

Recomendaciones sobre determinación de la resistividad eléctrica del hormigón *in situ* mediante el método de las cuatro puntas y del disco

Recomendaciones Técnicas

Carmen Andrade Perdrix
Miguel Ángel Climent Llorca

<https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-05-resistividadinsitu>



ALCONPAT Internacional

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



Editores

Pedro Garcés Terradillos

Director de Recomendaciones Técnicas
Universidad de Alicante, España

Jorge Alberto Briceño Mena

Subdirector de Recomendaciones Técnicas
Cinvestav del IPN, Unidad Mérida, México

Recomendaciones sobre determinación de la resistividad eléctrica del hormigón *in situ* mediante el método de las cuatro puntas y el método del disco

DOI: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-05-resistividadinsitu>

Recomendações para determinar a resistividade elétrica do concreto in situ usando o método dos quatro pontos e o método do disco

Recommendations for determining the electrical resistivity of concrete on-site by the four electrodes method and the disc method

Carmen Andrade Perdrix

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

Miguel Ángel Climent Llorca

Universidad de Alicante,
Alicante, España.

Recomendación Técnica No. 5

DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN OBRA MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS Y MÉTODO DEL DISCO

OBJETIVO

Esta Recomendación Técnica tiene como objeto describir dos métodos de medida de la resistividad eléctrica del hormigón en obra: el método de los cuatro electrodos, o de Wenner, y el método del disco”.

1. INTRODUCCIÓN Y CAMPO DE APLICACIÓN

La resistividad eléctrica de un hormigón es una medida indirecta de la conectividad y tamaño de sus poros y del grado de saturación de líquido de su red porosa.

Esta norma tiene como objeto describir la medida en obra de la resistividad del hormigón mediante el método de las cuatro puntas o método de Wenner, y mediante el método del disco.

2. DEFINICIONES

Resistencia eléctrica (R_e)

Relación entre la diferencia de potencial (V) entre los electrodos y la intensidad de

corriente (I) que circula por el interior del hormigón.

Resistividad eléctrica (ρ)

Resistencia eléctrica de la unidad de volumen del material. Es la inversa de la conductividad y 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).

En el caso de medida en obra la resistividad siempre se determina sobre la superficie de un elemento o estructura de hormigón de dimensiones relativamente grandes (medio quasi-infinito). Por ello el resultado de este tipo de medidas lo denominaremos como resistividad superficial-medio infinito ($\rho_{s, inf}$).

Método de las 4 puntas o de Wenner

En el caso de una disposición de la sonda en la superficie del material en forma de “cuatro electrodos o de Wenner” (figura 1) en un medio quasi-infinito la resistividad se calcula según la siguiente expresión:

$$\rho_{s,inf} = R_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot a = R_e \cdot F_{gs} \quad (1)$$

donde,

R_e es la resistencia eléctrica medida, en Ω .

$F_{gs} = 2 \cdot \pi \cdot a$, es el factor geométrico, siendo ‘a’ la distancia entre puntas del resistivímetro, en m.

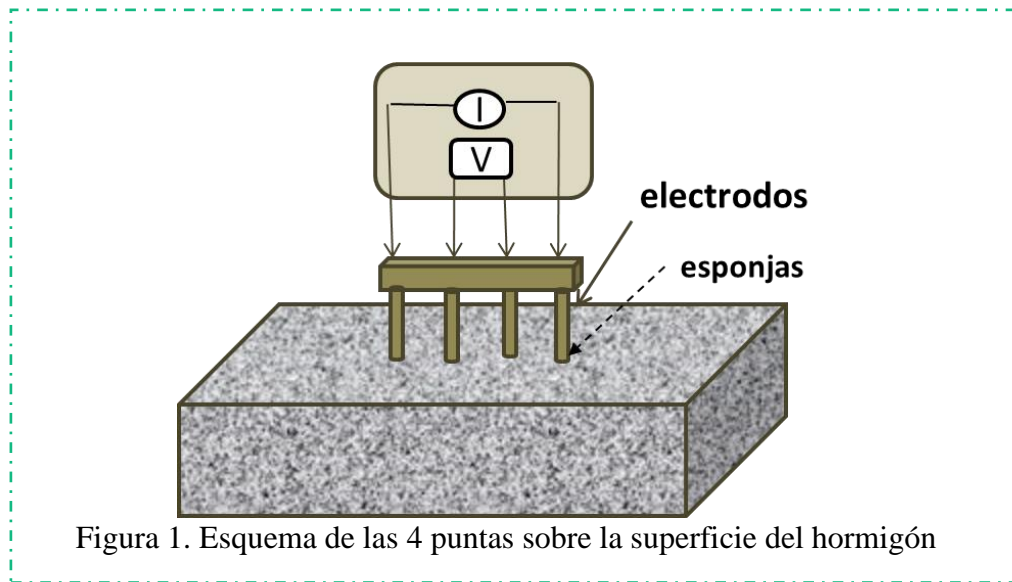


Figura 1. Esquema de las 4 puntas sobre la superficie del hormigón

Si el elemento a medir es de geometría finita, para la correcta aplicación del método se recomienda que el espacio entre electrodos no supere un cuarto de cualquier dimensión del elemento de hormigón. La distancia a cualquier borde del elemento debe ser al menos el doble

del espacio entre electrodos. En caso de medidas de resistividad sobre probetas o elementos de hormigón de pequeñas dimensiones se recomienda seguir las indicaciones de la Recomendación Técnica Alconpat No. 4 [1].

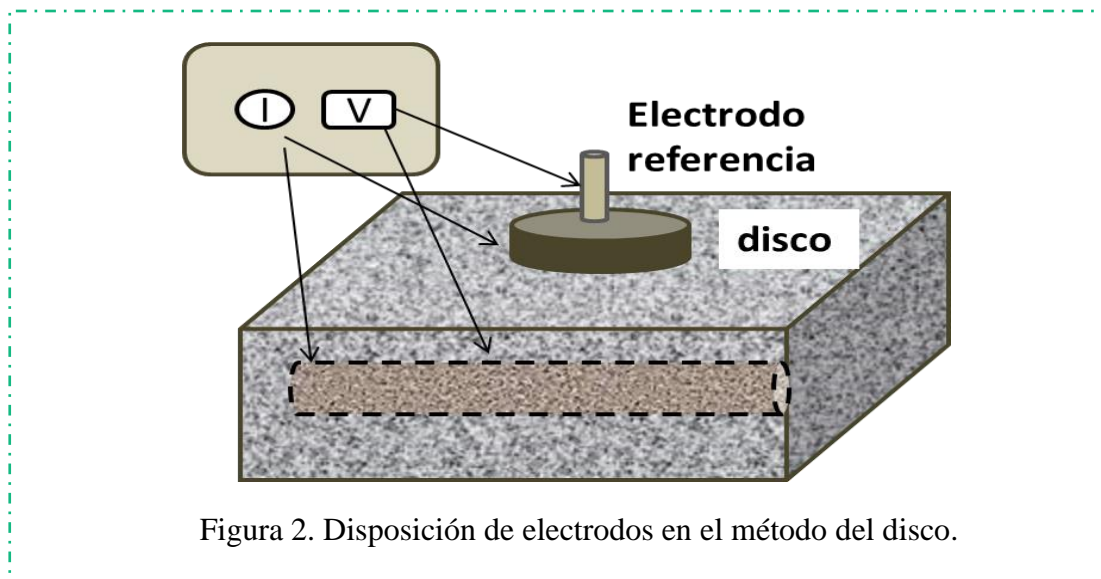


Figura 2. Disposición de electrodos en el método del disco.

Método del disco

En el caso de utilizar un disco (véase figura 2) como electrodo auxiliar, es necesario entonces usar la barra como electrodo de trabajo y utilizar un electrodo de referencia en el centro geométrico del disco. El valor de la resistividad se obtiene de la siguiente expresión:

$$\rho_{s,inf} = 2 \cdot \phi \cdot R_e \quad (2)$$

donde,
 R_e es la resistencia eléctrica medida, en Ω .
 ϕ es el diámetro del disco, en m.

3. FUNDAMENTO DEL MÉTODO

Los resultados se expresarán en ohmios·metro ($\Omega \cdot m$) o en Kilo-ohmios·cm ($K\Omega \cdot cm$)

Método de las 4 puntas

El método de las 4 puntas consiste en la determinación de la resistividad eléctrica del hormigón endurecido mediante el uso de 4 electrodos en contacto con la superficie de hormigón [2, 3]. La aplicación de la corriente

se efectúa por los electrodos más externos (figura 1) y la medida de la variación de la caída de potencial, antes y después de aplicar la corriente, se realiza entre los dos electrodos más internos.

Método del disco

El método del disco está basado en la aplicación de una corriente entre la armadura y el disco y la medida del potencial entre la armadura y un electrodo de referencia colocado en el centro del disco (véase figura 2) [3, 4].

Influencia del grado de saturación del hormigón

La resistividad varía en función del grado de saturación de líquido de la red de poros del material. Un hormigón puede variar su

resistividad dependiendo del clima o las condiciones del ambiente en el que se encuentre y por ello presentar resistividades diferentes.

Riesgo de corrosión

Los valores de riesgo de corrosión de armaduras en función de la resistividad se dan en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de riesgo de corrosión de armaduras de acero, en función de la resistividad y por tanto del grado de saturación del hormigón.

| Resistividad ($\Omega \cdot m$) | Riesgo de corrosión |
|-----------------------------------|---------------------|
| < 100 | alto |
| 100 - 500 | moderado |
| 500 - 1000 | bajo |
| > 1000 | despreciable |

Influencia de la proximidad de las armaduras

La presencia de armaduras en el campo de acción de los electrodos falsea la medida debido a la interacción de la corriente con el metal embebido. Por ello, se debe disminuir la distancia entre electrodos o el diámetro del disco según el espesor de recubrimiento, dado que el campo de influencia de la corriente es en profundidad, del mismo orden que la

distancia entre electrodos en el método de las 4 puntas o del diámetro del disco, aunque puede llegar cierta influencia a 3 veces este valor. Es decir, si las armaduras están muy densamente distribuidas y no hay zonas sin ellas, entonces será necesario disminuir la distancia de los electrodos o el diámetro del disco para que sean menores que el espesor de recubrimiento.

4. APARATOS

Método de las cuatro puntas

El resistivímetro es un aparato capaz de aplicar una corriente estable, que se recomienda que sea alterna de hasta 40 mA a una frecuencia entre 40 Hz y 2 KHz. También se podrá emplear una fuente de corriente alterna o continua y dos multímetros para la determinación de la intensidad I y la tensión aplicada V . En este caso de corriente continua es necesario tomar el valor a los 2 segundos de aplicada la corriente. Los valores anteriores son

solo orientativos.

Nota 1 - Puede utilizarse corriente continua o alterna indistintamente. Se recomienda que sea alterna para evitar una corrosión de las puntas 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 - 10 segundos.

Un ejemplo de resistivímetro se muestra en la figura 3.



Figura 3. Resistivímetro con 4 puntas que tiene esponjas en sus extremos para facilitar el contacto electrolítico con el hormigón.

Material complementario

Electrodos

Cuatro barras (figura 3), fabricados de acero o cobre o de otro metal conductor libre de impurezas superficiales (depósitos, óxidos visibles, suciedad, etc.) cuyo diámetro esté comprendido entre 4 y 6 mm, deberán estar acoplados en un soporte rígido de modo que su separación sea de 35 ó 50 mm.

Esponjas de contacto

Cuatro esponjas individuales en la punta de los electrodos (figura 3 en amarillo), que se humedecerán para garantizar el contacto hormigón – electrodo.

Agua para la humectación de las esponjas y para la saturación del hormigón

El agua utilizada tanto para la humectación de las esponjas como para la saturación de las probetas de hormigón será agua potable.

4.1 Método del disco

El aparato debe ser capaz de aplicar una corriente estable durante al menos 5 - 10 segundos entre la armadura y el disco que hace de electrodo auxiliar sobre la superficie de hormigón. El potencial de respuesta se registra entre la armadura y el electrodo de referencia insertado en el centro del disco. La resistividad eléctrica es medida en intervalos de alrededor de 0,1 segundos.

Material complementario

Electrodos

Un disco fabricado de acero, acero inoxidable u otro metal conductor libre de impurezas superficiales (depósitos, óxidos visibles, suciedad, etc.) cuyo diámetro esté comprendido entre 1,5 y 3 cm, acoplado en un soporte rígido como se indica en la figura 4. Este disco debe tener un orificio central en el que se aloja un electrodo de referencia (de Cu/CuSO₄ o de Ag/AgCl o de Titanio o similar).

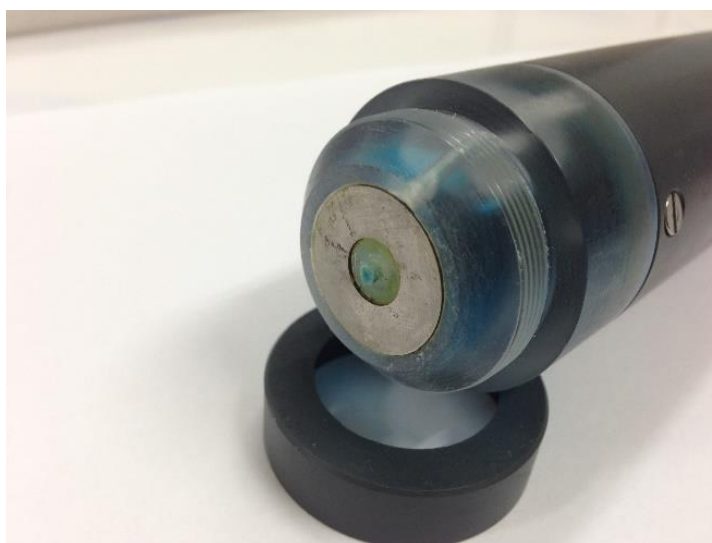


Figura 4. Esquema de electrodo de disco donde se aprecia la conexión al electrodo central de referencia (Cu/CuSO₄ en este caso) y al propio disco.

Esponjas de contacto

Entre el disco y el hormigón se situará una esponja circular del mismo tamaño que el disco que debe estar bien humedecida.

Agua para la humectación de las esponjas y para la saturación del hormigón

El agua utilizada tanto para la humectación de la esponja como para la saturación de las probetas de hormigón será agua potable.

5. MÉTODO OPERATORIO

Colocación y Humectación de las esponjas en el sensor

La primera operación será colocar las esponjas (método de las 4 puntas) o la esponja (en el disco) y humedecerlas con agua potable.

Selección de los puntos de medida

Los puntos de medida pueden ser aleatoriamente seleccionados o bien en forma de cuadrícula (figura 5) para realizar un mapeo regular.



Figura 5. Trazado de una cuadrícula regular sobre el hormigón para el mapeo de la estructura.

Los puntos de medida no deben coincidir con las armaduras ya que su presencia da una resistencia aparente menor que la del hormigón (ver nota 2).

Si no se pueden encontrar puntos sin armadura, la distancia entre electrodos o el diámetro del disco deben reducirse para que sean menores

que el espesor de recubrimiento ya que hay que asegurar que la medida no se vea afectada por la presencia de armadura.

Nota 2 - Puede utilizarse un pachómetro que identifique la posición de las armaduras.

Saturación de la superficie de hormigón

Se entiende como tal, la conseguida mediante mojado con agua abundante (figura 6) durante al menos 2 - 3 minutos antes de la realización de la medida. Tiene como finalidad asegurar la presencia de electrolito en los primeros 2 - 3 mm superficiales para facilitar el contacto de

los electrodos con la superficie del hormigón y la inyección de la corriente eléctrica.

Nota 3 - Esta agua no penetra en el tiempo de la medida y por ello no altera el grado de saturación que tenga la estructura en ese momento.



Figura 6. Mojado de la superficie del hormigón antes de realizar la medida de resistividad

Realización de las medidas

Las medidas se realizarán de forma sistemática registrando los valores, así como cualquier incidencia (figura 7). Si existen recubrimientos de cualquier naturaleza, se deben retirar antes de hacer las medidas para que su propia resistividad no modifique los resultados (figura 8).

Para la correcta interpretación de los resultados es necesario tomar nota de la temperatura del hormigón o al menos de la temperatura ambiental, así como de la humedad relativa de la atmósfera y la existencia de drenajes o presencia de agua en la superficie del hormigón.

La normalización de los valores a 20°C se puede realizar con la ley de Arrhenius según la ecuación:

$$\rho(T) = \rho_{20} \cdot e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{20}}\right)\right]} \quad (3)$$

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 (Julios/mol·°K), T_{20} es 293°K, T es la temperatura de la medida en °K y E_a es la Energía de activación en Julios/mol.

Nota 4 – La Energía de activación varía con la humedad y calidad del hormigón entre valores de 15000 y 50000 J/mol. Se puede tomar como referencia un valor de 20000 J/mol. En cada hormigón este valor se puede calibrar si se mide la resistividad a 20°C y a otras dos temperaturas por encima y por debajo.

Para el caso de las medidas realizadas mediante el método del disco es necesario hacer contacto con la armadura de la estructura.



Figura 7. Agua abundante para mojado superficial y dibujado de cuadrícula para las medidas



Figura 8. Retirada de la pintura y el recubrimiento para hacer la medida directamente sobre el hormigón

6. INFORME

El informe de la determinación de la resistividad eléctrica en estructuras de hormigón deberá contener la información sobre la estructura estudiada, identificando con un código los puntos de medida en la estructura o la cuadrícula realizada.

- 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 e identificación de la estructura y de las distintas zonas donde se hayan realizado las medidas.
- Temperatura del hormigón si fuera posible. Temperatura y humedad relativa de la atmósfera.
- Presencia de humedades en la estructura.
- Método de ensayo utilizado e identificación del resistímetro usado.
- Resultados inequívocamente adscritos a la zona de medida.
- Firma y titulación, u otra identificación de la/s persona/s responsable/s del contenido técnico del informe.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Andrade, C.; Climent, M.A., Recomendación sobre la medida de la resistividad eléctrica en probetas de hormigón, ALCONPAT INTERNACIONAL, Recomendación Técnica No. 4, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-04-resistividadenprobetas>
2. ASTM G-57-84, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA (2001).
3. 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, Recommendation of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, Materials and Structures, 33 (2000) 603-611.
4. Feliu, S., et al., A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete, Materials and Structures, 29 (190) (1996) 362-365.
5. Sanchez, J.; Andrade, C.; Torres, J.; Rebolledo, N.; Fullea, J, Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements, Materials and Structures (2017) 50:41.

ANEXO A (Informativo)

A la hora de valorar los ensayos hay que tener en cuenta posibles cambios en el orden de magnitud de los valores obtenidos en algunos hormigones según el tipo de árido utilizado en los mismos o por la presencia de fibras

metálicas o conductoras. Un ejemplo de valores de la resistividad no comparables con los de hormigones estándar serían los obtenidos en hormigones con áridos ligeros, pesados, conductores y reciclados.