Design with climate: a bioclimatic approach to architectural regionalism*. New York: Van Nostrand Reinhold: 1992.

Rincón, J. M., y Fuentes, V. F. (2014). Bioclimatic Analysis Tool (BAT): Herramienta automatizada para facilitar los estudios preliminares de un proyecto Bioclimático. Congreso XXXVIII Semana Nacional ANES - XI Congreso Iberoamericano, Querétaro, México.

Tsilingiris PT. The influence of heat capacity and its spatial distribution on the transient wall thermal behavior under the effect of harmonically time-varying driving forces. *Build Environ* 2006; 41: 590–601.

Ventura, F. (2022). Proyectos de diseño sustentable para mejorar la vivienda de remesas y la conservación de la vivienda tradicional de la Mixteca de Oaxaca [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Institucional: http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/642.



Prueba química de la argamasa de cimentación de un monumento histórico del siglo XVIII, respecto a la argamasa de restauración del INAH Oaxaca.

A. M. Hernández-López¹, H. Gómez-Barranco^{2*}, A. Parra-Parra³.

*Autor de Contacto: arq.heidy.gb@gmail.com

¹ Facultad de Arquitectura "5 de Mayo" Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO). Oaxaca México.

² Facultad de Arquitectura "5 de Mayo", Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO), Cuerpo Académico "Tecnología y Sustentabilidad", Oaxaca México.

³ Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Morelos, México.

RESUMEN

Dentro de la conservación del patrimonio edificado, en cada trabajo de intervención arquitectónica se debe conocer los elementos a restaurar, realizando pruebas arqueométricas necesarias antes de intervenir un monumento histórico sin poner en peligro su integridad al privilegiar otros aspectos. En la rama de la construcción dentro de la arquitectura y la restauración, uno de los elementos utilizados es la argamasa, la cual es una mezcla de materiales como arena, cal y agua, utilizada como mortero para unir o fijar elementos constructivos entre sí. Desde finales de los años 90's, los arquitectos y restauradores en conjunto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia del Estado de Oaxaca (INAH), han utilizado una argamasa para intervenir los monumentos históricos, desconociendo si es la adecuada. Por tal, en la presente investigación se realizó un estudio comparativo entre la argamasa de cimentación de un monumento histórico del siglo XVIII (capilla Asunción de María en el municipio Ixtaltepec, Oaxaca) y la argamasa contemporánea propuesta y utilizada por el INAH Oaxaca. Esto mediante la caracterización química (a través de difracción de rayos X) de los materiales, lo cual permitió de terminar la composición de los mismos, y así, conocer sus similitudes y diferencias.

Palabras clave: Conservación; argamasa; pruebas químicas

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la conservación del patrimonio se conjunta en varias acciones para su cuidado, una de estas es la restauración, para ello se toma en cuenta: el inmueble a restaurar, las condiciones en las que se encuentra, lo que necesita, así como el material a utilizar. Un elemento importante al momento de restaurar un inmueble histórico es la argamasa, la cual, consiste en una mezcla de arena, cal y agua, utilizados como mortero para unir o fijar elementos constructivos. De acuerdo al año o siglo de construcción se pueden encontrar diferentes materiales utilizados, características y propiedades, las que hacen diferir los monumentos históricos.

Como menciona Díaz (2021) cada trabajo de intervención arquitectónica busca la conservación del monumento, por lo cual es importante analizar el material original que se pretende intervenir. El objetivo primordial en cada trabajo de intervención es la conservación del inmueble histórico en su más amplia definición, sin poner en peligro su integridad al privilegiar otros aspectos. Para lograrlo se requiere el empleo de materiales, elementos y técnicas que sean compatibles con los existentes. (Díaz, 2021) y lograr el objetivo al integrarse con los elementos originales.

Los restauradores, arquitectos e ingenieros en conjunto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia del estado de Oaxaca (INAH), han compartido una mezcla de mortero que han utilizado desde finales de los años 90's, para restaurar todo tipo de monumentos históricos en el estado de Oaxaca. Para todo el personal enfocado en la restauración, ha sido muy útil la información compartida por años, pero se desconoce si la mezcla o argamasa utilizada, es la adecuada y se cohesiona con los elementos constructivos originales del inmueble, ya que se desconoce si difiere de materiales o proporciones y esto puede alterar la conservación del monumento, o en caso contrario mejorar la conservación con materiales con mayor tecnología.

Esta investigación se ha realizado previamente en diferentes partes del mundo, ya sea con la cal y sus propiedades o mezclas con diferentes materiales, buscando el conocimiento de los materiales empleados en la conservación. En el caso del estado de Oaxaca, se busca conocer los materiales y proporciones utilizados en las intervenciones de conservación, como parte de las pruebas arqueométricas¹ necesarias al realizar obras de restauración y conocer si realmente se conserva el patrimonio arquitectónico o resulta lo opuesto al no tener la certeza de los materiales utilizados.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

El patrimonio histórico de la ciudad de Oaxaca, es vasto y cuenta con muchos monumentos históricos de diferente datación, estos han sido intervenidos con la misma argamasa, desconociendo con certeza si las características de la misma son las correctas para la conservación del patrimonio o resultando lo opuesto a lo esperado.

El análisis del material original se realiza con pruebas de laboratorio, para conocer el tipo de material que se trabaja, sus características, propiedades y necesidades, buscando no dañar el edificio histórico y lograr una restauración óptima. Este estudio no puede ser realizado por los constructores, restauradores y arquitectos al momento de intervenir un monumento histórico en el estado de Oaxaca, esto por diversos factores, entre ellos: desconocimiento del tema.

Las obras de intervención a los monumentos históricos deben realizarse con responsabilidad y

¹ Disciplina científica que emplea métodos físicos o químicos para los estudios arqueológicos.



conocimiento, tomando en cuenta todos los detalles importantes, iniciando con la investigación, pruebas de laboratorio requeridas y el personal mencionado. La caracterización de materiales es un paso importante, de lo contrario se trabaja desconociendo el material a restaurar y el ideal para su conservación.

El INAH ha autorizado construcciones de intervención de salvamento, rescate o restauración, utilizando una proporción de argamasa empírica contemporánea, traspasando la información y utilizando esta proporción como mortero en sus catálogos de conceptos. No se conoce algún documento, reglamento o estudios previos estipulados por parte de los constructores y demás personal encargado de las intervenciones a los edificios históricos, en los cuales, se realicen las caracterizaciones de materiales requeridas. Para ello, se requiere de este estudio, realizando en este caso el análisis comparativo de muestras de mortero de material original² del monumento histórico (llamada para fines de esta investigación “argamasa histórica”) y muestras contemporáneas³ o “mortero contemporáneo” aprobadas por el Instituto Nacional de Antropología e Historia para la restauración de dicho monumento.

El objetivo de esta investigación, es realizar una prueba química de la argamasa original de cimentación de un monumento histórico del siglo XVIII, respecto a la argamasa contemporánea propuesta por el INAH, en la restauración en el estado de Oaxaca. Estableciendo como hipótesis que: “La caracterización química de los materiales históricos, permitirá comparar dichas características y conocer sus elementos”.

Cada monumento histórico, requiere de características y proporciones diferentes en la argamasa, aún más para diferentes procesos constructivos, de acuerdo a sus necesidades particulares, por tanto, las pruebas arqueométricas, tiene el potencial de determinar los necesarios ideales para utilizar en cada caso.

3. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

3.1. Antecedentes.

La “argamasa contemporánea” se encuentra presente en los catálogos de conceptos aprobados por el INAH Oaxaca, y ha sido utilizada en las intervenciones de restauración en los monumentos históricos, ignorando el proceso constructivo, sea muro, aplanado o cimentación e incluso ignorando la datación del monumento. Mediante entrevistas realizadas a arquitectos y restauradores del INAH Oaxaca, compartieron que desconocen si realmente la argamasa contemporánea es la ideal para la restauración de monumentos históricos. El M. Arq. Raúl Alejandro Mena Gallegos, perito de la sección de Monumentos Históricos y arquitecto de apoyo de la sección de arqueología en el INAH Oaxaca, comenta que la restauración en el estado se realiza de forma empírica, pasando los conocimientos a propia voz sin estudios de laboratorio previos a las intervenciones, desconociendo la materialidad de los monumentos históricos y de los materiales modernos o contemporáneos con los que se restaura. (Gallegos, 2023).

En los años 90’s, a partir de los sismos presentados en el país, el Instituto Nacional de Antropología e Historia a través de folletos ilustrativos elaborados a mano alzada, hizo llegar a los constructores y trabajadores de primera línea, mostrando el proceso, materiales y cantidades para crear un mortero ideal para su empleo en monumentos históricos. A partir de entonces esta mezcla ha

² Material utilizado en la creación o inicio de la construcción del monumento histórico.

³ Mortero creado y aprobado para la restauración por el INAH.



sufrido cambios poco significativos, no se han realizado estudios químicos de sus elementos. Demostrando la mala praxis en el proceso de restauración, en donde primeramente se debe conocer los materiales originales, así como los materiales contemporáneos que se planean utilizar.

En un estudio elaborado por França, Joyce Gomes (2019) para la Universidad de Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), en donde se caracterizaron los morteros de revestimiento del Casarão de Banguê, ubicado en la comunidad de Lagoa do Piató para la conservación del patrimonio y conocimiento, utilizando una combinación de análisis visual, caracterización y dosificación en los morteros de las muestras que tenían cal, en el análisis de rayos X de dos muestras, no se identificaron compuestos de cemento, lo que prueba la no utilización de cemento en ese momento. Por tanto, con base a la información existente sobre los morteros recogidos desde la mansión fue posible reconstituir la huella proyectando un mortero de restauración compatible para el edificio (FRANÇA, 2019).

Un estudio más realizado en Lituania a cargo de un grupo de investigadores en el año de 2019, fue sobre los materiales de construcción de la mampostería histórica del muro de contención de la colina del castillo de Gediminas que data de finales del siglo XIII y principios del siglo XIV. El estudio consistía en el análisis de la microestructura y composición química de los ladrillos cerámicos y mortero de cal. El mortero estaba compuesto por cal hidráulica, arena de cuarzo y agregados de ladrillos desmenuzados. (Jonaitis, Antonovič, Šneideris, Boris, & Zavalis, 2019). Estos estudios son solo algunos de los realizados alrededor del mundo, que muestran el camino para conocer los materiales históricos, conocer antes de implementar nuevos.

3.2. Lugar de estudio.

El lugar seleccionado para el estudio de argamasa histórica es la Parroquia de arquitectura religiosa del siglo XVIII, ubicada en el municipio Asunción Ixtaltepec, en el estado de Oaxaca (Figura 1). Se encuentra en la calle Avenida Independencia Esquina Yermo y Parres (Figura 2). Según los registros en la tabla de catalogación, se han realizado 2 intervenciones en esta parroquia histórica, uno fue realizado en el siglo XIX y otro más en el siglo XX, pero se desconocen las obras realizadas no se cuenta con los expedientes de intervenciones arquitectónicas respectivas.

3.3. Obtención de muestras históricas del siglo XVIII

En el año de 2020, en el estado de Oaxaca, se solicitó al INAH realizar restauraciones de salvamento para diferentes monumentos históricos debido a los sismos ocurridos en el año 2017, en donde resultaron afectados. Se implementó un programa por parte del gobierno federal, el cual otorgó recursos económicos para realizar intervenciones de restauración a cargo del equipo de la sección de arqueología y peritos de la sección de monumentos históricos. Se obtuvieron muestras de argamasa del material original⁴ (argamasa histórica), a través de pozos de sondeo, se realizaron mecánicamente, con herramienta manual, por parte de arqueólogos calificados del INAH Oaxaca. Uno de estos monumentos intervenidos es la parroquia Asunción de María, en donde se obtuvieron 10 cajas de muestras en diversos tamaños, formas y en dos presentaciones, sólidas y en polvo. Las cuales fueron resguardadas por los arqueólogos en el conocido exconvento de Cuilapam de Guerrero. Se conservaron en una bodega con características de ser un espacio fresco, seco y de poca iluminación. Estas muestras se mantienen en cajas de madera y cartón envueltas en bolsas de plástico transparente etiquetadas debidamente por los arqueólogos (Figura 3). Estas muestras

⁴ Mortero de cal elaborado durante el proceso de construcción del monumento histórico referido.



fueron obtenidas con dimensiones de 0.2 m x 0.2 x 0.2 m de longitud (Figura 4), muestras de 0.05 m x 0.05 m x .03 m de longitud, muestras pequeñas de 0.01 m x 0.01 m x 0.01 m aproximadamente, al igual que muestras de argamasa en presentación de polvo. Definiendo así esta parroquia como lugar de estudio, dado el número considerable de material original, ideal para la realización de este estudio químico y para futuras caracterizaciones físicas y mecánicas.



Figura 3. Caja 1/6 del total de almacenamiento de material original. Por el autor.

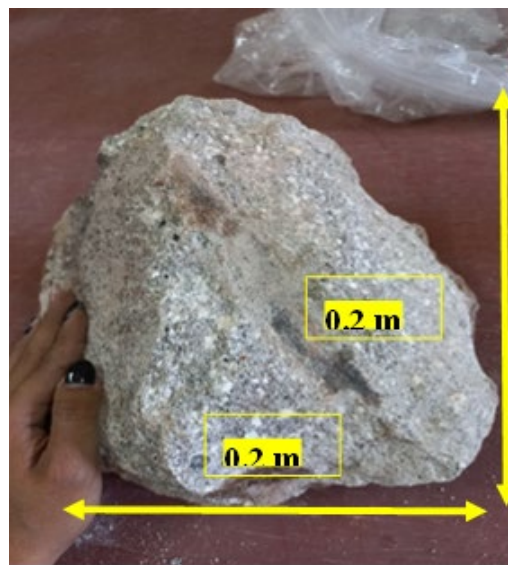


Figura 4. Muestra de argamasa de dimensiones 0.2 x 0.2 m de la Parroquia Asunción de María. Por el autor.

3.4. Especímenes contemporáneos.

La argamasa contemporánea o mortero contemporáneo, se obtuvo utilizando la proporción como mortero de los catálogos de conceptos que autoriza el INAH Oaxaca. No se conoce de un documento, reglamento o un estudio previo estipulado por parte de los constructores y demás personal encargado de las intervenciones a los edificios históricos.

Esta argamasa o mortero contemporáneo mencionado, utilizado en catálogos de obra oficial del INAH Oaxaca es:

Mortero de cal – arena proporción 1:3 + 10% de cemento gris (Portland) por volumen de cal.

Parte de los especímenes utilizados son proporcionados por empresas constructoras contratadas por el INAH, quienes tienen el conocimiento de la correcta preparación de este mortero contemporáneo. Adquiriendo de esta forma especímenes elaborados en la región con arena de un sitio cercano a la capilla en cuestión, en donde se encontraba trabajando la empresa constructora que proporcionó el mortero, y de igual forma, la arena mencionada ya cernida, ideal para la realización de la difracción de rayos X.

Fue importante contar con los aglutinantes⁵ utilizados en este mortero, el cemento gris (Portland) y cal apagada (Calhidra). Estos materiales igualmente fueron proporcionados por la empresa constructora, con el fin de conocer sus elementos y compararlos con los morteros en cuestión.

⁵ Elementos que sirven para unir o pegar ladrillos o mamposterías en las construcciones, mediante reacciones químicas en presencia de agua y aire. Los de más uso son la cal y el cemento.

4. ANÁLISIS QUÍMICO

4.1. Molienda mecánica, preparación de especímenes

La molienda mecánica es un proceso que se realiza en molinos de bolas de alta energía donde el polvo que se deposita en su interior se suelta, rompe y se vuelve a soldar. Con el objetivo de reducir el tamaño de la partícula, cambiar su forma o crear procesos de mezcla y soldadura; obteniendo una microestructura fina y controlada de polvos metálicos, compuestos y cerámicos (Vaquero, 2011).

Se prepararon especímenes en presentación polvo, de la argamasa histórica y el mortero contemporáneo, también se analizaron muestras de arena, cal y cemento portland (que como se mencionó previamente la empresa constructora lo proporcionó) con la finalidad de comparar los componentes presentes en cada una de ellas y de esta forma identificar la existencia de ellos en ambas argamasas.

Parte del material tenían una textura en granos pequeños, pero para la realización de este experimento era necesario la textura polvosa; por lo tanto, fue necesario someterlo a un tratamiento de molienda mecánica, por medio de un molino de bolas planetario marca Retchs modelo PM400/2 (Figura 5). Sellando los recipientes con absoluta seguridad dentro del molino; la molienda se realizó a una velocidad de 200 revoluciones por minuto, durante 3 minutos. En este paso se pulverizan ambos morteros, así como la arena, logrando una consistencia de polvo muy fino en $125 \mu\text{m}^6$ (Figura 6), capaz de ingresar a la difracción de rayos X.



Figura 5. Molino de bolas planetario. Por el autor.



Figura 6. Preparación de material contemporáneo, antes del pulverizado. Por el autor.

⁶ Una micra o micrómetro es otro submúltiplo de la unidad de medida, metro, y corresponde a una millonésima parte de dicha unidad.

4.2. Difracción de rayos X.

El análisis de difracción de rayos x, es una prueba química que permite conocer la estructura interna de la materia de forma detallada y así determinar la fase cristalina en el estado sólido de diferentes muestras; nuevos materiales, minerales, fármacos, etc. Los sólidos cristalinos, como los minerales, tienen sus átomos ordenados en estructuras periódicas, con múltiples planos que se hallan espaciados de una forma característica para cada fase mineral. Cuando la muestra en polvo se expone a un haz de rayos X monocromático, cada fase mineral difracta los rayos X con ángulos e intensidades de reflexión diferentes, en función del espaciado de los planos de su estructura atómica, y son estos ángulos e intensidades características de cada fase mineral las que permiten su identificación. (Corbeil, 2004; Rice, 1987:382-5)

Una vez pulverizado el material y previamente almacenado y clasificado, se colocan los polvos de las 5 muestras (ambos morteros, arena, cal y cemento portland) (Figura 8) en moldes de plástico con espacios cilíndricos pequeños, para llevar a cabo el análisis mediante difracción de rayos X. (Figura 9).

El análisis de las muestras, se realizó utilizando un difractómetro con radiación $\text{CuK}\alpha$ (difractómetro Siemens D-500, marca Bruker) (Figura 9.).

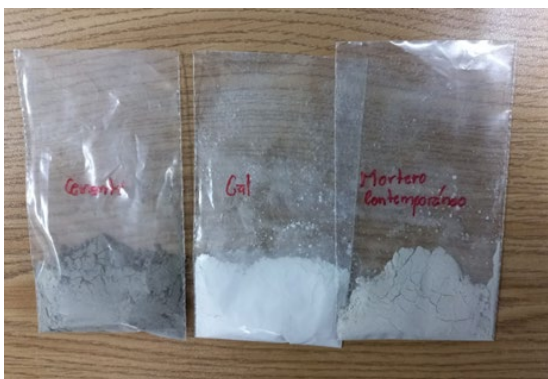


Figura 7. Material clasificado para la difracción de rayos X. Por el autor.



Figura 8. recipientes especiales de almacenamiento para el análisis DRX. Por el autor.

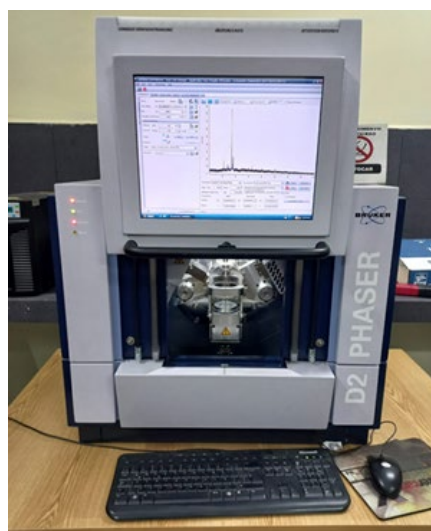


Figura 9. Difractómetro. Por el autor.

5. RESULTADOS PRUEBA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los resultados obtenidos, mediante la DRX de los componentes iniciales (cal, arena y cemento en el caso del mortero contemporáneo) que conforman tanto la argamasa histórica y el mortero contemporáneo, (Figura10.) revelaron lo siguiente: El patrón de difracción correspondiente a la arena, consiste principalmente de plagioclasa en forma de feldespatos ($XAlSiO_8$), y silice (SiO_2) en forma de cuarzo y cristobalita.

Observando que, la cal se compone principalmente de portlandita ($Ca(OH)_2$) y calcita ($CaCO_3$) propios a la cal utilizada (cal apagada)-

El patrón de difracción del cemento sin hidratación contiene fases como alita (Ca_3SiO_5), belita (Ca_2SiO_4) y celita (SiO_2) (perteneciendo al grupo de los silicatos con el cuarzo y cristobalita), existentes en los clinkers de los cementos Portland, así como también portlandita y calcita.

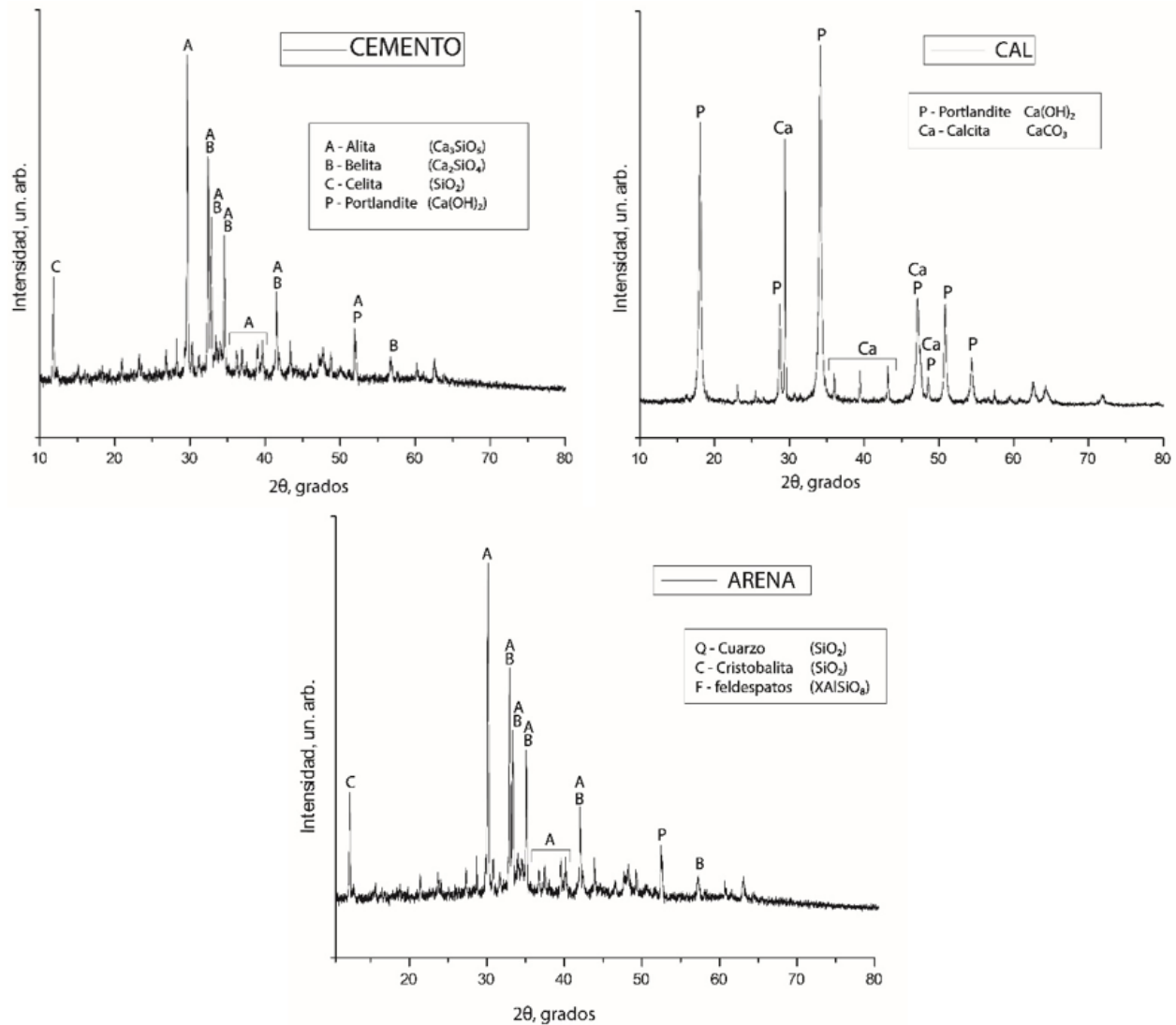


Figura 10. Patrón de difracción de rayos X de los componentes iniciales. Por el autor.

Los datos de difracción de rayos x de la argamasa histórica, se muestran en la Figura 11a., donde se puede observar que presenta fases cristalinas principalmente de calcita y cuarzo, lo cual puede atribuirse a la presencia de arena y cal en la mezcla original. Por otra parte, el mortero contemporáneo (Figura 11b), presenta fases cristalinas correspondientes a portlandita, calcita, y feldespatos, mismas que se encuentran presentes en el cemento, cal y arena (Figura 10), lo cual comprueba la presencia de estos materiales dentro de la mezcla del mismo. Por tanto, el análisis de DRX demuestra que la composición de ambas argamasas difiere en gran medida, y la mezcla propuesta no se acerca a mezcla original.

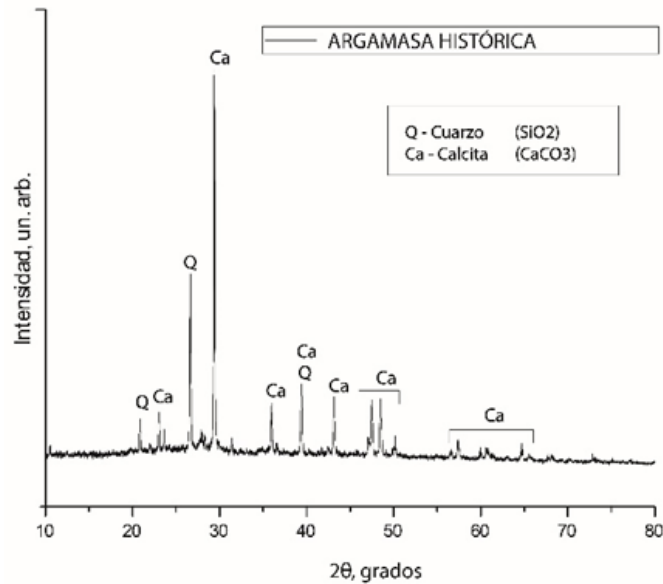


Figura 11a. Patrón de difracción de rayos X de la argamasa histórica. Por el autor.

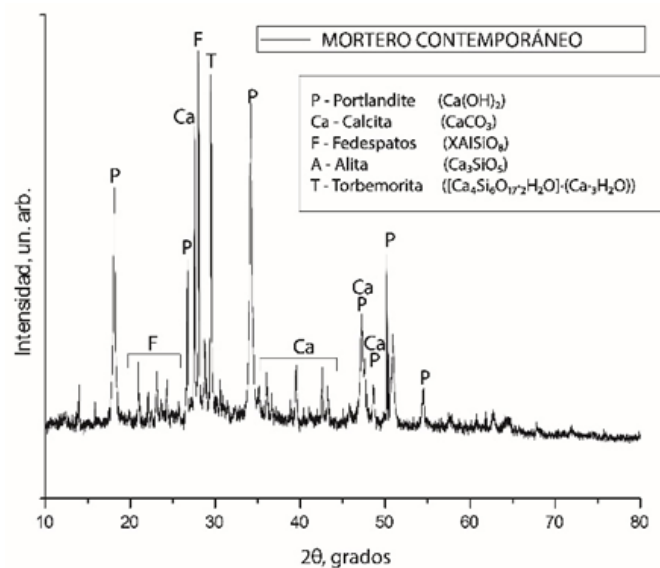


Figura 21b. Patrón de difracción de rayos X del mortero contemporáneo. Por el autor.

6. CONCLUSIONES

El análisis de difracción de rayos X (DRX), es una prueba necesaria y fundamental que debe realizarse a todo momento histórico, previo a su intervención arquitectónica, con el fin de conocer la naturaleza del inmueble, buscando recrear materiales similares o con ayuda de la tecnología para mejorarlos, Es necesario que todos los que participan en la conservación del patrimonio conozcan las características de los materiales que se emplean.

En el caso de la argamasa de la Parroquia Asunción de María, se nota el uso en gran cantidad de la cal en su forma natural (Cal viva) obtenida de la piedra caliza, lo que podría indicar una dureza mayor en su composición, a diferencia del mortero contemporáneo; el cual, al tener una cal ya trabajada (cal apagada) cambia su estructura presentando elementos como portlandita, la cual es características de aglutinantes modernos como el cemento, además del porcentaje de cemento portland añadido que es considerable, alterando su contextura.

El trabajo realizado abre camino a un estudio más profundo, con el que se espera realizar pruebas físicas y mecánicas para el mejor conocimiento de los materiales utilizados, y de esta forma, poder sugerir el mejor material para intervenir en el patrimonio histórico, buscando mejorar las características de los materiales contemporáneos.

La implementación de pruebas arqueométricas, permite conocer los componentes base de los materiales a emplear en la restauración arquitectónica. Lo cual posibilita estimar las proporciones necesarias que se requieren para cada monumento histórico a intervenir, logrando de esta forma su conservación patrimonial.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo del CONAHCYT para la realización de esta investigación, al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIICAp-UAEM) por la oportunidad de la realización de la prueba química (Difracción de rayos X) en sus instalaciones, así como al M. Arq. Raúl Alejandro Mena Gallegos y a la sección de arqueología del INAH Oaxaca por el acceso a la información y muestras de argamasa histórica.

8. REFERENCIAS

- Bronius Jonaitis, B., Antonovič, V., Šneideris, A., Boris, R., & Zavalis, R. (2018). *Analysis of Physical and Mechanical Properties of the Mortar in the Historic Retaining Wall of the Gediminas Castle Hill (Vilnius, Lithuania)*. Lituania.
- Corbeil, M.C. (2004): *Application of X-ray Diffraction in Conservation Science and Archaeometry*, International Center for Diffraction Data (ICDD), Advances in X-ray Analysis 47, Newton (Pennsylvania).
- Heras, M. G. (Diciembre de 2020). *La disciplina arqueométrica y la investigación de las sociedades del pasado a través de la cerámica*. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 21.
- Jabli, I., Tahar, A., Yousra, H., Wissem, G., Houda, K., Mohamed, E. G., . . . Johann, P. (Agosto de 2020). *Blending of mining wastes from the Hammam Zriba mine (Northeast Tunisia) with the primary ingredients of clinkers: an evaluation of effects on gray Portland clinker properties*. Arabian Journal of Geosciences. doi:10.1007/s12517-020-05790-0



Jonaitis, B., Antonovič, V., Šneideris, A., Boris, R., & Zavalis, R. (2019). *Analysis of Physical and Mechanical Properties of the Mortar in the Historic Retaining Wall of the Gediminas Castle Hill* (Vilnius, Lithuania).

Ruiz, R. V. (julio de 2015). *Caracterización de pastas de cal Oxical de Tecali con diferentes tiempos de añejamiento*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/333984253>

Tobón, J. I., & Giraldo M., M. A. (enero de 2006). *Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación*. DYNA, 73(148), 69-81. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/26460780>

Valdiviezo, A. C. (diciembre-enero de 2011). *Agglomerantes, morteros y aplanados adecuados para proteger el medioambiente*. Revista de Arquitectura, 13, 1-128.

Cordeiro, R. C. (2002). *Reproducción experimental de morteros de cal grasa: el opus caementicium romano*.

INAH. (s.f.). *Instituto Nacional de Antropología e Historia*. Oaxaca.

kopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2018). *Analysis of pozzolanic mortars for restoration*.

Mendoza, E. M. (2015). *Conveniencia del uso de ladrillos y argamasa en los procesos de restauración de edificaciones de tipología colonial en cartagena de indias*. Cartagena, Colombia.

Meza, A. C. (2022). Estudio teórico del efecto de la incorporación de óxido de grafeno sobre el cemento. *Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Química*. Bucaramanga, Colombia.

Pingarrón, L. B. (2013). *La Cal historia, propiedades y usos*.

RICE, P.M. (1987): *Pottery Analysis: A Sourcebook*, Chicago University Press, Chicago. (Hay una segunda edición de este libro publicada en el año 2014. No obstante, las referencias en el texto se refieren siempre a la primera edición de 1987).

Díaz, M. A. (2021). *Efecto de la adición de piedra cantera triturada en la resistencia de morteros de cal para restauración arquitectónica*. Oaxaca.

França, J. G. (2019). *caracterização da argamassa de revestimento existente no casarão do banguê localizado na comunidade da lagoa do piatô na cidade de assú/rn: Estudo de caso*. Brasil.

Gallegos, M. A. (2014). *Protocolo de Investigación Arquitectura religiosa dominica del Istmo Sur de Tehuantepec, Oaxaca. Siglos XVI y XVII*. México D.F.

Gallegos, R. A. (07 de Enero de 2023). Maestro Arquitecto perito. (A. A. López, Entrevistador) Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

Gobernación, S. d. (20 de mayo de 2024). Diario oficial de la Federación. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=684644&fecha=27/01/2004#gsc.tab=0

INIFED. (2022). *Normatividad Técnica*. Obtenido de <https://www.gob.mx/inifed/acciones-y-programas/normatividad-tecnica>

REFERENCIAS WEB:

Google imágenes. (s.f.). Obtenido de https://www.google.com/imghp?hl=es&gl=es&gws_rd=ssl

Históricos, C. N. (17 de Enero de 2024). INAH. Obtenido de

https://catalogonacionalmhi.inah.gob.mx/consulta_publica/detalle/44313

México, G. d. (2016). Obtenido de <https://www.gob.mx/segob/documentos/fideicomiso-fondo-de-desastres-naturales-fonden>





Comparativa de propiedades térmicas de pasta de cal y morteros de cal con incorporación de PET y carbonato de calcio para mejorar el aislamiento en edificaciones.

E. G. Navarro Mendoza 1*, E. M. Alonso Guzmán 2, J. A. Ojeda Sánchez 3, H. Becerra Santacruz 1 y J. A. Bedolla Arroyo 1

*Autor de Contacto: elena.navarro@umich.mx

¹ Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

³ Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima.

RESUMEN

En el presente trabajo, se evaluaron las propiedades térmicas de la pasta de cal y morteros de cal de construcción con la incorporación de materiales como polietileno tereftalato (PET) y carbonato de calcio (CaCO_3). El objetivo principal es comprender cómo estas modificaciones afectan la conductividad térmica de los morteros, elaborados en el laboratorio FIC-UMICH, y su potencial para mejorar el aislamiento térmico en edificaciones. Se llevaron a cabo pruebas de conductividad térmica utilizando el equipo KD2 Pro en el laboratorio de la Universidad de Colima. Los resultados revelaron que los morteros de cal de construcción con PET presentaron baja conductividad térmica. Además, la adición de carbonato de calcio mostró una disminución adicional en la conductividad térmica, indicando mejoras en las propiedades de aislamiento térmico. Sin embargo, se enfatiza la importancia de encontrar un equilibrio entre las propiedades térmicas y mecánicas de los morteros, considerando la resistencia estructural. El uso de PET y el carbonato de calcio permiten mejorar el desempeño térmico de los morteros de cal, contribuyendo a la eficiencia energética en la construcción, aunque se deben seguir explorando aspectos adicionales para su aplicación segura y efectiva.

Palabras clave: Morteros de cal, PET; carbonato de calcio (CaCO_3); conductividad térmica; materiales sostenibles para la construcción.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la construcción, la búsqueda constante de soluciones que mejoren la eficiencia energética y el confort térmico en edificaciones se ha convertido en una prioridad. La necesidad de reducir el consumo de energía y minimizar el impacto ambiental ha llevado a la exploración de nuevos materiales y técnicas constructivas que contribuyan a estos objetivos. Entre los elementos clave para lograr un rendimiento térmico óptimo se encuentra la conductividad térmica de los morteros utilizados en la construcción.

Los morteros cumplen un papel fundamental en la unión y recubrimiento de elementos estructurales en edificaciones. Además de su importancia en la resistencia al fuego, estos morteros pueden contribuir significativamente al aislamiento térmico y acústico de las estructuras. También desempeñan un papel relevante en la protección del medio ambiente y en la resistencia al desgaste por impactos (Monjo Carrió, 2005).

La selección de los componentes de los morteros, como aglutinantes y agregados, puede influir significativamente en sus propiedades térmicas y, por lo tanto, en su capacidad de contribuir al aislamiento térmico de los edificios. La conductividad térmica, que representa la capacidad de un material para transmitir el calor, es un parámetro crítico para evaluar la eficacia de los morteros en términos de aislamiento térmico.

En el contexto actual de desarrollo sostenible y eficiencia energética, numerosas investigaciones han surgido en busca de alternativas para mejorar las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la construcción. Algunos de los materiales alternativos son materiales naturales como las fibras de palma en donde investigan las propiedades térmicas de morteros reforzados con estas fibras (Boumhaout et al., 2017).

El adobe destaca como uno de los materiales más abundantes en la tierra, convirtiéndolo en una opción esencial para la construcción sostenible. En este contexto existen estudios como el titulado "Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida" (Mosquera Arancibia, 2013). Este estudio tiene como objetivo entender las características térmicas del adobe, explorando su potencial aplicación en muros y bloques de tierra comprimida.

En determinadas instancias, se ha observado un interés en remplazar el cemento en las mezclas, explorando alternativas sustentables, como el uso de residuos agroindustriales (Martínez Molina et al., 2015). Asimismo, se ha considerado la posibilidad de emplear ceniza volcánica como una opción para sustituir parte del cemento, con el propósito de mejorar la matriz del material y, en consecuencia, su rendimiento. (Arreola Sánchez et al., 2017).

La incorporación de residuos como materiales reciclados y la optimización de composiciones se han convertido en enfoques esenciales en estas investigaciones. En particular, el PET (tereftalato de polietileno), un polímero termoplástico ampliamente utilizado en envases y contenedores, ha sido objeto de interés debido a su potencial para mejorar las propiedades térmicas de los morteros.

En investigaciones recientes, se ha evidenciado que la incorporación de PET en los morteros puede tener un impacto benéfico en sus propiedades térmicas y mecánicas. En este contexto, tanto el PET como la cal se destacan por ser materiales de baja densidad, lo que influye de manera significativa en su conductividad térmica reducida (Holzhueter & Itonaga, 2017). Además de su capacidad de aislamiento térmico, el PET también ofrece la ventaja de ser un

material reciclado, lo que se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular en la construcción. Sin embargo, aún persisten interrogantes sobre cómo la combinación de PET con otros componentes, como la cal de construcción y el carbonato de calcio, puede influir en las propiedades finales de los morteros y, en particular, en su conductividad térmica.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en investigar la conductividad térmica de los morteros que incorporan una combinación de cal de construcción y PET como agregados. Se han realizado estudios previos donde se emplea como agregado, aunque en estos casos se sustituye solo un parte del peso de la arena, en porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20% (Reis & Carneiro, 2011). Asimismo, en otra investigación, el PET se utilizó como sustituto del agregado fino en diversas proporciones, como el 2.5%, 5%, 10%, 15% y 20% en volumen (Spósito et al., 2020). En ambos estudios, se observaron cambios en las propiedades de los morteros. En contraste, en esta investigación, se procedió a sustituir la arena por el PET con el fin de entender sus características específicas.

Además, se explora la influencia de la adición de carbonato de calcio en esta mezcla, con el objetivo de determinar cómo esta variación en la composición afecta las propiedades de aislamiento térmico. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa sobre el desempeño térmico de los morteros, lo que puede tener implicaciones significativas en el diseño y la construcción de edificaciones con un enfoque en la eficiencia energética y el confort térmico. Este estudio busca contribuir al conocimiento de como la composición de los morteros influye en las propiedades de los materiales y específicamente en sus características térmicas. Los resultados obtenidos tienen el potencial de guiar decisiones en la selección de materiales y en la implementación de sistemas constructivos que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia energética en el sector de la construcción.

2. MATERIALES

Esta investigación se ha focalizado en la evaluación de la conductividad térmica de morteros que incorporan una combinación de materiales cuidadosamente seleccionados con el propósito de mejorar sus propiedades térmicas y, por ende, contribuir al aislamiento térmico en construcciones y comparar con la cal en pasta. Los materiales utilizados en esta investigación son la cal de construcción con contenido de hidróxido de calcio del 80% (Calidra, 2020), el PET y el carbonato de calcio en polvo.

La cal de construcción, seleccionada como el aglutinante principal, se obtuvo en forma de polvo y presentaba un contenido de hidróxidos entre el 75% y el 85% (Asociación Nacional de fabricantes de cal, A.C), un material ampliamente empleado a lo largo de la historia en la construcción, siendo parte de las técnicas de producción tradicionales (Villaseñor Alonso & Barba Pingarrón, 2012), ha sido elegida como uno de los componentes principales de los morteros en este estudio por sus características como su excelente trabajabilidad, plasticidad y adherencia (Navarro Mendoza & et al, 2020). La facilidad de su producción y su menor impacto ambiental en comparación con otros cementantes (Al-Jabri et al., 2019) la hacen una elección atractiva en la búsqueda de soluciones sostenibles en la construcción.

En adición a la cal de construcción, se ha incluido el PET como agregado a los morteros ya que es una buena opción ya que es un material biodegradable y uno de los plásticos más comunes (Borg, Baldacchino, & Ferrara, 2016). El PET, un polímero termoplástico comúnmente utilizado en envases y botellas, ha ganado atención en la construcción debido a su potencial para mejorar



las propiedades térmicas de los materiales. Dada su naturaleza termoplástica, el PET es conocido por su capacidad para reducir la conductividad térmica en las mezclas, contribuyendo al aislamiento térmico de los edificios. Su inclusión en los morteros no solo puede mejorar sus propiedades térmicas, sino que también se alinea con los principios de reciclaje y sostenibilidad, ya que permite reutilizar un material previamente desechado.

Adicionalmente, se ha considerado la adición de carbonato de calcio como un tercer componente en los morteros. El carbonato de calcio, en forma de polvo sólido, es un material químicamente estable y no inflamable (Calidra, 2021) que presenta propiedades beneficiosas para la mejora de la permeabilidad y porosidad en los morteros. Esta incorporación tiene como objetivo evitar la acumulación de agua en la red de poros, lo que puede conducir a la formación de fisuras y la degradación del mortero, siendo un agregado más fino.

Con la idea principal de esta investigación que se centra en la combinación de estos materiales con el fin de maximizar las propiedades térmicas de los morteros resultantes, aprovechando las características únicas de cada componente. Al explorarla interacción entre la cal de construcción, el PET y el carbonato de calcio, nuestra intención es obtener un mejor entendimiento de cómo estas combinaciones influyen en la conductividad térmica de los morteros. Es esencial evaluar la capacidad de contribuir al aislamiento térmico en edificaciones. Para una comparación significativa, también consideramos la pasta de cal como punto de referencia, dado que no contiene ningún agregado. Esto nos permite analizar con precisión el impacto de los agregados en las mezclas y sus propiedades térmicas.

3. METODOLOGÍA

Los materiales utilizados en la preparación de muestras se incluyeron cal de construcción como cementante, PET triturado y carbonato de calcio en forma de polvo. El carbonato de calcio se presentó como un polvo sólido utilizándose para mejorar la porosidad y permeabilidad de los morteros. Para la realización de pasta fue necesario hidratarla hasta obtener la consistencia.

Para identificar cada una de las mezclas, se les asignaron claves con el fin de facilitar su referencia, asegurando así la claridad en el análisis, siendo los siguientes:

Tabla 1. Claves

Clave	Cementante	Agregado	Agregado fino
Pasta CC	Cal de construcción	ninguno	ninguno
CC-CC	Cal de construcción	PET	ninguno
CC-P-CC	Cal de construcción	PET	Carbonato de calcio

Para llevar a cabo la evaluación de la conductividad térmica de los morteros que contienen cal de construcción, PET y carbonato de calcio se realizaron morteros con las siguientes dosificaciones:

Tabla 2. Dosificación en volumen

Clave	Cementante	Agregado	Agregado fino
CC-CC	2.5	4	-----
CC-P-CC	2	4	1



La elaboración de los especímenes siguió la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 para morteros de cemento, ya que no existen normas específicas para morteros de cal, se realizaron cilindros de 5 centímetros de diámetro por 10 centímetros de altura. Debido al fraguado más lento de la cal en comparación con otros cementantes como el cemento, no fue posible desmoldar los especímenes después de 24 horas. Se dejaron en los moldes durante 7 días antes de desmoldar para evitar daños durante la manipulación y prevenir cualquier deterioro.

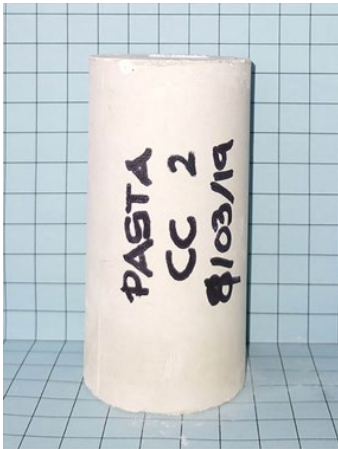


Figura 1. Cilindro de pasta de cal

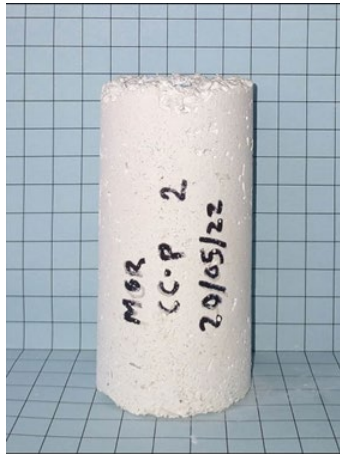


Figura 2. Cilindro de CC-P)



Figura 3. Cilindro CC-P-CC

4. MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Las pruebas de conductividad térmica se realizaron utilizando el equipo KD2 Pro en el laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Colima. Se empleó el método de aguja simple, basado en la norma ASTM D 534-08, para medir la conductividad térmica de los morteros en régimen estacionario. Este método involucra la inserción de una aguja hipodérmica con un filamento calefactor en el mortero, que luego se somete a una corriente constante. La variación de temperatura resultante se registra y analiza para determinar la conductividad térmica.



Figura 1. Equipo KD2 Pro.

Se utilizó una aguja simple con dimensiones de 60 mm de longitud y un diámetro de 1.3 mm. Esta aguja tiene un rango de conductividad térmica que varía de 0.02 a 2 [W/m·K]. La precisión de la medición de la conductividad térmica es de aproximadamente $\pm 5\%$ en el rango de 0.2 a 2 [W/m·K] y de ± 0.01 [W/m·K] en el rango de 0.02 a 0.2 [W/m·K]. Para asegurar la confiabilidad de las pruebas, es esencial tener en cuenta la posible variación del dispositivo, que en este caso se establece en $0.409 \pm 10\%$ K(Wm⁻¹ K⁻¹) según las instrucciones del aparato. Durante la ejecución de la prueba, se verificó que el resultado fue de 0.390 [W/m·K].



Figura 5. Realización de pruebas en los cilindros



Figura 6. Prueba de pasta de cal con la aguja 60 mm de longitud

5. RESULTADOS.

Los resultados se organizaron en una tabla en la que se calcularon los promedios de los datos obtenidos de los tres especímenes de cada mezcla, incluyendo el peso, la densidad y la conductividad térmica. A continuación, se presentan los siguientes promediados:

Tabla 3. Resultados

Especímen	Peso gramos	Densidad gr/cm ³	Conductividad térmica W/(m·K)
Pasta CC	188.3	1.07	0.247
CC-P	186.4	0.94	0.101
CC-P-CC	201.1	1.10	0.098

Para facilitar la comprensión de los datos obtenidos, se creó un gráfico comparativo entre la densidad y la conductividad térmica de las muestras. Observamos que la pasta de cal (CC) y el mortero (CC-P) exhiben resultados que están correlacionados en términos de su conductividad

térmica y densidad. Por otro lado, la muestra CC-P-CC presenta una conductividad térmica más baja, aunque su densidad es la más alta en comparación con las demás muestras.

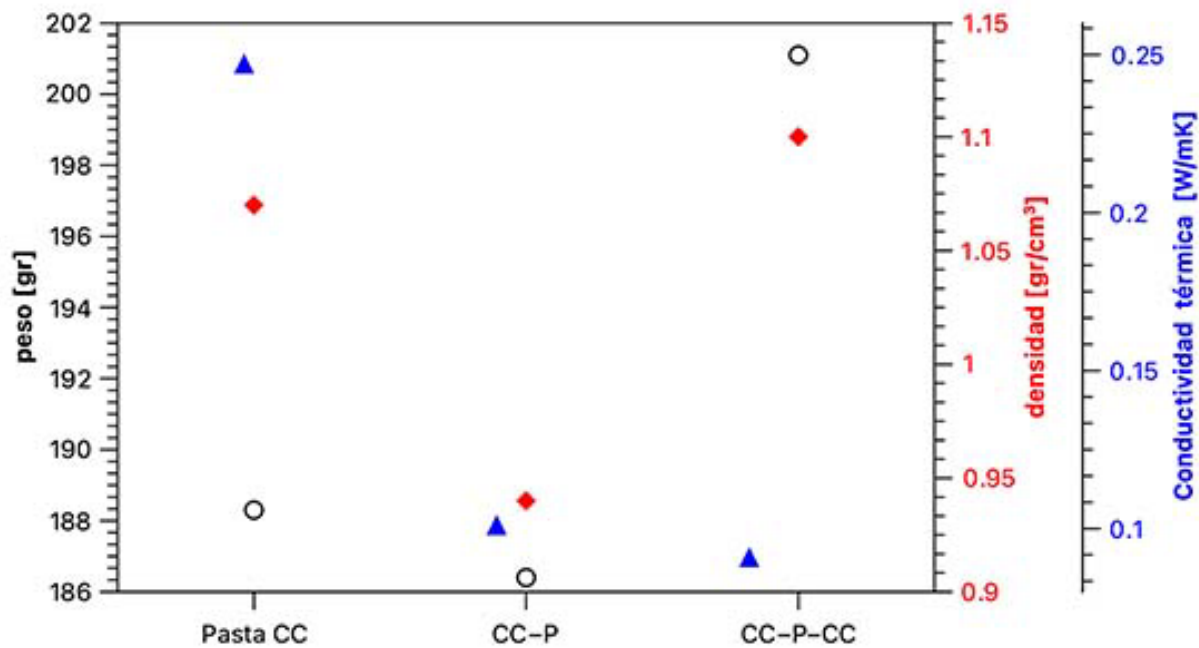


Gráfico. 1. Relación peso, densidad y conductividad térmica.

6. DISCUSIÓN

Los resultados de la evaluación de la conductividad térmica de los morteros de cal de construcción, PET y carbonato de calcio proporcionan una comprensión más profunda de cómo la combinación de estos componentes afecta las propiedades térmicas de los materiales de construcción. La investigación se centró en comparar la cal en construcción en pasta y analizar cómo afecta la incorporación de PET y carbonato de calcio en los morteros de cal puede influir en su capacidad de aislamiento térmico y, en última instancia, en la eficiencia energética de las edificaciones.

Los valores de conductividad térmica obtenidos para cada tipo de mortero revelaron diferencias significativas en sus propiedades térmicas. En particular, el mortero de CC-P presentó una conductividad térmica de 0.101 [W/m·K], siendo el que tiene la menor densidad 0.94 gr/cm³ y el peso más ligero 186.4 gramos. En contraste, la mezcla CC-P-CC demostró una reducción en la conductividad térmica a 0.098 [W/m·K], con una densidad de 1.10 [gr/cm³]. Sin embargo, debido a la incorporación de carbonato de calcio, este mortero es el más pesado con un peso de 201.1 gramos. Estos resultados indican un mejoramiento en las propiedades de aislamiento térmico debido a la incorporación del PET. Por otro lado, la pasta de cal exhibió la conductividad térmica más alta, con un valor de 0.247 [W/m·K], en cuanto a su densidad es de 1.07 [gr/cm³] y peso es de 188.3 gramos. Estos datos resaltan las diferencias en las propiedades de los morteros analizados y su influencia en la conductividad térmica.

El PET en el mortero puede contribuir a reducir la transferencia de calor a través del material, lo que resulta en una mejora en la capacidad de aislamiento térmico (Borg, Baldacchino, & Ferrara,

2016). Además, el uso de PET reciclado en la construcción no solo aprovecha un material previamente desechado, sino que también puede contribuir a la sostenibilidad y a la reducción de la huella ambiental.

La incorporación de carbonato de calcio (CC-P-CC) también demostró una ligera disminución en la conductividad térmica en comparación con la mezcla de cal y PET (CC-P). Este efecto puede atribuirse a las propiedades porosas del carbonato de calcio, que pueden ayudar a mejorar la permeabilidad y la porosidad del mortero. Un mayor volumen de poros puede contribuir a una mayor resistencia a la transferencia de calor y, por lo tanto, a un mejor rendimiento térmico.

Es importante destacar que, si bien se observaron mejoras en las propiedades de aislamiento térmico con la incorporación de PET y carbonato de calcio, también se debe considerar el equilibrio entre la conductividad térmica y las propiedades mecánicas del mortero. Algunas investigaciones han señalado que la adición de agregados livianos, como el PET, puede resultar en una disminución en las propiedades mecánicas, lo que debe ser tomando en cuenta en el diseño estructural (Longo et al., 2020).

Los resultados de esta investigación resaltan la influencia de los componentes individuales en las propiedades térmicas de los morteros de cal de construcción. La incorporación de PET y carbonato de calcio demostró una capacidad de mejora en la conductividad térmica, lo que sugiere un potencial para la aplicación de estos materiales en la construcción de edificaciones con un mayor enfoque en la eficiencia energética y el confort térmico. Sin embargo, es fundamental considerar el impacto en las propiedades mecánicas al diseñar y utilizar estos morteros en aplicaciones reales de construcción.

Conclusiones

En esta investigación, se evaluaron las propiedades térmicas de la pasta de cal y morteros de cal de construcción con la adición de PET y carbonato de calcio, con el objetivo de comprender cómo estas modificaciones afectan su capacidad de aislamiento térmico y, por ende, su potencial contribución a la eficiencia energética en la construcción de edificaciones. A través de las pruebas de conductividad térmica realizadas con el equipo KD2 Pro, se obtuvieron resultados que arrojan luz sobre el comportamiento de los morteros con diferentes composiciones.

Se determinó que la conductividad térmica es una propiedad clave en el desempeño térmico de los morteros, ya que afecta directamente la transferencia de calor a través de los materiales. Los morteros CC-P presentaron una conductividad térmica de $0.101 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$, mientras que la incorporación de carbonato de calcio resultó en una ligera reducción de esta propiedad, alcanzando un valor de $0.098 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ en la mezcla de CC-PCC. Esta reducción indica un mejoramiento en las propiedades de aislamiento térmico debido a la inclusión del PET, que actúa como un material aislante, y se puede comprobar al observar el resultado de la pasta de cal, la cual tiene una conductividad más alta que los morteros siendo esta de $0.247 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$. Estos resultados sugieren que la combinación de diferentes materiales puede tener un impacto significativo en las propiedades térmicas de los morteros, y que es posible lograr mejoras en el rendimiento térmico mediante la adecuada selección y dosificación de los componentes.

Es importante señalar que, aunque se observaron mejoras en las propiedades de aislamiento térmico, es esencial considerar el equilibrio entre la conductividad térmica y las propiedades mecánicas de los morteros. Esta investigación contribuye al entendimiento de cómo la incorporación de PET y carbonato de calcio en los morteros de cal de construcción puede influir

en sus propiedades térmicas. Los resultados indican que estos materiales tienen el potencial de mejorar el desempeño térmico de los morteros, lo que podría traducirse en edificaciones más eficientes desde el punto de vista energético y con un mayor confort térmico. Además, esta investigación abre la puerta a futuras investigaciones para explorar otras combinaciones de materiales y su impacto en las propiedades de los morteros. En última instancia, la implementación efectiva y segura de estos morteros en aplicaciones constructivas a gran escala requiere una consideración integral de sus propiedades térmicas y mecánicas, lo que podría contribuir significativamente a la construcción de edificaciones sostenibles y de alto rendimiento.

Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima por su invaluable apoyo en la generación de materiales y la medición de las propiedades físicas. Además, agradecemos al CONAHCYT por su generosa contribución mediante becas que hicieron posible esta investigación.

Bibliografía

- Al-Jabri, K., Shoukry, H., Mokhtar, M. M., & Morsy, M. S. (2019). Thermo-physical, mechanical and microstructural properties of cementless lightweight mortar. *Advances in Cement Research*, 1-12.
- Arreola Sánchez, M., Alonso Guzmán, E. M., Chávez Gracia, H. L., Martínez Molina, W., & Navarrete Seras, M. A. (2017). Ash Substitution Effect in Brick Fabrication in Induration Time and Mechanical Resistance in Mortars Portland Cement Base. *Materials Science Forum*, 83-87.
- Asociación Nacional de fabricantes de cal, A.C. (s.f.). *ANFACAL*. Recuperado el Septiembre de 2020, de <http://anfocal.org/usos-y-aplicaciones-de-la-cal/>
- Borg, R. P., Baldacchino, O., & Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fiber reinforced concrete. *Construction and Buildings Materials*, 29-47.
- Boumhaout, M., Boukhattem, L., Hamdi, H., Benhamou, B., & Ait Nouh, F. (2017). Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials*, 241-250.
- Calidra. (27 de 03 de 2020). *Ficha tecnica de seguridad Hidróxido de Calcio*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/06/ficha-tecnica-construccion-esp.pdf>
- Calidra. (05 de 08 de 2021). *Ficha de datos de seguridad- Agrical PM 60*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/05/SDS-Agrical-PM60.pdf>
- Holzhueter, K., & Itonaga, K. (2017). The potential for light straw clay construction in Japan: An examination of the building method and thermal performance. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 209-213.
- Holzhueter, K., & Itonaga, K. (2017). The potential for light straw clay construction in Japan: An examination of the building method and thermal performance . *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 209-213.



- Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M. A., & Krakowiak, K. J. (2020). Lightweight geopolymer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings. *Energy & Buildings*, 1-12.
- Martinez Molina, W., Alonso Guzmán, E., Lara Gomez, C., Gonzalez Valdez, F. M., Perez Lopez, T., Reyes Trujeque, J., y otros. (2015). Analysis of Carbonation in Mortars made with Solid Waste as a Substitute for Cement . *International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering*, 219-222.
- Monjo Carrió, J. (2005). La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización. *Informes de construcción*, 37-54.
- Mosquera Arancibia, P. (2013). *Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.
- Navarro Mendoza, E. G., & et al. (2020). Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Mortars and Pastes, Elaborated with Slaked Lime and High Hydrated Lime, for Restoration works in México. *Key Engineering Materials*, 51-55.
- Reis, J., & Carneiro, E. (2011). Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. *Construction and Buildings Materials*, 107-111.
- Spósito, F. A., Higuti, R. T., Tashima, M. M., Akasaki, J. L., Melges, J. P., Assuncao, C. C., y otros. (2020). Incorporation of PETwastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. *Journal of Building Enrineering*, 1-11.
- Villaseñor Alonso, I., & Barba Pingarrón, L. (2012). Los orígenes tecnológicos de la cal. *Cuicuilco*(55), 11-41.



Proceso constructivo de represa de ferrocemento para captar agua de lluvia en arroyos secos en Valles Centrales de Oaxaca

M. Ortiz-Guzmán^{1*}, V. J. Morales-Dominguez¹. R. Alavez -Ramírez¹. V. G. Jiménez-Quero¹

*Autor de Contacto: mortizgu@ipn.mx

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, IPN, México.

RESUMEN

La escasez de agua de lluvia se agudiza cada vez más aunado al cambio climático, provocando grandes atrasos a la agricultura incrementando los costos de los productos de primera necesidad, afectando a la población de menos recursos económicos. Para solventar esta problemática se han construido varias obras de ferrocemento. Para la construcción de represas se combina el ferrocemento con el muro de hormigón armado en las nervaduras verticales y horizontales, mejorando de esta manera el comportamiento estructural de la represa además de tener elementos delgados, la proporción del mortero es de 1:2.5 cemento-arena y un entramado de mallas para darle forma y rigidez a la estructura, alcanzando altas resistencias para soportar el empuje del agua durante las avenidas en periodos de lluvia. La función de estas obras es retener el agua de lluvia, mitigando el problema de la escasez de agua en los periodos críticos de sequía, además de recargar el nivel freático. Esta obra se encuentra en la región de Valles Centrales llegando a almacenar 8750 m³.

Palabras clave: Construcción; escasez; lluvia; ferrocemento; recarga.

1. INTRODUCCIÓN

En el estado de Oaxaca el clima que predomina es el subhúmedo, en esta zona se encuentra la región de Valles Centrales con lluvias en verano, gran parte del ciclo anual es sin lluvia lo que ocasiona la necesidad de retener y almacenar el agua de lluvia de los escurrimientos naturales de los cerros. La región de Valles Centrales abarca de la comunidad de San pablo Huitzo, Etlá; hasta Teotitlán del Valle Tlacolula. Las zonas apropiadas para construir represas y retener el vital líquido es al pie de los cerros, en estas zonas las construcciones habitacionales son catalogadas de alta marginación, según la SEDESOL, debido a las condiciones geográficas adversas a la ciudad, existe una tasa alta de deforestación y un alto índice de erosión por la nula reforestación y avance de la mancha urbana, por el mal uso de suelo. En la región por causas de la lluvia se pierden dos centímetros de suelo en cada temporada, es decir se destruyen 300 años de formación de tierra en la región [1]. La Universidad Autónoma de Chapingo reporta los siguientes números; un 13.3% de la superficie total con un muy alto grado de erosión, un 46% con un alto grado de erosión y un 2% con una fuerte erosión. El periodo de lluvia es en verano, lo que ocasiona destrozos e inundaciones y en el resto de las estaciones empiezan los periodos fuertes de sequía propiciando que los suelos queden desnudos por la falta de reforestación y retención de suelos. Para subsanar el problema del agua se propone la construcción de pequeñas represas de ferrocemento con la finalidad de almacenar agua de lluvia y de escurrimientos de los arroyos. El ferrocemento tiene un gran potencial para el desarrollo de los pequeños proyectos hidráulicos, por el bajo espesor de sus elementos estructurales, bajos requerimientos de materiales para su construcción y la poca necesidad de mano de obra especializada además de lo económico que resulta comparado con otro tipo de obras tradicionales. Este tipo de obra favorece la recarga de acuíferos, así como cualquier proyecto productivo que pretendan desarrollar las comunidades con demanda de agua. Como medidas de control se pueden construir muros protectores paralelos al río o sistemas de drenaje de las superficies (www.estrucplan.com.ar). Por tal razón las represas requieren ser diseñadas de manera que los elementos estructurales soporten además del peso propio, el empuje del agua por lo tanto es necesario estudiar el comportamiento de la relación de esbeltes de los elementos estructurales que son las nervaduras verticales a las que denominamos cartabones. (Osorio 2001). Tertuliano y col. (2003) muestran también una relación empírica para el módulo de elasticidad del mortero empleado en construcciones de ferrocemento para la ciudad de Oaxaca, basado en el estudio de tres proporciones volumétricas (1:2, 1:2.5 y 1:3); sin embargo con estos elementos de refuerzo Wainshtok (2010), menciona que el método de construcción de las estructuras de sus elementos debe establecerse teniendo en cuenta que se satisfagan los requisitos las resistencias a la rigidez y estabilidad de todas las etapas de trabajo. Wainshtok recomienda que la resistencia a la compresión en el ferrocemento depende fundamentalmente del mortero en proporción directa al área de la sección transversal. Con esta información es necesario retomar la Norma ASTM C 469-02 donde podemos encontrar que la razón para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson de cilindros, es cuando se aplica un esfuerzo de compresión longitudinal para esos estudios se realizaron pruebas básicas para determinar algunos parámetros.



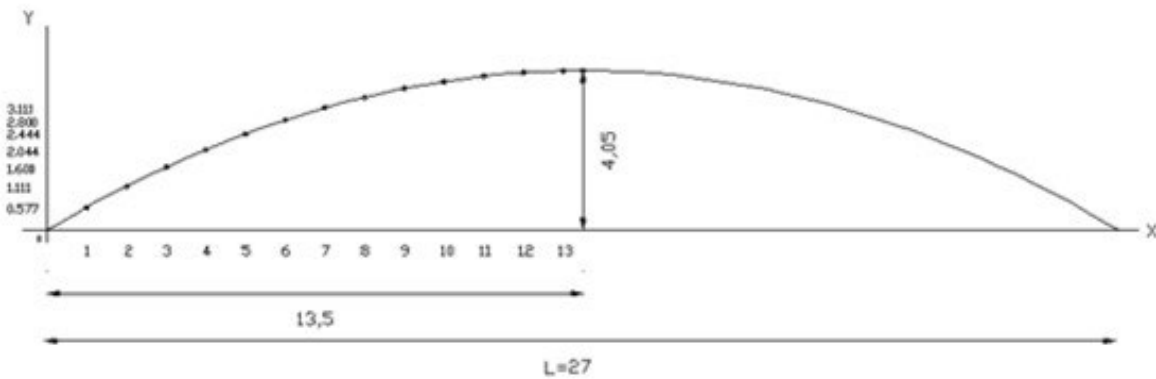
2. MATERIAL Y MÉTODO

Existen diferentes tipos de represas dependiendo de su tamaño, volumen de almacenamiento e importancia, para las comunidades rurales son las presas por gravedad, pero a partir de 1993 se ha iniciado la construcción de las represas construidas en forma de arco por la forma de su frente que trabaja como una estructura en que el empuje de la corriente transmite sus esfuerzos a las laderas de la represa, esta acción requiere de laderas firmes y seguras.

2.1 Trazo y excavación

La figura 1a muestra el trazo de la parábola para la construcción de la represa. La figura 1b muestra la excavación realizada mediante una retroexcavadora, finalmente la figura 1c muestra la excavación finalizada. El trazo se realiza con cinta, plomada, trompos (estacas) y cal hidra, empleando la forma de la parábola, la cuerda o longitud efectivo de la boquilla, de la longitud asignada, a la mitad se traza una línea perpendicular llamado flecha que va del 10 al 25 %, en el eje de las “X” se marca la separación de preferencia a cada “m”, en el lugar de las abscisas (“y”) así de esa manera se calcula la curvatura de la parábola empleando la siguiente ecuación.

$$y = \frac{4f}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) X \dots\dots\dots 1$$



a)



b)



c)

Figura 1. Construcción de represa: a) Trazo de la parábola, b) Excavación c) Estabilización del suelo mediante compactación

La excavación se desarrolla con maquinaria, mientras que los taludes se llevan a cabo de forma manual con pico y pala hasta encontrar suelo firme o un estrato rocoso, la profundidad es variable, el ancho para el desplante es de 2.00 m de forma escalonada dependiendo de la topografía del terreno, al término de la excavación se realiza limpieza retirando todo material fino. Para la realización de la cimentación se elabora un concreto ciclópeo utilizando piedra del lugar, la proporción es 1:3:3 cemento-arena-grava. La figura 2a muestra la base de desplante reforzada con varillas de 3/8", mientras que la figura 2b muestra la construcción del talud.



Figura 2. Construcción de taludes: a) Elaboración de base de desplante, b) Construcción de Talud.

La altura de la cimentación depende del tipo del suelo. La figura 3 muestra la construcción de la base de cimentación con un ancho de 2.00 m, se refuerza con 5 varillas de manera longitudinal y bastones transversales colocados a cada 0.40 m, posteriormente se cortan tramos de malla electrosoldada calibre 6x6/6-6 con escuadras, considerando 3 cuadros para traslapar con la base de la cimentación sobre las varillas que posteriormente se recubren con el concreto ciclopes, otros 3 cuadros emergen de forma vertical para traslapar posteriormente con la malla electrosoldada y formar el muro. También se colocan varillas en forma de "L" la cual se sujeta los cartabones a una distancia a cada 1.50 m en forma vertical. La losa de concreto se sugiere que sea de 12 cm para que las varillas tengan suficiente recubrimiento de tal manera de evitar reducir la vida útil del acero. El concreto se diseña para un $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$.



Figura 3. Construcción de la base de cimentación

La figura 4a muestra la cimentación colada con concreto ciclópeo. Para corroborar la resistencia del concreto se toman muestras en cilindros que posteriormente se llevan al laboratorio de pruebas (figura 4b).



a)



b)

Figura 4. Construcción de cimentación. a) Cimentación terminada, b) Toma de muestras de concreto.

Para la elaboración del muro se habilita la malla electrosoldada calibre 6x6/6-6 con las mallas de gallinero y falso plafón, estos trabajos se realizaron con la participación de personas de la comunidad, fomentando la integración de las comunidades en actividades comunes (figura 5).



Figura 5. Tejido de mallas para elaboración de muro, cartabones y tímpanos

La figura 6a muestra el habilitado de muros que se refuerza con cartabones y tímpanos. La figura 6b muestra la aplicación del mortero, la primera capa se denomina escamado y debe quedar totalmente rugosa para que se adhieran los aplanados posteriores. Cabe mencionar que son tres capas de aplanado.

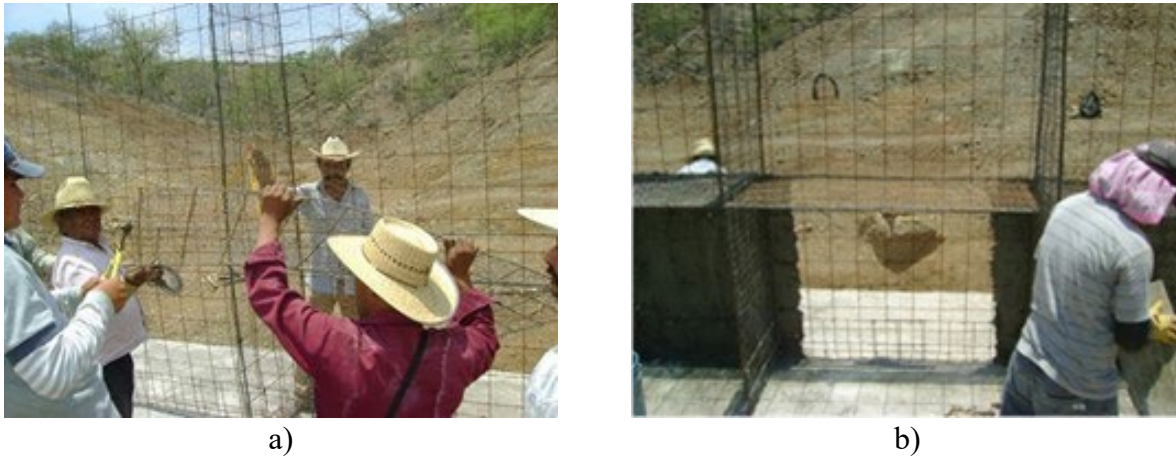


Figura 6. Elementos de refuerzo en muros: a) Habilitado de cartabones y tímpanos, b) aplicación del mortero.

Durante la construcción del muro se requiere muy poca cimbra y se avanza de forma paralela por la parte interna y externa. Durante la construcción es prioritario el riego continuo a los muros si es posible tres veces al día, pero si las condiciones no son la requeridas procurar que se riegue cuando dos veces al día, esto ayuda al mortero a alcanzar su resistencia deseada. Se puede dar el terminado final la parte de la primera franja para evitar que alguna lluvia no programada donde arrastra cualquier material en su recorrido y lo deposite al muro, siendo esto un problema porque es muy difícil de retirar la basura incrustada en las mallas que forma el muro. La figura 7a muestra el avance de muros con la geometría curva de la represa, mientras que la figura 7b muestra el refuerzo de los muros a base de tímpanos.



Figura 7. a) Acabado final del muro, b) Colado del tímpano en la parte posterior de la represa.

La figura 8a muestra el vertedor de demasías que sirve para el desalajo de la corriente. La figura 8b muestra el vertedor de demasías terminado.



a)



a)

Figura 8. a) Vertedor de demasías terminado, b) vertedor de demasías en operación

La figura 9a ilustra el empotre de un muro lateral, denominado zapata vertical, que continúa el armado de la losa de cimentación. La figura 9b muestra una compuerta de 1.20 x 1.20 m y 6 cm de espesor, construida con la misma técnica, que se instala después de 2 o 3 corrientes de agua para facilitar la eliminación de materiales orgánicos del cauce.



a)



a)

Figura 9. a) Empotre del muro, b) compuerta

3. RESULTADOS

Se han llevado a cabo pruebas de laboratorio para evaluar la calidad de los materiales pétreos en la construcción de represas de ferrocemento. Estas pruebas incluyen el diseño de mezclas y morteros, así como la evaluación de la resistencia a la compresión de placas de distintos tamaños y la determinación de módulos de elasticidad y la relación de Poisson, de acuerdo con la NOM C-128. Las comunidades rurales en zonas áridas necesitan almacenar agua de lluvia, y el ferrocemento es una alternativa eficiente para esta tarea. Esta técnica constructiva permite reducir los costos y minimizar los movimientos de tierra comparado con métodos tradicionales como la mampostería, facilitando el acceso al agua para consumo y cultivos.

La tabla 1 muestra los resultados de la resistencia a la compresión del mortero utilizado en las presas de ferrocemento.

Tabla 1. Datos obtenidos en la resistencia del mortero utilizado en los muros de ferrocemento.

Proporción volumétrica 1:2	Edad en días	Resistencia promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar(kg/cm ²)	C.V.
Cilindros de 10 cm de diámetro	7	309	15.7	5.1
	28	385	24.9	6.5
Cubos de 5 cm	7	320	11.0	3.4
	28	392	9.0	2.3

La figura 10 muestra la represa terminada y en operación. La filtración del agua en una represa ofrece múltiples beneficios clave: mejora de la calidad del agua: La filtración elimina impurezas, sedimentos y contaminantes, garantizando que el agua almacenada esté más limpia y segura para su uso en consumo, riego y otros fines, Optimización del Almacenamiento: Un sistema de filtración eficiente previene la acumulación de sedimentos en el fondo de la represa, maximizando la capacidad de almacenamiento y reduciendo la necesidad de mantenimiento frecuente, reducción de Problemas Ecológicos: Al eliminar contaminantes y nutrientes en exceso.



Figura 10. Represa terminada

4. CONCLUSIÓN

La escasez de agua se agrava debido al aumento en la demanda y los cambios climáticos. En regiones rurales y zonas áridas, las comunidades deben construir obras para almacenar e infiltrar agua de lluvia. El ferrocemento se presenta como una solución viable y económica para estas construcciones, promoviendo la participación comunitaria y el desarrollo local, incluso con asesoría técnica limitada.

5. AGRADECIMIENTO

Al Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional y a las comunidades de la Región de Valles Centrales que nos han aceptado incondicionalmente para asesorarlos en la construcción de 8 obras de captación con la técnica del ferrocemento. Al Proyecto SIP “Efecto de la esbeltez en placas de mortero armado.

Clave SIP 20182198” y el “Efecto en el módulo de elasticidad de mortero hidráulico de la fibra de bagazo de maguey”, SIP-20221601.

5. BIBLIOGRAFIA

ASTM C 469-02 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity a Concrete in Compression” American Society for Testing and Materials.

Caballero A.T. [et al.] (2003). Determinación del módulo de elasticidad del mortero empleado en construcciones de ferrocemento para la ciudad de Oaxaca, México. VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la construcción, CONPAT 2003, Vol I: Control de Calidad, p. X17-X24

Carabias, J., Landa R., Agua.: Medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte, México. 221 p. 2005.

La Rioja-Proyectos de Investigación y Desarrollo

Osorio C.F. Modelación, Diseño y Proceso Constructivo de una Cortina de Ferrocemento. Tesis profesional de Maestría en revision del Instituto Tecnológico de Oaxaca. México. 2001.

López, R. E.: Pueblos indígenas de México y Agua: mixtecos de Oaxaca, 1989. El pueblo de la lluvia. Atlas de culturas del agua en América latina y el Caribe. Extraído de: http://www.unesco.org.uy/phi/aguaycultura/fileadmin/phi/aguaycultura/Mexico/09_Mixtecos.pdf . julio 2010.

Wainsttok, Hugo (2010). Ferrocemento diseño y construcción 4ª. Edición, La fabrika Comunicación Integral. Riobamba, Ecuador

xi

PATROCINADOR GRAFENO



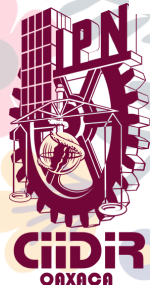
Guido Farina
GUIDO FARINA
PAINTER
@GUIDOFARINA.ART



PATROCINADOR PLATA



INSTITUCIONES COLABORADORAS



PATROCINADORES Y COLABORADORES