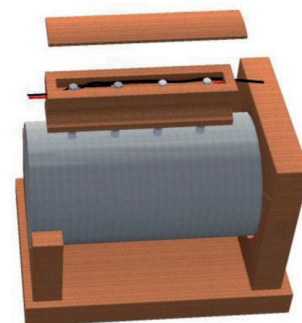


Guía de buenas prácticas: fabricación y validación de un equipo para la medida de la resistividad eléctrica en el hormigón.

Aplicación en el control del curado

GUIDE TO BEST PRACTICES: MAKING AND VALIDATION OF A DEVICE FOR THE MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE. APPLICATION IN THE CONTROL OF CONCRETE CURING



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7070> | Recibido: 03/01/2014 • Aceptado: 22/05/2014

Eduardo González-Díaz, Pedro Sánchez-Luis y Francisco-Javier Gutiérrez-García

Universidad de La Laguna. Dpto. de Ingeniería de la Construcción. Avda. Ángel Guimerá Jorge s/n. 38204-La Laguna. Tenerife. España. Tfno. +34 922 318973. egonza@ull.es

ABSTRACT

- The correlation between electrical resistivity and the properties of concrete, make its determination becoming increasingly in a parameter of great interest in concrete characterization.

It is presented in this work a guide of good practices for make a resistivity meter of 4-points and low-cost. We will detail all the necessary steps essentials in the usage of the device. Validation from the series of trials. Description of device and auxiliary elements. Evaluation of greater stability and precision regarding different voltage measurements in AC and in DC calibrated to values of $160 \pm 2 \Omega \cdot m$ and $1200 \pm 24 \Omega \cdot m$.

The 4-points device or Wenner, as it is known, determines the electrical resistivity in cylindrical tests of 150×300 mm concrete. We compare these results with other tests carry out by the application of the direct method and also with tests run by commercial devices.

We propose a methodology employing resistivity measurement to establish the degree of concrete curing during the early stages of hardening in relation to values obtained in concrete standards. We also provide experimental detail of concrete at different stages and curing times. Concretes of the study were manufactured with basalt aggregates and Portland cement mixed with natural Pozzolan (CEM II/B-P 32,5N)

- **Keywords:** Electrical Resistivity, Resistivity Meter of 4-points, Wenner, Concrete Curing, Building Materials.

RESUMEN

Las correlaciones entre la resistividad eléctrica y las propiedades del hormigón hacen que su determinación se convierta cada vez más en un parámetro de gran interés en la caracterización de este material.

Se presenta en este trabajo una guía de buenas prácticas para la construcción de un resistímetro de cuatro puntas de bajo coste. Se detallan todos los aspectos necesarios para su construcción y validación a partir de las características generales dadas en las normas de ensayos. Se describe el equipo y elementos auxiliares y se valoran condiciones de mayor estabilidad y precisión en la medida aplicando diferentes voltajes en corriente alterna y corriente continua sobre una regleta comercial de calibrado para valores de $160 \pm 2 \Omega \cdot m$ y $1200 \pm 24 \Omega \cdot m$.

El resistímetro de 4 puntas o Wenner fue utilizado para determinar la resistividad eléctrica de probetas cilíndricas de hormigón de 150×300 mm. Se comparan estos resultados con los obtenidos mediante el método directo y con el uso de un equipo comercial.

Como aplicación se propone una metodología que emplea la medida de la resistividad para establecer el grado de curado de un hormigón durante las primeras edades de endurecimiento en relación a valores obtenidos en hormigones patrón. Se aportan datos experimentales de resistividad eléctrica de hormigones con diferentes edades y tiempos de curado. Los hormigones del estudio son confeccionados con áridos basálticos y cemento portland con adición de puzolana natural (CEM II/B-P 32,5N).

Palabras clave: Resistividad Eléctrica, Resistímetro de 4 puntas o Wenner, Curado de Hormigón, Materiales de Construcción.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONCEPTO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y MÉTODOS PARA SU MEDIDA

La resistividad eléctrica, ρ_e ($\Omega \cdot m$), en un hormigón refleja la capacidad de este medio poroso para el transporte de carga eléctrica. Se trata de una medida de la resistencia eléctrica de la unidad de volumen del hormigón y se obtiene como rela-

ción entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente referida a una geometría normalizada (cubo de 1 metro de arista).

El método de referencia para la medida de la resistividad eléctrica en probetas y testigos de hormigón es el método directo [13]. Consiste en aplicar un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de una probeta de hormigón. Para posibilitar el adecuado contacto eléctrico entre el electrodo metálico y la probeta se sitúa una esponja húmeda cuya resistencia eléctrica debe determinarse previamente. Una vez colocada la probeta entre las esponjas y electrodos se mide la intensidad de corriente que circula y la diferencia de potencial. En la Fig. (1) se muestra una imagen de la medida de la resistividad eléctrica mediante el método directo y un esquema del efecto del campo eléctrico sobre los iones disueltos en los poros del hormigón.

El cálculo de la resistividad eléctrica se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\rho_e = k \cdot R_e = \frac{S}{L} R_e \quad (1)$$

donde k es la constante de la celda en metros, R_e la resistencia eléctrica del hormigón en Ω , S el área de la cara de la probeta donde se sitúan los electrodos en m^2 , y L la altura de la probeta en metros. La resistencia eléctrica del hormigón se obtiene como diferencia entre la resistencia eléctrica del hormigón con las esponjas en contacto con los electrodos (R_{e+sp}) y la resistencia de las esponjas (R_{sp}) según la Ec. (2).

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad (2)$$

El método directo anteriormente descrito tiene el inconveniente de necesitar una probeta o un testigo para realizar la medida de la resistividad no siendo posible la medida *in situ*. Sin embargo el método indirecto de 4 puntas o de *Wenner* [14] mostrado en la Fig. (2) es de aplicación tanto a probetas o testigos como a hormigones puestos en servicio.



Fig. 1: Medida de la resistividad eléctrica en el hormigón por el método directo (izquierda) y efecto del campo eléctrico sobre los iones disueltos en los poros del hormigón (derecha, imagen adaptada de [1])

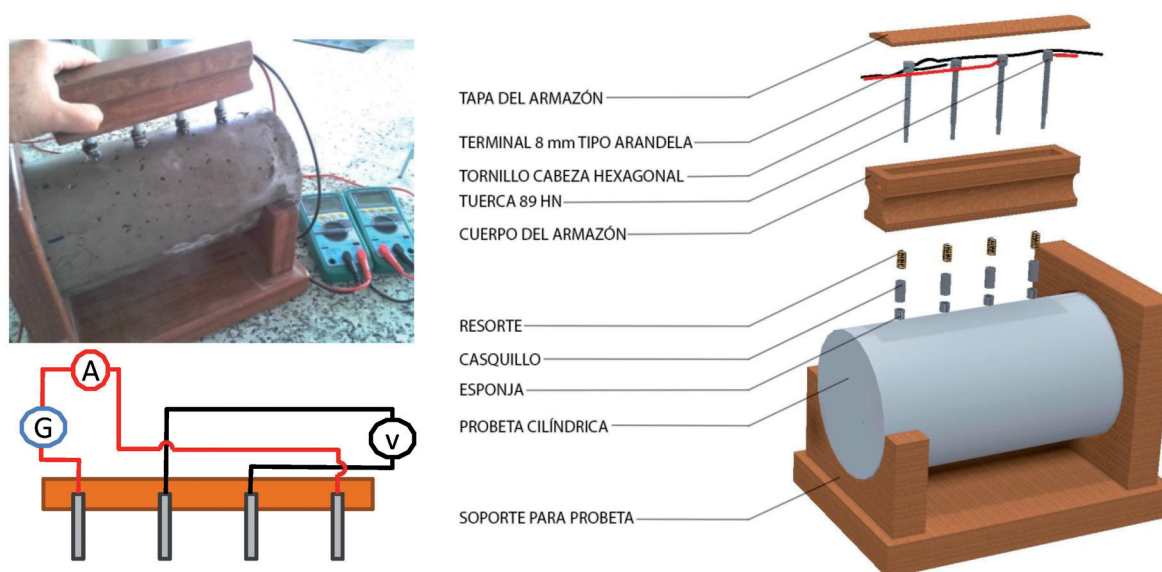


Fig. 2: Resistivímetro de 4 puntas para la medida de la resistividad eléctrica del hormigón por el método indirecto, esquema de conexión y ensamblaje de los elementos

Para medir la resistividad eléctrica mediante este segundo método se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores según Fig. (2). La resistividad eléctrica se relaciona con la resistencia eléctrica mediante una constante de celda “ k ” que es el cociente entre un factor geométrico que depende de la distancia entre las sondas “ a ”, y un factor de forma “ χ ” [2].

$$k = \frac{f_{\text{geométrico}}}{\chi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\chi} \quad (3)$$

Una vez calculada la constante de celda y medida la intensidad de corriente y diferencia de potencial, la resistividad eléctrica se calcula según la Ec. (4)

$$\rho_e = k \cdot R = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\chi} \cdot \frac{V}{I} \quad (4)$$

Donde “ a ” es la separación entre electrodos, “ V ” es la diferencia de potencial entre los electrodos centrales en voltios; e “ I ” es la intensidad de corriente que circula por el circuito en amperios. En las probetas cilíndricas se realizan medidas sobre cada generatriz separadas 60° y se toma el valor medio de las medidas obtenidas y desviación estándar [14].

1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA ABORDADA Y PRÓPOSITO DEL ESTUDIO

La medida de la resistividad eléctrica en el hormigón se presenta como un parámetro que puede relacionarse con numerosas propiedades del hormigón, y por tanto, ser útil como indicador de las características del mismo. Diferentes autores han establecido correlaciones entre la resistividad eléctrica y las propiedades del hormigón que hacen que su determinación se convierta en un parámetro cada vez de mayor interés para su caracterización. Un ejemplo relevante de ello es la existencia de una relación inversamente proporcional entre la resistividad del hormigón y el grado de corrosión [3]. Pero no es el único, también existen relaciones entre la medida de la resistividad eléctrica en el hormigón con la penetración de agua y cloruros [4], con la humedad y contaminación de sulfatos y cloruros en el hormigón [5], con la determinación de tiempos de fraguado [6], con la evolución de daños en el hormigón durante la congelación y deshielo [7], con la corrosión inducida por cloruros [8], con la detección del secado prematuro [9], con el control de la producción [10], y con el control de calidad [11], entre otros. La relación entre la resistividad eléctrica y la durabilidad del hormigón ha permitido el reciente desarrollo de un modelo de predicción de vida útil del hormigón [12] para el cálculo del tiempo de iniciación y de propagación que incluye la medida de la resistividad eléctrica en la formulación del modelo.

Como puede comprobarse la medida de la resistividad en el hormigón suscita el interés entre los investigadores ya que con un ensayo no destructivo que puede realizarse *in situ* se dispone de información sobre las propiedades, calidad y durabilidad del hormigón. Por ello, el objetivo principal de este trabajo se centra en presentar un procedimiento para la construcción de un resistivímetro apto para realizar medidas de resistividad eléctrica en el hormigón. Aunque las normas de ensayo [13-14] dan unas características generales que deben cumplir estos equipos, en ellas no se aportan los pormenores necesarios para su construcción y valores de referencia

para su validación. En este trabajo se describen con detalle los elementos singulares del dispositivo de medida tanto para el método de Wenner como para el método directo. Se contrastan los valores obtenidos con los dados por un equipo comercial y usando una placa de calibrado de resistividad. Por otra parte se facilitan valores experimentales de voltaje e intensidad de corriente que generalmente no son incluidos como datos en los trabajos. Estos valores de voltaje e intensidad son de interés dado que sirven de referencia y dan a conocer el orden de magnitud de la corriente que circulando por el hormigón aporta datos fiables de resistividad.

Por último, y como aplicación del uso del equipo propuesto se presenta una metodología experimental para establecer el grado de curado de un hormigón en las primeras edades de endurecimiento en relación a los valores obtenidos en hormigones usados como patrón. El grado de curado se establece relacionando los valores de la resistividad eléctrica de probetas curadas en obra con respecto a dos probetas patrón. Una de ellas con un curado sumergido en agua y otra sin ninguna aportación de agua externa sometida a las condiciones ambientales de obra.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL RESISTIVÍMETRO DE CUATRO PUNTAS O DE WENNER

En la Fig. (2) se muestra un esquema sencillo del ensamblaje del resistivímetro de cuatro puntas propuesto. En la construcción de este equipo se distinguen tres elementos por las características y funcionalidad del material: el armazón o bastidor, electrodos y elementos auxiliares.

- 1) *Armazón*. Se trata de un bastidor de madera con forma ergonómica según se muestra en la Fig. (3). Este bastidor con propiedades de aislante eléctrico cumple la función de soporte a los cuatro electrodos.
- 2) *Electrodos*. Son los elementos encargados de realizar el contacto eléctrico con el hormigón y constan de cuatro partes: sonda, esponja, casquillo y resorte.
- a) *Sonda*. Se trata de un tornillo de cabeza hexagonal que incluye una tuerca que sujeta a un terminal tipo arandela para cable con agujero de 8 mm. El tornillo de cabeza hexagonal posee dos partes diferenciadas: una con rosca que da soporte al mismo mediante unión roscada a un casquillo, y otra sin rosca para evitar la erosión y deterioro de las esponjas.
- b) *Esponjas*. Son cuatro esponjas con forma cilíndrica perforadas a través de su eje longitudinal. Las esponjas se colocan húmedas recubriendo la parte final de cada electrodo para garantizar el contacto eléctrico entre el hormigón y la sonda. Las esponjas tienen un diámetro de 4 mm y una longitud de 15 mm.
- c) *Casquillo*. Se trata de un casquillo con rosca interior que limita el movimiento del resorte y mantiene la sonda su-

jeta al armazón. Los casquillos son cilindros perforados a lo largo de su eje longitudinal con un diámetro externo de 10 mm, un diámetro interno de 5 mm y una longitud de 20 mm.

- d) *Resorte*. Se sitúa entre el casquillo y la tuerca del electrodo. Este resorte permite el movimiento del electrodo garantizando el contacto simultáneo de las cuatro sondas con la superficie del hormigón cerrando el circuito eléctrico.

de mayor estabilidad y precisión en la medida. Dos de ellas tienen una salida en corriente continua (CC) y una de ellas en corriente alterna (CA):

- “Lendher DCPower supply IMHY3003D 0-30 V”. Se trata de una fuente de alimentación de corriente continua de uso frecuente en laboratorio en la que se puede regular el voltaje de salida.
- “TCA-20 salida 10/12/14/16 V CA 1200 mA”. Fuente de alimentación con voltaje de salida en CA variable.

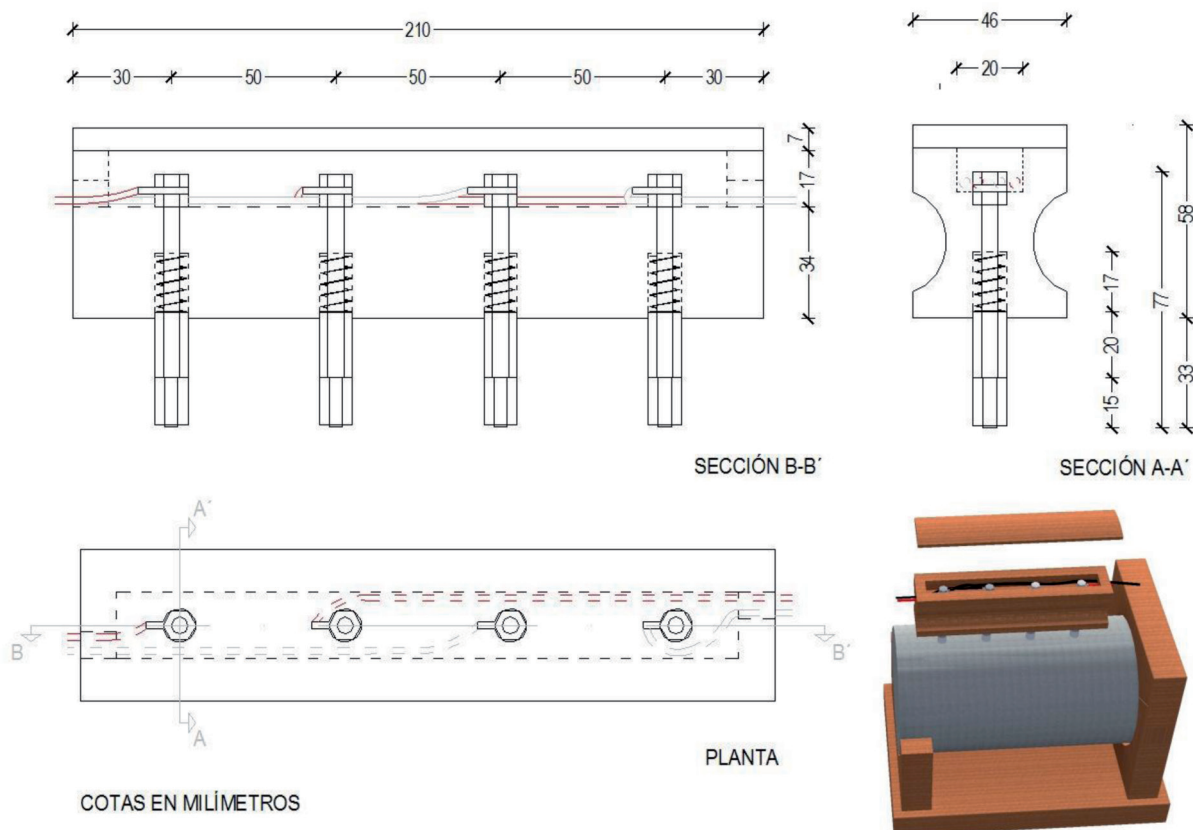


Fig. 3: Esquema del resistivímetro de 4 puntas propuesto

- 3) *Elementos Auxiliares*. Lo forman aquellos elementos que dan sujeción a las probetas, generan la corriente, establecen las conexiones eléctricas y miden la intensidad de corriente y el voltaje.
- a) *Soporte para probetas cilíndricas* de 150x300 mm de hormigón. Se trata de un soporte de madera que garantiza las condiciones de aislamiento eléctrico de la probeta durante la medida. El soporte dispone de dos paneles laterales que facilitan la colocación y el giro de las probetas cilíndricas para realizar las medidas de resistividad sobre las seis generatrices de la misma. Para ello, en uno de los paneles se dispone de un hueco de sección circular en el que se introduce la probeta cilíndrica con marcas cada 60° que sirven de referencia en el giro.
- b) *Fuente de alimentación*. Se emplearon tres fuentes de alimentación con el objetivo de valorar las condiciones

- “Batería 6LR61 Panasonic 9 V CC”. Se trata de una pila comercial de 9 V en CC tipo 6LR61.

- c) *Cables*. Los cables empleados para las conexiones eléctricas son “Q2-206 EMELEC ViasCom 1x1 mm² high flexibility”

- d) *Multímetro o polímetro*. Se trata de un instrumento portátil que permite la medida, entre otras, de magnitudes eléctricas activas como intensidad de corriente y potencial.

2.2. MATERIALES PARA LA REALIZACIÓN DE LA MEDIDA DIRECTA DE LA RESISTIVIDAD

Para la medida directa de la resistividad es necesario aplicar una tensión estable sobre la probeta y medir la intensidad de corriente y diferencia de potencial entre los electrodos. Para la realización de esta medida son necesarios cinco elementos:

electrodos, esponjas de contacto, masa de 2 kg para presionar el electrodo superior, base de la probeta y elementos auxiliares (fuente de alimentación, cables y multímetro), según Fig. (4).

- 1) *Electrodos.* Como electrodos se emplearon dos chapas de acero de 15 cm de diámetro y un espesor de 4 mm, provistas de una patilla para la conexión eléctrica.
- 2) *Esponjas de contacto.* Como esponja de contacto se requiere un material con una resistencia eléctrica inferior a los 100 Ω . Se determinó la resistencia eléctrica para esponjas de poliuretano, de polietileno reticulado y de paño de algodón de 3 mm de espesor. La resistencia eléctrica obtenida varía en función del grado de humectación de las esponjas que se requiere para el ensayo. En los dos primeros casos siempre fue superior a 200 Ω . En cambio, empelando la esponja de paño la resistencia eléctrica nunca superó los 50 Ω . Estas esponjas de paño fueron las seleccionadas para las determinaciones de la medida directa de la resistividad.

2.3. METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA EL CONTROL DEL CURADO

La resistividad eléctrica en el hormigón depende entre otras variables de la presencia de agua líquida en la estructura de poros del hormigón. La presencia de agua líquida de manera continua en los poros provee un medio conductor en el hormigón. Cuando esta fase líquida se reduce y pierde la continuidad la resistividad aumenta de manera significativa permitiendo que dicha medida sea un indicador de su grado de saturación y por tanto pueda servir para el control del curado. Entre las aplicaciones tecnológicas señaladas en los antecedentes se encuentra el uso de la resistividad eléctrica en la detección del secado prematuro [9]. La justificación del uso de la resistividad eléctrica dada en [9] permite proponer una metodología de ensayo para el control de curado en obra comparando valores de resistividad obtenidos en probetas de la misma amasada sometidas a situaciones de curado límites y situaciones de curado intermedio.

La dificultad asociada a las medidas de resistividad a corta edad radica en que el contenido de agua en la estructura

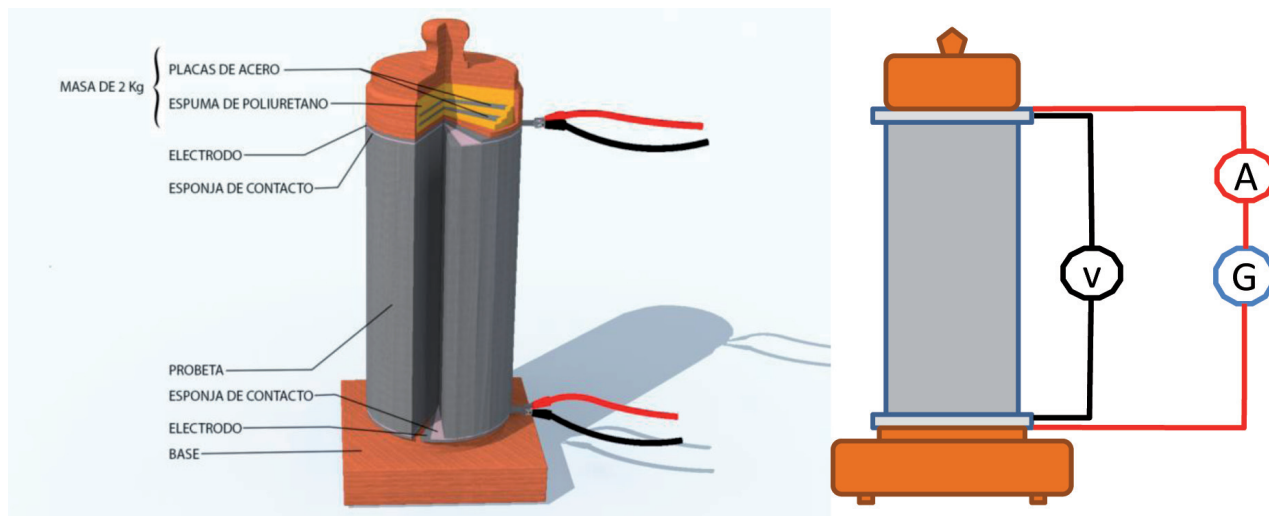


Fig. 4: Elementos para la medida directa de la resistividad y esquema de conexión

- 3) *Masa de 2 kg.* Se trata de un elemento que se sitúa sobre el electrodo superior de la probeta para presionar el electrodo contra la esponja de contacto y el hormigón. Este elemento consta de un cuerpo de madera con un tirador en la parte superior. En su interior se han introducido unas placas de acero hasta ajustar el peso total a 2 kg. Las placas de acero están recubiertas de espuma de poliuretano que garantizan la sujeción de las mismas y el aislamiento eléctrico.
- 4) *Base para colocar la probeta.* Se trata de una base de madera con un relieve cilíndrico sobre el que se coloca el electrodo. Este relieve cilíndrico tiene como objetivo facilitar la conexión eléctrica con el electrodo mediante pinzas de cocodrilo.
- 5) *Elementos Auxiliares.* Las fuentes de alimentación, cables y multímetro empleados son los descritos en el apartado 2.1 para el resistivímetro de cuatro puntas.

porosa del hormigón varía durante las fases de fraguado y endurecimiento. En estas fases transcurren de manera simultánea las reacciones químicas de hidratación, el desarrollo de la microestructura de poros y los fenómenos de transporte y evaporación del agua presente en la masa de hormigón. La evaporación del agua, al ser un fenómeno superficial, transcurre más rápidamente en aquellas geometrías donde la relación superficie/volumen es mayor [11]. También es más rápida la evaporación cuando las condiciones ambientales provocan un mayor gradiente de humedad entre la probeta y el exterior, es decir, en ambientes con mayor temperatura, menor humedad y mayor velocidad del viento. Entonces, ¿cómo se podría realizar el control del curado de elementos ejecutados en obra procedentes de una misma amasada que poseen diferentes geometrías y están sometidos a condiciones y/o ciclos ambientales específicos?

La metodología que se propone para el control de curado se basa en someter a dos probetas cilíndricas de 150x300 mm a situaciones antagónicas en cuanto al proceso de curado se

refiere. Una probeta se someterá a un curado sumergido en agua y otra se dejará sin curar en condiciones ambientales de obra. La medida de la resistividad en estas probetas permite establecer un límite superior dado por los valores de resistividad obtenidos en la probeta sin curar y un límite inferior que viene dado por el valor de la resistividad en la probeta en estado saturado. Estos dos valores delimitan todas las situaciones de curado intermedio para probetas de una misma amasada y geometría.

Para determinar el grado de curado del elemento de hormigón ejecutado se compara el valor de la resistividad eléctrica a los 28 días de una probeta de referencia sometida al ciclo ambiental y curado de obra con los valores de resistividad ob-

tenidos para las mismas probetas sometidas a situaciones de curado límites y situaciones de curado intermedio. En la Fig. (5) y en el apartado 3.3 se presenta un esquema y un ejemplo, respectivamente, de la aplicación de esta metodología.

3. RESULTADOS

3.1. VALIDACIÓN DEL RESISTIVÍMETRO DE CUATRO PUNTAS

A efectos de validación del equipo propuesto se determinan los valores de resistividad eléctrica obtenidos usando diferentes voltajes en corriente alterna y corriente continua sobre una regleta de calibrado comercial (*resipod-proceq*). La regleta dispone de dos valores de calibrado de $160\pm2\ \Omega\cdot m$ y $1200\pm24\ \Omega\cdot m$ con las sondas separadas 50 mm. En la Tabla 1 se muestran los resultados de la resistividad eléctrica calculada para cada potencial aplicado y tipo de corriente. Las medidas obtenidas en el calibrado son estables en un período corto de tiempo independientemente del voltaje y tipo de corriente aplicada.

3.2. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN PROBETAS DE HORMIGÓN EMPLEANDO DIFERENTES EQUIPOS

La fabricación y curado de las probetas cilíndricas de hormigón se realizó según la norma de ensayo [16]. La dosificación empelada por metro cúbico de hormigón para elaborar estas probetas fue de 350 kg de cemento CEM II/A(P) 32,5N, 182 litros de agua y 1.800 kg de áridos basálticos. Después de un curado sumergido en agua durante 28 días se midió la resistividad eléctrica por el método directo y por el método

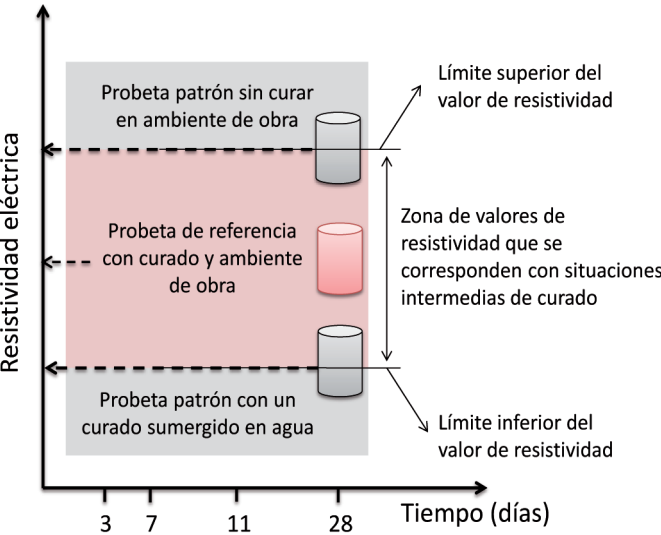


Fig. 5: Esquema de la metodología de ensayo para el control del curado

Voltaje aplicado (V)	Voltaje medido entre electrodos centrales (mV)	Intensidad de corriente por electrodos externos (µA)	P'_e (5) Resistividad (Ω·m)	Valor de calibrado (Ω·m)	Voltaje medido entre electrodos centrales (mV)	Intensidad de corriente por electrodos externos (µA)	P'_e (5) Resistividad (Ω·m)	Valor de calibrado (Ω·m)
9V CC ⁽¹⁾	233	459	159	160±2	27	6,9	1229	1200±24
9V CC ⁽²⁾	224	440	160		25	6,6	1190	
10V CC ⁽²⁾	249	489	160		27	7,3	1162	
10V CA ⁽³⁾	256	510	158		28	7,4	1189	
12V CC ⁽²⁾	299	587	160		34	8,8	1214	
12V CA ⁽³⁾	309	617	157		34	9,0	1187	
14V CC ⁽²⁾	348	684	160		39	10,3	1190	
14V CA ⁽³⁾	361	721	157		40	10,5	1197	
16V CC ⁽²⁾	397	782	159		45	11,8	1198	
16V CA ⁽³⁾	414	825	158		46	12,2	1185	
CA ⁽⁴⁾	N.A.	200	160		N.A.	20	1190	

Tabla 1: Valores de resistividad obtenidos con el resistivímetro sobre la regla de calibrado (*resipod-proceq*) [N.A.: dato no facilitado en el equipo comercial. (1) Pila 6LR61 Panasonic 9 V CC. (2) Lendher DCPower SUPPLY IMHY3003D 0-30 V CC. (3) TCA-20 salida 10/12/14/16 V 1200 mA CA. (4) Resistivímetro comercial Resipod. (5) $\rho'_e = \chi \cdot \rho_e = 2\pi a \cdot V/I$]

Medidas con probeta de hormigón y esponjas	
Voltaje medido (probeta y esponjas) = $V_{e+sp} =$	10,6 V
Intensidad medida (probeta + esponjas) = $I_{e+sp} =$	4 mA
Resistencia eléctrica calculada (probeta + esponjas) = $R_{e+sp} = V_{e+sp} / I_{e+sp} =$	2614 Ω
Medidas con sólo las esponjas	
Voltaje (sólo esponjas) = $V_{sp} =$	10,2 V
Intensidad (sólo esponjas) = $I_{sp} =$	368 mA
Resistencia eléctrica calculada (sólo esponjas) = $R_{sp} = V_{sp} / I_{sp} =$	28 Ω
Cálculo de resistencia y resistividad eléctrica de la probeta	
Resistencia eléctrica calculada (probeta) = $R_e = R_{e+sp} - R_{sp} =$	2586 Ω
Sección transversal de la probeta cilíndrica = $S =$	0,0177 m ²
Longitud de la probeta cilíndrica = $L =$	0,3 m
Resistividad eléctrica = $\rho_e = \left(\frac{S}{L}\right) \cdot (R_e) = 153 \Omega \cdot m$	

Tabla 2: Resultados y cálculo de resistividad eléctrica de la probeta de hormigón por el método directo [13]

de las 4 puntas. Para la medida directa de la resistividad eléctrica se emplearon esponjas de paño de algodón con una resistencia inferior a 100 Ω . Las esponjas de poliuretano y esponjas de polietileno reticulado superaron en más del doble el valor de la resistencia recomendada en [13] por lo que fueron descartadas para su uso en la medida directa. En la Tabla 2 se muestran los valores de intensidad, voltaje y el cálculo de la resistencia y resistividad eléctrica.

Para la medida por el método indirecto o de las 4 puntas se emplearon dos equipos: un equipo comercial (*resipod-proceq*) y el equipo propuesto con la fuente de alimentación TCA-20 y salida de 10 V en corriente alterna. Los resultados obtenidos con ambos equi-

Resistivímetro Propuesto (Medias realizadas empelando la fuente de alimentación TCA-20 con salida de 10 V en CA)					Resistivímetro Comercial (Resipod-Proceq)		
Valores medidos cada 60°	Voltaje (mV)	Intensidad de corriente (μA)	Resistividad (Ω·m) $P'_e=2\pi a(V/I)$	$\sigma^{(1)}$	Valores medidos cada 60°	Resistividad (Ω·m) $P'_e^{(2)}$	$\sigma^{(1)}$
1	208	270	242	7	1	231	8
2	307	380	254		2	245	
3	251	320	246		3	250	
4	332	420	248		4	235	
5	397	480	260		5	231	
6	281	360	245		6	244	
Valor medio de $P'_e = 249 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$					Valor medio de $P'_e = 239 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$		
$\rho_e = \left(\frac{\rho'_e}{x}\right) = 151 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$					$\rho_e = \left(\frac{\rho'_e}{x}\right) = 145 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$		

⁽¹⁾ Desviación estándar: $\sigma = \sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 / n}$ donde $n=6$. ⁽²⁾ Valor que facilita el equipo comercial.

Tabla 3: Resultados y cálculo de resistividad eléctrica de la probeta de hormigón por el método indirecto [14]

Días	Resistividad eléctrica($\Omega \cdot m$)									
	Probeta sin curar		Probeta 3 días de curado		Probeta 7 días de curado		Probeta 11 días de curado		Probeta 28 días de curado	
	$P'_e^{(1)}$	σ	$P'_e^{(1)}$	σ	$P'_e^{(1)}$	σ	$P'_e^{(1)}$	σ	$P'_e^{(2)}$	σ
1	-		-		-		-		14	0
3	54	1	-		-		-		27	1
7	237	12	145	5	-		-		109	2
11	339	7	213	8	151	4	-		146	3
20	643	30	394	13	284	14	271	12	231	7
28	936	34	569	19	421	13	421	17	297	9

⁽¹⁾ Medida en estado seco ⁽²⁾ Medida en estado saturado

Tabla 4: Resultados de resistividad eléctrica en probetas con diferentes tiempos de curado

pos se muestran en la Tabla 3. En el cálculo de los valores de resistividad eléctrica se ha empleado un factor de forma $\chi=1,65$ [14]. Tanto en el equipo propuesto como en el comercial la separación entre puntas “a” es de 50 mm.

3.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para la aplicación de la metodología propuesta se realiza una nueva amasada con la dosificación y componentes del hormigón que se indicó en el apartado 3.2. En la Tabla 4 se muestran los resultados de resistividad en función de tiempo obtenidos en las probetas sometidas a diferentes condiciones de curado.

La resistividad fue medida en probetas sin saturar previamente salvo las medidas realizadas sobre la probeta curada 28 días cuyo estado durante la medida fue saturado. Estos valores obtenidos delimitan todas las situaciones de curado intermedio para probetas de una misma amasada y geometría, y se corresponde con la zona sombreada de la Fig. (6). Como ejemplo se sitúan los valores experimentales de resistividad obtenidos en probetas con 3, 7 y 11 días de curado. Se observa que los valores de resistividad obtenidos en las probetas curadas durante 7 y 11 días son prácticamente equivalentes, o lo que es lo mismo, el proceso de curado entre el día 7 y 11 no supone una mejora significativa en el hormigón debido a este proceso.

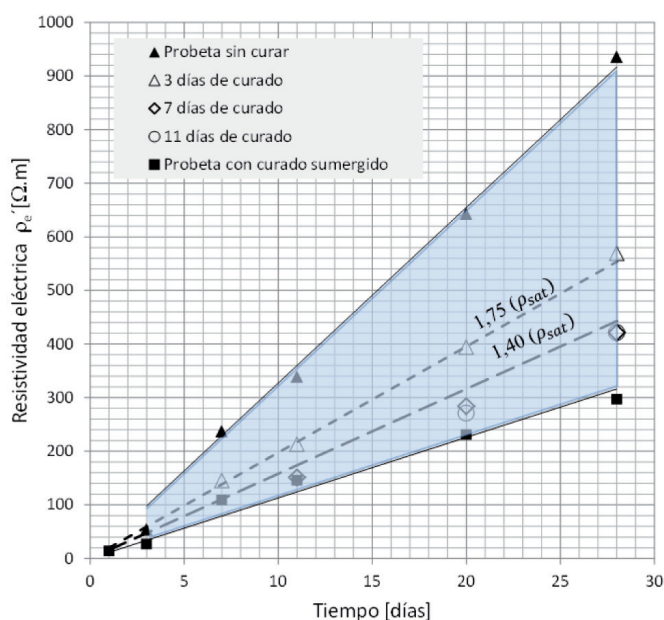


Fig. 6: Representación de las zonas de curados límite y curados intermedios

Las líneas discontinuas de la Fig. (6) representan valores de resistividad de 1,40 y 1,75 veces superior a los valores de resistividad de la probeta mantenida en un curado sumergido en agua. Estas líneas se corresponden con valores de resistividad obtenidos en las probetas con 3 y 7 días de curado. La referencia de la resistividad a los 3, 7 y 11 días de curado permite establecer la equivalencia del grado de curado de una probeta sometida a las mismas condiciones que el elemento de hormigón ejecutado en obra. Así, por ejemplo, una resistivi-

dad medida a los 28 días de 440 $\Omega.m$ sobre la probeta de referencia depositada en obra equivaldría a un curado sumergido en agua de 7 días. De esta forma se dispone de una referencia que permitiría en cada caso validar el proceso de curado seguido sobre los elementos de hormigón ejecutados. Los valores límite de la zona sin curar y curados intermedios dependerán de la composición del hormigón y del ciclo ambiental específico al que estén sometidas las probetas situadas en obra después de finalizar su curado, si es el caso.

Los resultados presentados se corresponden con un ejemplo. Sin embargo el método tratado para el control del curado es aplicable a cualquier dosificación y tipología de materiales. Para ello es necesario disponer de probetas con esa dosificación y materiales que permitan delimitar las situaciones de curado límite y curados intermedios en las condiciones ambientales de cada obra y una probeta de referencia sometida a condiciones ambientales y curado de esa misma obra. Esto permite establecer la validez independientemente de la dosificación y materiales ya que la composición del hormigón es la misma en todas ellas.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan referencias [1-12] que permiten inferir la importancia creciente de la medida de la resistividad eléctrica como parámetro indicador de las características del hormigón. Por ello se ha presentado un procedimiento para la construcción de un resistímetro de cuatro puntas apto para realizar medidas de resistividad eléctrica en el hormigón. Se detallan los materiales y equipos auxiliares necesarios para su funcionamiento así como un esquema sencillo para su fabricación y montaje. Se aportan también valores experimentales de intensidad de corriente y voltaje obtenidos en la medida directa e indirecta de la resistividad eléctrica de un hormigón. Disponer de estos valores permite establecer referencias durante la medida para conocer el orden de magnitud de la corriente que circulando por el hormigón aporta datos fiables de la resistividad.

En la validación del equipo propuesto se obtuvieron valores de resistividad acordes a la precisión de la regla de calibrado: $1200 \pm 24 \Omega.m$ y $160 \pm 2 \Omega.m$. Sólo con el empleo de 12V en AC se alcanzó una resistividad de 1 $\Omega.m$ inferior al de horquilla de la regla de calibrado para la resistividad de $160 \pm 2 \Omega.m$. No existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con corriente continua y con corriente alterna. Sin embargo no se recomienda el uso de corriente continua para la medida de la resistividad del hormigón ya que puede implicar errores debidos a la polarización del electrodo [15]. En las normas [13-14] no se advierte de este fenómeno pero se recomienda el uso de corriente alterna en estas determinaciones.

En cuanto a la medida de la resistividad en probetas de hormigón, la diferencia entre los valores de resistividad obtenidos con el equipo comercial y con el propuesto con respecto a la medida directa (método de referencia) fue del 5,2% y 1,3% respectivamente. Estas diferencias son inferiores al error porcentual (7%) entre el mayor y menor valor de resistividad obtenido en las 6 medidas realizadas cada 60° en una misma probeta con cada equipo. Es decir, el grado de reproducibili-

dad de los resultados al emplear los distintos métodos (directo e indirecto) es equivalente a las diferencias obtenidas midiendo con un mismo equipo de 4 puntas en zonas diferentes de la probeta.

De los resultados obtenidos se aprecia que los valores de corriente que circulan por el hormigón en la medida directa de la resistividad son muy inferiores al mínimo de 30mA que recomienda la norma de ensayo [13]. No se han encontrado referencias bibliográficas que presenten datos de corriente y voltaje. En todos los casos se presenta el dato de resistividad eléctrica del hormigón ya calculado. Por ello no ha sido posible comprobar si en la obtención de la medida de la resistividad facilitada en esas referencias se logra la circulación de al menos 30 mA. Si se ha podido comprobar que en el método de cuatro puntas la máxima corriente que circula por el hormigón en el equipo comercial es de 200 μ A y que este valor tiene un orden de magnitud similar al de la máxima corriente que circula al medir con el equipo propuesto.

Por último, los resultados presentados en el ejemplo de aplicación permiten comprobar la validez del procedimiento propuesto para el control del proceso de curado del hormigón. Este control se realiza con medidas sobre las probetas sin necesidad de una saturación previa, si bien se requiere la elaboración de al menos 5 probetas para poder establecer referencias en el curado. Con esta metodología no se pretende obtener una correspondencia entre los datos de resistividad de las probetas y los datos de resistividad en los diferentes elementos de hormigón ejecutados en la obra. Lo que permite esta metodología es comprobar si el proceso de curado se ha realizado adecuadamente. Para ello se comparan los resultados de resistividad de probetas curadas según el proceso de curado llevado en la obra, con valores de resistividad de probetas curadas sumergidas en agua durante diferentes períodos y probetas sin curar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D'Andrea R. "Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica". Director: Andrade-Perdrix C, Albajar-Molera, L. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Julio 2010.
- [2] Morris W, Moreno El, Sagüés AA. "Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe", *Cement and Concrete Research*. 1996. Vol. 26-12, P. 1779-1787.
- [3] Hornbostel K, Larsen CK, Geiker MR. "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review", *Cement & Concrete Composites*. 2013. Vol. 39, P.60-72.
- [4] Ramezaniapour AA, Pilvar A, Mahdikhani M, et al. "Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength", *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, P. 2472-2479.
- [5] Saleem M, Shameem M, Hussain SE, et al. "Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete", *Construction and Building Materials*. 1996. Vol. 10-3, P. 209-214.
- [6] Zongjin L, Lianzhen X, Xiaosheng W. "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement", *Journal of materials in civil engineering*. 2007. Vol. 19-5, P. 423-427. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200719:5423>)
- [7] Cao J, Chung DDL. "Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement", *Cement and Concrete Research*. 2002, Vol. 32-10, P. 1657-1661.
- [8] Morris W, Vico A, Vázquez M. "Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements", *Electrochimica Acta*. 2004. Vol. 49, P. 4447-4453.
- [9] Fernández-Luco L. "Importancia del curado en la calidad del hormigón de recubrimiento. Parte II: métodos experimentales para identificar o prevenir el curado deficiente", *Cemento y Hormigón*. 2009. Vol. 926, P. 30-40.
- [10] Andrade C, D'Andrea R, López JC, et al. "Use of electrical resistivity as complementary tool for controlling the concrete production". Congreso Internacional de Química del Cemento. Madrid, 2011. Disponible en web: <http://www.galaicontrol.com/investigacion.pdf>
- [11] Ferreira RM, Jalali S. "Quality control based on electrical resistivity measurements" *European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures*. Helsinki, 2006. Disponible en web: <http://hdl.handle.net/1822/5888>
- [12] Andrade C, Prieto M, Tanner P, et al. "Testing and modelling chloride penetration into concrete" *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 39, P. 9-18.
- [13] AENOR. UNE 83988-1. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia). Madrid: AENOR, 2008
- [14] AENOR. UNE 83988-2. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid: AENOR, 2008
- [15] Polder, RB. "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation", *Construction and Building Materials*. 2001. Vol.15-2-3, P. 125-131.
- [16] AENOR. UNE-EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. Madrid: AENOR, 2009