

Recomendación Técnica sobre la medida de
la resistividad eléctrica en probetas

Recomendaciones Técnicas

Carmen Andrade Perdrix
Miguel-Ángel Climent Llorca

<https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-04-resistividadenprobetas>



ALCONPAT Internacional

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción



RECOMENDACIÓN TÉCNICA

Coordinador

Pedro Garcés Terradillos

Director de Recomendaciones Técnicas
Universidad de Alicante, España

4

2020

Modificada

2023

Recomendación sobre la medida de la resistividad eléctrica en probetas

DOI: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-04-resistividadenprobetas>

Recomendações sobre a medição da resistividade elétrica em tubos de ensaio

Recommendations on the measurement of electrical resistivity in test tubes

Carmen Andrade Perdrix

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, España.

Miguel Ángel Climent Llorca

Universidad de Alicante, Alicante, España.

Recomendación Técnica No. 4

MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN PROBETAS

OBJETIVO

Esta Recomendación Técnica tiene como objeto describir dos métodos de medida de la resistividad eléctrica del hormigón en probetas, tanto cúbicas como cilíndricas y en testigos extraídos de obra construida: el método directo y el método de los cuatro electrodos, o de Wenner.

1. RESUMEN Y PRINCIPIOS DEL MÉTODO

Como indica la Ley de Ohm la resistividad es una propiedad volumétrica del material que representa la resistencia eléctrica específica del material, es decir la resistencia al paso de la corriente eléctrica por unidad de volumen (se considera una muestra del material de 1 m² de sección transversal y 1 m de espesor). La resistividad es la inversa de la conductividad.

La resistividad eléctrica del hormigón es un indicador de su durabilidad. Es también una medida indirecta de su porosidad y de su grado de saturación en agua. Así, cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Un hormigón presenta el mínimo de su resistividad cuando está saturado de agua. Cuando el hormigón se seca, su resistividad aumenta exponencialmente.

Dado que la mayoría de los áridos no conducen la corriente eléctrica. La resistividad es la resultante de la conducción electrolítica a través de los poros de la pasta de cemento. Es necesario prestar atención a pesar de ello a la posibilidad de contribución de los áridos, si estos son porosos, o tienen sustancias conductoras de la corriente.

También es necesario tener en cuenta la presencia de fibras conductoras en el hormigón. La resistividad del hormigón también depende de su temperatura, por lo que suele usarse una temperatura como referencia. A efectos de esta Recomendación Técnica la temperatura de referencia es la de 20±2°C.

Dado que al mezclar el cemento con el agua se obtiene una suspensión, la resistividad al principio del mezclado es muy baja, pero, según se va hidratando el cemento y el hormigón va fraguando y endureciendo, la resistividad aumenta y este aumento es paralelo al de la resistencia mecánica. La velocidad de aumento de la resistividad con el tiempo se ha definido como el “factor de edad” que es el exponente “q” de la ecuación [1], que se debe ajustar a la curva de evolución en el tiempo de cada hormigón particular:

$$\rho_t = \rho_0(t/t_0)^q \quad [1]$$

donde ρ_t = resistividad en el tiempo t, ρ_0 es la resistividad en la primera medida (normalmente a los 28 días (t_0) en curado saturado):

2. NORMAS DE CONSULTA

Existe una Norma UNE que describe los dos métodos de medida que contempla esta Recomendación Técnica: PNE 83988 – Durabilidad del hormigón – Determinación de la resistividad del hormigón – Parte 1 (Método directo) y Parte 2 (Método de Wenner).

3. DEFINICIONES Y APARATOS NECESARIOS

3.1. Definiciones

Resistencia eléctrica (R_e)

Es la relación entre la diferencia de potencial (V) entre dos electrodos y la intensidad de corriente (I) que circula por el interior de la probeta o testigo (ecuación 2).

$$R_e = \frac{V}{I} \quad [2]$$

Resistividad eléctrica (ρ)

Es la Resistencia eléctrica de la unidad de volumen del material. Se obtiene de la relación entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente circulante referida a una geometría normalizada (cubo de 1 m de arista).

$$R_e = \frac{V}{I} = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad [3]$$

- R_e es la resistencia eléctrica del hormigón en Ω .
- I es la Intensidad eléctrica que circula por el circuito en A.
- V es la diferencia de potencial entre los electrodos en V.
- ρ es resistividad en ohm-cm u ohm-m.
- L es la distancia entre los electrodos de potencial
- A el área transversal de paso de la corriente.

Resistividad volumétrica (ρ_v)

Se formula como:

$$\rho_v = R_e \cdot F_{gv} = R_e \cdot \frac{A}{L} \quad [4]$$

Resistividad superficial-medio infinito ($\rho_{s,inf}$)

Se formula como:

$$\rho_{s,inf} = R_e \cdot F_{gs} = R_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot a \quad [5]$$

La resistividad superficial-medio infinito es igual a la resistividad volumétrica si la medida se realiza sobre una superficie de dimensiones suficientemente grandes como para que se cumpla la condición física de medio quasi-infinito.

Resistividad superficial-medio finito (ρ_s)

Se formula como:

$$\rho_s = \rho_{s,inf} \cdot F_f = \rho_v \quad [6]$$

Siendo ρ_s la resistividad superficial sin multiplicar por el factor de forma F_f que es el que iguala el valor medido en la superficie con el de la resistividad volumétrica ρ_v .

Resistividad con sensores embebidos

Una posibilidad alternativa consiste en embeber un sensor que queda en el interior o centro de la probeta, para la medida continua de la resistividad.

Este sensor se recomienda que sea igualmente de cuatro electrodos pues el de dos electrodos puede dar lecturas erróneas al usar el mismo electrodo para aplicar la corriente y medir el cambio en la diferencia de potencial.

Su calibración es la misma que la del método superficial, ya que hay que aplicar el factor de forma a la medida con el sensor para obtener el valor de la resistividad volumétrica (ecuación [6]).

$$\rho_v = \rho_{sensor} \cdot F_{f,sensor} \quad [7]$$

El fabricante debe indicar el factor de forma de su sensor y la posición que sugiere en la probeta.

Factores geométricos (F_g)

El factor geométrico es la relación entre la resistividad y la resistencia eléctrica.

En el método volumétrico se denomina (F_{gv}) y es el Área (A) dividida por la distancia entre los electrodos (L) que miden el potencial.

$$F_{gv} = \frac{A}{L} \quad [8]$$

En el método superficial el factor geométrico (F_{gs}) para medio infinito:

$$F_{gs} = 2 \cdot \pi \cdot a \quad [9]$$

donde “a” es la distancia entre los electrodos, siempre que estén todos igualmente espaciados.

Este factor hace que la resistividad superficial medio-infinito ($\rho_{s,inf}$) resulte el mismo valor que la medida volumétrica (ρ_v).

Factor de forma (F_f)

En los casos de medidas de resistividad superficial sobre una probeta de dimensiones finitas, y de medida de resistividad con un sensor embebido, el valor obtenido es diferente del que se obtiene en la medida de resistividad volumétrica. Se denomina factor de forma (F_f) al que iguala el valor de la resistividad medida en los casos mencionados con la medida por el método volumétrico (ρ_v). Así, en la medida superficial tiene en cuenta que el medio sea finito o infinito y en el caso de usar un sensor embebido es el factor que convierte la medida en la de la resistividad volumétrica.

Es pues el factor que en una probeta de tamaño finito convierte el valor de la medida superficial de la resistividad (que daría como si fuese medio infinito) en el valor de la resistividad volumétrica.

$$F_f = \frac{\rho_s}{\rho_{s,inf}} = \frac{\rho_v}{\rho_{s,inf}} \quad [10]$$
$$F_f = \frac{\rho_s}{\rho_{s,inf}} = \frac{\rho_v}{\rho_{sensor}}$$

donde $\rho_{s,inf}$ es la resistividad en medio infinito.

Los factores de forma para diversas geometrías se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores de forma (F_f) para diferentes tamaños de probeta y distancias entre electrodos

Separación electrodos potencial	a = 0,035 m	a = 0,037 m	a = 0,05 m
Cilíndrica 0,30 x 0,15 m	0,73	0,71	0,60
Cilíndrica 0,20 x 0,10 m	0,57		0,38
Cilíndrica 0,15 x 0,075 m	0,38		
Prismática 0,04 x 0,04 x 0,16 m	0,17		
Cubos 0,15 x 0,15 x 0,15 m		0,65	0,52

4. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO OPERATORIO

4.1. Condiciones previas

Cualquier resistivímetro comercial puede utilizarse para realizar las medidas, teniendo en cuenta los factores geométricos correspondientes. También es posible medir con un resistivímetro artesanal realizado a partir de

una batería (corriente continua) y dos multímetros para medir potencial y corriente con una sonda artesanal para los cuatro electrodos (resistividad superficial) o con electrodos fabricados a partir de láminas metálicas

(resistividad volumétrica).

El aparato seleccionado se calibra midiendo primero mediante un circuito preparado con resistencias eléctricas de valor conocido.

Si la medida se basa en el método volumétrico, no es necesaria ninguna calibración adicional. Si el método a usar es el superficial, primero se debe medir la resistividad volumétrica y luego la resistividad superficial. Esta calibración previa de la medida superficial permite obtener el factor de forma (F_f) de la probeta concreta, según la ecuación [10].

El aparato debe ser capaz de aplicar una corriente estable (se recomienda que ésta sea alterna de hasta 40 mA) entre los electrodos externos. También se podrá emplear una fuente de corriente alterna (con frecuencias entre 40 Hz y 2 KHz) o continua y dos multímetros para la determinación de la intensidad (I) y la tensión aplicada (V). El multímetro para medida del potencial debe ser de alta impedancia interna ($> 10^6 \Omega$). Se podrá utilizar un registrador para la realización de varias medidas al mismo tiempo. Los valores mencionados en este apartado son solo orientativos.

Nota 1 - Puede utilizarse corriente continua o alterna indistintamente. Se recomienda que sea alterna para evitar una corrosión de los electrodos al aplicar la corriente siempre con la misma polaridad. La corriente alterna polariza lógicamente los electrodos igual que la continua, pero evita su corrosión. La corriente continua no se debe aplicar más allá de 5 segundos y la medida se toma a los 2-3 segundos.

Para la medida volumétrica se recomienda colocar una masa de alrededor de 2 Kg encima de la probeta con el fin de presionar el conjunto y así se consiga buen contacto en todas las interfases. Entre los electrodos de corriente y el hormigón es necesario colocar esponjas húmedas que se ajusten al tamaño de los electrodos.

Los electrodos de potencial en el método volumétrico de 4 electrodos pueden ser abrazaderas metálicas de acero inoxidable o de cobre. Estas abrazaderas permiten tener la medida del potencial en todo el perímetro de la probeta a la vez.

Nota 2 - Si la medida se hace con la probeta saturada de agua, no es necesario el interponer una esponja entre las abrazaderas y el hormigón, pero si la probeta no está saturada de agua, entonces es necesario colocar estas esponjas muy húmedas que faciliten el contacto electrolítico.

Si la medida se realiza sobre probetas saturadas de agua (curadas en balsa) se secará cuidadosamente su superficie lateral con un paño ligeramente húmedo para retirar el agua sobrante. No se recomienda la saturación a vacío pues cambia los valores de resistividad al sustituir la solución de los poros por el agua exterior, tanto si es agua potable, como si es una disolución de hidróxido cálcico.

Nota 3 - Si el curado es en cámara húmeda, es necesario introducir la probeta en agua totalmente sumergida durante 24 h antes de realizar la medida.

La medida se realizará en una estancia con la temperatura adecuada de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. La probeta debe estar a esa temperatura en el momento de la medida.

Nota 4 - Si la temperatura es diferente, se puede hacer la conversión a 20°C mediante la ley de Arrhenius siempre que la probeta esté saturada de agua o no varíe su humedad interior por la diferente temperatura.

$$\rho(T) = \rho_{20} \cdot e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{20}}\right)\right]} \quad [11]$$

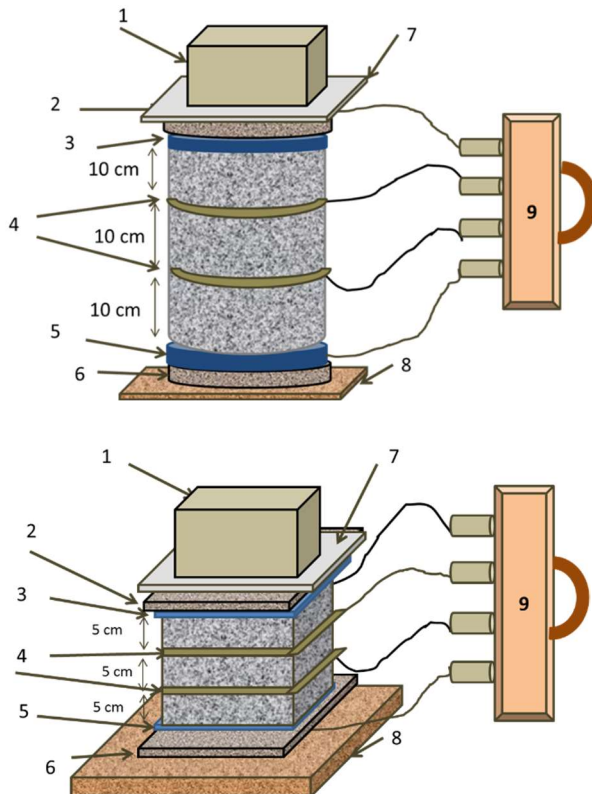
Donde $\rho(T)$ es la resistividad a la temperatura de la medida, ρ_{20} es la resistividad a 20°C , R es la constante de los gases $8,3143$ (Julio / mol \cdot $^\circ\text{K}$), T_{20} es 293°K , T es la temperatura de la medida en $^\circ\text{K}$ y E_a es la Energía de activación en Julios/mol. La Energía de Activación varía entre 15000 y 50000 Julios/mol. Se puede tomar como referencia un valor de 20000 Julios/mol.

Se indicará la temperatura de la sala de medición y de la balsa de curado en $^\circ\text{C}$.

4.2. Realización de la medida

Método volumétrico

La medida considera todo el volumen de la probeta (figura 1). Se colocan los electrodos frente-a-frente con los que se aplica la corriente en dos caras paralelas de la probeta y mide el potencial en dos electrodos intermedios diferentes de los de corriente.



1. Masa para presionar y mejorar el contacto electrodo/esponja/hormigón
2. Electrodo superior para aplicar la corriente
3. Esponja
4. Abrazaderas metálicas (electrodos de potencial)
5. Esponja
6. Electrodo inferior de corriente
7. Lámina de plástico aislante
8. Material de soporte no conductor
9. Resistivímetro

Figura 1. Medida directa de la resistividad eléctrica.

Como indica la figura 1, se coloca un soporte aislante de la corriente. Sobre este soporte se coloca el electrodo inferior y sobre él, una esponja húmeda. Sobre este electrodo se coloca la probeta y sobre ella la otra esponja, el electrodo superior y la masa de unos 2 Kg de peso para asegurar los contactos del conjunto.

A continuación, se efectúa la medida con el resistivímetro. Es necesario repetir la medida al menos una vez para confirmar que se repiten los resultados.

Nota 5 También se puede medir con solo los dos electrodos situados en las caras paralelas superior e inferior de la figura 1 conectando a ellos la medida de la corriente y el potencial. Este método con 2 electrodos es menos exacto porque existe una resistencia interfacial electrodo/esponja/hormigón que modifica el valor de la caída de potencial medida. Por ello se recomienda calibrar el método de 2 electrodos con el de 4 electrodos.

Nota 6 Se puede usar como resistivímetro el mismo que se usa para la medida del método superficial. Para ello en la disposición de 4 electrodos se conectan las puntas exteriores que aplican la corriente a los dos electrodos superior e inferior del método volumétrico y las dos puntas interiores a los dos electrodos que miden el potencial como indica la figura 1. En la disposición de dos electrodos, es necesario cortocircuitar las puntas de corriente y voltaje de cada lado y conectarlos a los dos electrodos superior e inferior de la figura 1.

Nota 7 En el caso de usar un resistivímetro comercial para la medida de la resistividad volumétrica, es necesario tener en cuenta que hay que deducir de esa medida el valor de la resistencia (R_c) dividiendo el valor de la resistividad por el factor F_{gs} usado por el aparato (descrito en la ecuación [9]). A partir de la resistencia obtenida se recalcula la resistividad volumétrica utilizando el factor F_{gv} , según la ecuación [4].

Método Superficial

En el método superficial se colocan los cuatro electrodos en la superficie de la probeta como indica la figura 2: los dos exteriores aplican la corriente y los dos interiores miden el cambio de potencial producido entre antes de aplicar la corriente y después. La distancia entre electrodos más idónea es la de 3,5 cm como máximo para probeta cilíndrica de 15 x 30 cm o cúbica de 15 cm de lado con el fin de no acercarse al borde de la probeta. En la probeta cúbica se deben poner los electrodos en la diagonal como indica la figura 2.

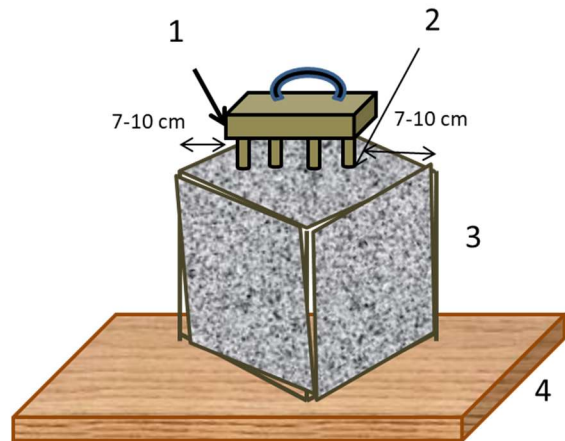
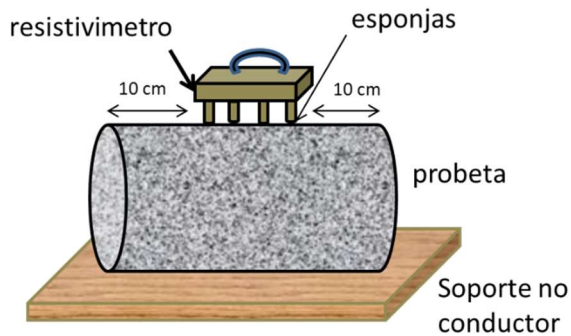


Figura 2. Medida superficial de la resistividad.

Si la probeta es cúbica se medirá en las 6 caras del cubo, o al menos en las 4 laterales y se obtendrá la media, que será el resultado final.

Si la probeta es cilíndrica: se colocarán los 4 electrodos centrados respecto de las caras laterales en una generatriz de la probeta (figura 2). Debe haber una distancia al borde de la probeta mayor que la distancia entre sí de los electrodos.

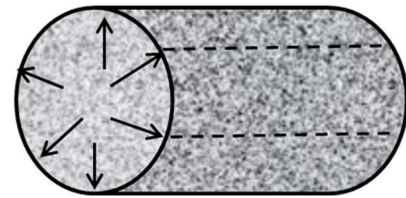


Figura 3. Las 6 generatrices en las que se debe tomar la medida de la resistividad superficial para hacer la media de la probeta

Para medir a lo largo de todo el perímetro de forma homogéneamente espaciada, cuando se establece la corriente se realizarán seis medidas una sobre cada una de las seis generatrices separadas 60° entre sí, alrededor de la muestra (figura 3). El valor de la resistividad eléctrica de cada probeta será la media de estas seis medidas.

Método con sensor embebido

En la figura 4 se muestra la probeta que puede ser cilíndrica o cúbica con el sensor embebido.

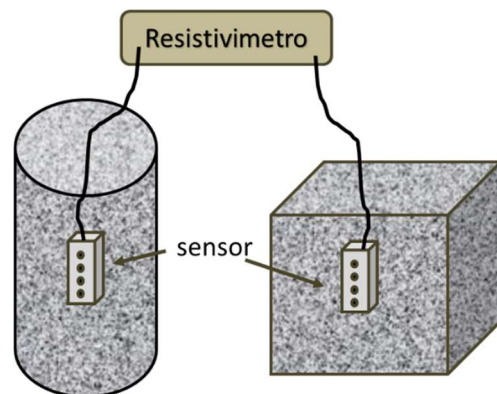


Figura 4. Medida de la resistividad en probetas con un sensor embebido.

5. CÁLCULOS

a. Método volumétrico con dos electrodos

En el caso de medir la resistividad volumétrica con una disposición de solo dos electrodos, (véase Nota 5 de la sección 4.2) la resistencia eléctrica medida debe corregirse restando la resistencia eléctrica de las esponjas húmedas, según la ecuación [12]. Una vez obtenido el valor de R_e se aplicará la ecuación [4]

donde:

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad [12]$$

- R_e es la resistencia eléctrica del hormigón (ecuación 1).

- R_{e+sp} es la resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas.
- R_{sp} es la resistencia eléctrica de las esponjas.

b. Método Superficial

Para el cálculo de la resistividad se aplica la ecuación [6]

El Factor de forma F_f para varias geometrías de probeta se muestra en la Tabla 1.

6. PRECISION DEL ENSAYO

En la Tabla 2 se muestran los Coeficientes de Variación de Repetibilidad y Reproducibilidad encontrados en dos ejercicios en 2016 y en 2019.

Ejercicio	Repetibilidad Coeficiente de variación (C.V-%)	Reproducibilidad Coeficiente de variación (C.V-%)
Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"-2016 (4 técnicos diferentes)	2,46	5,15
Ensayo Interlaboratorios "CALIDUR" – 2019 (22 laboratorios)	3,37	13,56

7. INFORME

El informe de la determinación de la resistividad eléctrica en probetas deberá contener la siguiente información:

- Nombre y dirección del responsable de las medidas.
- Fecha de la realización de las medidas.
- Fecha de realización del informe.
- Nombre y dirección del cliente.
- Descripción y foto de las probetas.
- Temperatura y humedad relativa del laboratorio.
- Método de ensayo utilizado e identificación del resistímetro.
- En el caso de probetas fabricadas en laboratorio indicar el método de curado o método de acondicionamiento de la humedad de las probetas.
- En el caso de testigos de hormigón extraídos de obra construida indicar el método de acondicionamiento de la humedad de los testigos.
- Resultados de resistividad.
- Firma y titulación, u otra identificación de la/s persona/s responsable/s del contenido técnico del informe.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Wenner, F. "A Method for Measuring Earth Resistivity". Bureau of Standards J. 12. 1915. pp. 469 - 478.
2. ASTM G-57-84. "Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner four-electrode Method".
3. NBR 9204. Concreto Endurecido. "Determinação da resistividade elétrica volumétrica". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Rio de Janeiro-Brasil, 1985.
4. Millard, S. G., Harrison, J.A. and Edwards, A.J. "Measurements of Electrical Resistivity of Reinforced Concrete Structures for the Assessment of Corrosion Risk". British Journal of NTD. vol. 31.1989. pp. 617 - 621.
5. Polder, R.; Andrade, C.; Elsener, B.; Vennesland, Ø.; Gulikers, J.; Weidert, R. and Raupach, M. "Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete", RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion", Materials and Structures, Vol 33 (2000), pp. 603-611.
6. W. Morris, E.I. Moreno, A.A. Sagüés. "Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe", Cement and Concrete Research, 26 (1996) 1779-1787.
7. Andrade C., Fullea J., Alonso C. "The use of the graph corrosion rate-resistivity in the measurement of the corrosion current". Proceedings of the International Workshop on Measurement and Interpretation of the On-Site Corrosion Rate. MESINA- RILEM Proc. No. 18. Eds. C. Andrade, C. Alonso, J. Fullea, J. Polimón and J. Rodríguez. Rilem Publications S.A.R.L. (2000) 157-166.
8. C. Andrade, M. Castellote, R. D'Andrea. "Measurement of ageing effect of chloride diffusion coefficients in cementitious matrices". Journal of Nuclear Materials, 412 (2011) 209-216.

ANEJO 1

Ejemplos de calculo

Ejemplo 1. Probeta cilíndrica medida con resistivímetro de 4 electrodos que da directamente el valor de la resistividad

Medida en probeta cilíndrica de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud con un resistivímetro de 4 electrodos que tienen una separación entre ellos $a = 3,7$ cm.

- Medida volumétrica como se indica en la figura 1 (separación de abrazaderas metálicas = 10 cm). A los 28 días de curado bajo agua con hidróxido cálcico se obtiene un valor de $69 \Omega \cdot m$
- Medida superficial: después se mide directamente sobre la superficie lateral de la probeta según se indica en la figura 2 y el valor obtenido es el de $74 \Omega \cdot m$

Cálculos

- Medida volumétrica: se calcula el valor de la resistividad volumétrica convirtiendo el valor de $69 \Omega \cdot m$ mediante la división de este valor por el $2 \cdot \pi \cdot a$ del aparato para obtener la resistencia en ohmios y luego se multiplica por el factor geométrico de la disposición de la figura 1 (área transversal = $0.075^2 \cdot \pi$ y distancia entre electrodos = 10 cm). Por tanto:

$$\rho_s = \rho_v = \frac{69 \cdot 0,075^2 \cdot 3,1416}{0,1 \cdot 2 \cdot 3,1416 \cdot 0,037} = 69 \cdot 0,76 = 52,45 \Omega \cdot m$$

- Medida superficial: usar directamente el factor de la Tabla 1 que resulta para 3,7 cm de separación de electrodos de 0,71 aplicado al resultado de la resistividad superficial

$$\rho_s = 74 (\Omega \cdot m) \cdot 0,71 = 52,54 \Omega \cdot m$$

Ejemplo 2. Probeta cúbica medida con resistivímetro de 4 electrodos que da directamente el valor de la resistividad

Medida en probeta cúbica de 15 cm de lado con un resistivímetro de 4 electrodos que tienen una separación entre ellos $a = 3,7$ cm.

- Medida volumétrica como se indica en la figura 1 (separación de abrazaderas metálicas = 5 cm). A los 28 días de curado bajo agua con hidróxido cálcico se obtiene un valor de $29 \Omega \cdot m$
- Medida superficial: después se mide directamente sobre la superficie de la probeta según se

indica en la figura 2 y el valor obtenido es el de $82 \Omega \cdot m$

Cálculos

- Medida volumétrica: se calcula el valor de la resistividad volumétrica convirtiendo el valor de $29 \Omega \cdot m$ mediante la división de este valor por el $2 \cdot \pi \cdot a$ del aparato para obtener la resistencia en ohmios y luego se multiplica por el factor geométrico de la disposición de la figura 1 (área transversal = $0,15 \cdot 0,15$ y distancia entre electrodos = 5 cm). Por tanto:

$$\rho_s = \rho_v = \frac{29 \cdot 0,15^2}{0,05 \cdot 2 \cdot 3,1416 \cdot 0,037} = 29 \cdot 1,94 = 56,26 \Omega \cdot m$$

- Medida superficial: usar directamente el factor de la Tabla 1 que resulta para 3,7 cm de separación de electrodos de 0,65 aplicado al resultado de la resistividad superficial

$$\rho_s = 82 (\Omega \cdot m) \cdot 0,65 = 53,30 \Omega \cdot m$$

Como se puede comprobar todos los caminos de cálculo dan valores muy similares al ser el mismo hormigón a la misma edad.

Ejemplo 3. Probeta cilíndrica medida con resistímetro que obtiene el valor de la resistencia eléctrica

Medida en probeta cilíndrica con un resistímetro de 4 electrodos que tienen una separación entre ellos $a = 3,7$ cm.

- Medida volumétrica como se indica en la figura 1 (separación de abrazaderas metálicas = 10 cm). A los 28 días de curado bajo agua con hidróxido cálcico se obtiene un valor de $296,80 \Omega$
- Medida superficial: después se mide directamente sobre la superficie lateral de la probeta según se indica en la figura 2 y el valor obtenido es el de $318,96 \Omega$

Cálculos

- Medida volumétrica: se calcula el valor de la resistividad volumétrica multiplicando el valor de $296,80 \Omega$ por el factor geométrico de esa probeta (área transversal = $0,075^2 \cdot \pi$ y distancia entre electrodos = 10 cm). Por tanto:

$$\rho_s = \rho_v = \frac{296,8 \cdot 0,075^2 \cdot 3,1416}{0,1} = 52,45 \Omega \cdot m$$

- Medida superficial: se calcula primero la resistividad y luego se multiplica por el factor de la Tabla 1 que resulta para 3,7 cm de separación de electrodos de 0,71 aplicado al resultado de la resistividad superficial

$$\rho_s = 318,96 \cdot 2 \cdot 3,1416 \cdot 0,037 \cdot 0,71 = 52,64 \Omega \cdot m$$

Ejemplo 4. Probeta cúbica medida con resistímetro que obtiene el valor de la resistencia eléctrica

Medida en probeta cúbica de 15 cm de lado con un resistímetro de 4 electrodos que tienen una separación entre ellos $a = 3,7$ cm.

- Medida volumétrica como se indica en la figura 1 (separación de abrazaderas metálicas = 5 cm). A los 28 días de curado bajo agua con hidróxido cálcico se obtiene un valor de $124,74 \Omega$
- Medida superficial: después se mide directamente sobre la superficie lateral de la probeta según se indica en la figura 2 y el valor obtenido es el de $352,72 \Omega$

Cálculos

- Medida volumétrica: se calcula el valor de la resistividad volumétrica multiplicando el valor de $124,74 \Omega$ por el factor geométrico de esa probeta (área transversal = $0,15^2$ y distancia entre electrodos = 5 cm). Por tanto:

$$\rho_s = \rho_v = \frac{29 \cdot 0,15^2}{0,05} = 56,13 \Omega \cdot m$$

- Medida superficial: se calcula primero la resistividad y luego se multiplica por el factor de la Tabla 1 que resulta para 3,7 cm de separación de electrodos de 0,65.

$$\rho_s = 352,72 * 2 * 3,1416 * 0,037 * 0,65 = 53,30 \Omega \cdot m$$