

Determinación de la Porosidad de un Hormigón Mediante Medidas Eléctricas

Eduardo Rodrigo Palenque Vidaurre¹

epalenque@fiumsa.edu.bo

<https://orcid.org/0009-0008-8477-9483>

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz - Bolivia

Edwin Valero Choque

edvalero14@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-6510-4467>

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz - Bolivia

RESUMEN

En este trabajo se presenta un método alternativo para la medida de la porosidad de los hormigones ya consolidados, basado en medidas eléctricas. Se aprovecha las relaciones conocidas entre la resistencia mecánica y la porosidad; además de la nueva propuesta de estandarizar la medida de la resistencia mecánica a través de la medida de resistividad eléctrica. Trabajando con los conceptos teóricos y realizando aproximaciones en las ecuaciones base, se presenta una fórmula que relaciona la resistividad eléctrica y la porosidad.

Palabras clave: *hormigones; resistividad eléctrica; porosidad; resistencia mecánica.*

¹ Autor principal.

Correspondencia: epalenque@fiumsa.edu.bo

Determination of the Porosity of a Concrete by Electrical Measurements

ABSTRACT

Here, we present a new alternative method for the porosity measurement of consolidated concretes, based on electric measurements. We use the well-known relations between the concrete's compressive strength and its porosity; and the newly proposed standardization method for find the compressive strength. From the theoretical concepts and with approximations in the basic equations, here we present a direct relation between the electric resistivity and the porosity.

Keywords: concrete; electric resistivity; porosity; compressive strength.

Artículo recibido 15 setiembre 2023
Aceptado para publicación: 23 octubre 2023

INTRODUCCIÓN

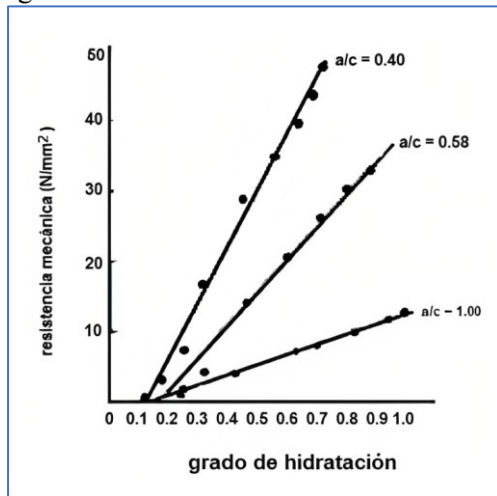
En todos los libros de ingeniería civil y técnicas de construcción se utilizan las proporciones de los componentes de la mezcla de los hormigones (cemento, agua, arena y grava) para determinar el tipo de hormigón que se quiere obtener o estudiar. Esas proporciones se denominan como la “dosificación” del hormigón, y los ingenieros se refieren sistemáticamente al “método de Shilton para la dosificación”, que sirve para determinar la dosificación adecuada de acuerdo al tipo de trabajo, o demanda de esfuerzo, para el cual se diseña el hormigón (Bhavikatti, 2010). La resistencia mecánica de los hormigones a la compresión uniaxial es la utilizada para su clasificación, y se le asigna una escala numérica conocida como el “grado del hormigón” (Dugall, 2008).

Históricamente, y sobre la base empírica, se considera que el cemento de los hormigones está completamente hidratado después de 28 días, ya que, a partir de esa edad, resulta difícil medir los incrementos tanto en la resistencia mecánica como en la dureza. Por tanto, los constructores han adoptado ese tiempo como la base del factor de edad. A los 7 días de la mezcla, el hormigón tiene entre 60 a 65% de la resistencia nominal medida al mes (28 días); pero después sigue ganando resistencia, de acuerdo a una proporción creciente: a los 3 meses tiene un “factor de edad” de 1.10; a los 6 meses de 1.15, al año de 1.20, y mantiene ese rango de valores durante varias décadas. (Bhavikatti, 2010).

Por otro lado, dentro de los rangos posibles de la dosificación para obtener hormigones con una resistencia mecánica útil para las construcciones comunes, la relación agua - cemento es la variable fundamental para determinar las propiedades del hormigón una vez que está consolidado. La dependencia de la resistencia mecánica con la relación (a/c) fue sistematizada por primera vez por Duff Adams en 1918 (Roy e Idorn, 1993), e indica que la resistencia mecánica (σ) se puede escribir como $\sigma = A/B^r$ donde A, B son constantes que dependen del tipo de cemento, y el historial del hormigón analizado (edad, tipo de mezclado, curado, tipo de agregados, etc.), y r es la relación (a/c). Es evidente que mientras más agua se tenga en la mezcla, se favorecen las reacciones de hidratación, pero también existe un umbral para la concentración de agua, que cuando se sobrepasa, la mezcla se torna “pobre” y con resistencia tan baja que no cumple con los estándares requeridos por los constructores.

Figura 1

Relación entre la resistencia mecánica y el grado de hidratación, como función de la relación agua/cemento.



Adaptado de Roy e Idorn (1993).

También se conoce que existe una relación fundamental y directa entre la resistencia mecánica y la compacidad de un material (Wulff et al., 1968), lo que es especialmente notorio en materiales porosos como los hormigones. Desde el punto de vista de los materiales, tal relación resulta obvia, ya que mientras más compacta sea una sustancia, más fácilmente transmitirá los esfuerzos entre un grupo de átomos o moléculas y el siguiente. Como ocurre que, técnicamente, es más simple medir el volumen no ocupado que la compacidad, y como son inversos uno del otro; se suele referir las propiedades en términos de la “porosidad” del material. La relación entre la resistencia mecánica de un material homogéneo, y el grado de porosidad que tiene se puede describir por: $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-kp}$, donde σ es la resistencia del material analizado, σ_0 es la resistencia del material si tuviese una porosidad nula (valor obtenido por extrapolación), p es la porosidad del material, k es una constante. Se destaca que esta relación es válida para una gran cantidad de materiales, no solamente para los hormigones o cementos. Esta relación matemática puede ser expresada de diferente manera, con la consideración de que la función exponencial se puede aproximar a un valor polinómico, del tipo $\sigma_c = C \cdot x^3$, donde σ_c es el valor de la resistencia característica, o sea el valor de resistencia mecánica medida a los 28 días, C es el valor de esa resistencia extrapolada a porosidad nula, x es el valor proporcional del espacio ocupado por la parte sólida. Entre el parámetro x y la porosidad p se da la relación $x + p = 1$; de donde $x = 1 - p$. Esta relación funciona muy bien para morteros y sistemas similares, pero en los hormigones aparecen desviaciones de este comportamiento debido a la presencia de microfisuras (o microgrietas) en la zona

de interfase entre los agregados gruesos (grava o sustituyentes) y la matriz de cemento. Por tanto, la relación cúbica, conocida también como la “ley de Powers” se considera válida sólo para hormigones de baja porosidad. La porosidad está también en relación inversa con la densidad, y todas las otras propiedades que dependen de ésta, como la capacidad de transmitir sonido o calor, o la de absorber radiaciones ionizantes; por tanto, además de los estudios experimentales (p. ej. Winslow et al., 1994), existen aproximaciones teóricas (p.ej. Garboczi y Bentz, 1996), que están basadas en los modelos de empaquetamiento de partículas, al mismo tiempo que consideran la distribución de la fase líquida, considerando que el agua de la argamasas se transforma en gel y luego solidifica.

Uno de los efectos principales de la porosidad de los hormigones reside en que domina el fenómeno de difusión de líquidos y gases dentro del material. Tanto la cantidad de poros (la fracción del volumen que ocupan) como su distribución (topología de los conductos capilares interconectados) determinan la capacidad del hormigón para resistir ataques químicos, o mantener la integridad ante cargas hidráulicas lo que generalmente se explica a través de la difusividad iónica. El modelo básico (Garboczi y Bentz, 1996) considera que los iones sólo pueden moverse a través de la matriz de cemento; y los gases, por los poros que están interconectados o tan próximos que pueden darse fenómenos de tipo túnel en sus paredes. El parámetro dominante entonces es la porosidad, y la difusividad se calcula mediante la ecuación (1):

$$\frac{D}{D_0} = H \cdot ((\phi - 0.18) \cdot 0.18(\phi - 0.18)^2 + 0.07\phi^2 + 0.001) \quad (1)$$

Donde D es difusividad efectiva iónica, en el caso de saturación por agua; D_0 es la difusividad de cada especie de ión que se calcula dentro del agua no confinada, $H(x)$ es la función escalón de Heaviside, ϕ es la porosidad (expresada como fracción del volumen). Con esta ecuación se puede encontrar la velocidad con la que los iones Ca^{+2} se mueven dentro del gel $C - S - H$ hasta el final del periodo de fraguado; o bien cómo será la respuesta de un hormigón ya consolidado ante el intercambio de dióxido de carbono con la atmósfera (Garboczi y Bentz, 1996), lo que técnicamente se denomina “carbonatación del hormigón” y es una de las causas del debilitamiento de hormigones “antiguos”. La porosidad, como parámetro de control de la difusividad, está también relacionada con las propiedades eléctricas, ya que puede usarse para medir la edad de los hormigones (Mosavi et al., 2020) e inclusive determinar la

cantidad de aditivos empleados. A partir de los cálculos teóricos, sobre la base de la teoría de Fick de la difusión, la variación temporal del coeficiente de difusión (D_t), expresada como:

$$D_t = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (2)$$

Donde el coeficiente de difusión D_t en el tiempo t se expresa en términos del coeficiente a los 28 días (D_{28}) medido en el tiempo (t_{28}) a los 28 días desde la mezcla, m es la constante de decaimiento (también llamada el factor de edad), que determina los cambios de las propiedades del hormigón en el tiempo.

Como un caso especial de los fenómenos de difusión dentro de los hormigones está el transporte de los iones Ca^{+2} a través del material, lo que genera una serie de corrientes eléctricas. Otros autores, como Malhotra y Carino (1991) afirman que la porosidad ϕ se puede calcular mediante la ecuación:

$$\phi = [(1 - \phi_c) \cdot F^{-1/t}] \cdot \left(\frac{M^{\frac{1}{t}} - F^{\frac{1}{t}}}{M^{\frac{1}{t}} - 1} \right) \quad (3)$$

Donde F es el factor de formación, ϕ_c es la porosidad umbral por debajo de la cual la fase de los poros capilares se separa de las otras, M es el factor de magnificación entre ρ_1 la resistividad del gel $C - S - H$ y la resistividad ρ_0 de la fase de la solución en los poros. Con los valores correspondientes a los cementos estándar del tipo Portland, la ecuación se reduce a:

$$\phi = [(1 - 0.18) \cdot F^{-1/2}] \cdot \left(\frac{400^{\frac{1}{2}} - F^{\frac{1}{2}}}{400^{\frac{1}{2}} - 1} \right) \quad (4)$$

Que es una expresión de correlación de la porosidad y el “factor de formación” F . Si se somete a las muestras de hormigón a una diferencia de voltaje, esas corrientes eléctricas (producidas por los iones Ca^{+2}) determinan la resistencia eléctrica de la muestra, y tras estandarizarlas por los factores geométricos, se puede obtener la resistividad eléctrica de las muestras (Andrade y D’Andrea, 2011). Para realizar el empalme con la teoría, se supone que, si se parte de una solución infinitamente diluida, se tiene un coeficiente D_0 que al ser comparado con el coeficiente de difusividad a un tiempo dado, nos da el factor de formación F :

$$F = \left(\frac{D_0}{D} \right) = \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right) \quad (5)$$

que también indica los cambios en las propiedades eléctricas de los hormigones, a través de la resistividad ρ , en referencia a un hipotético hormigón con resistividad ideal ρ_0 . Los valores de la

resistividad eléctrica se pueden obtener en forma sistemática a lo largo de la vida del elemento de hormigón considerado en cada estudio, ya que se le puede aplicar un Ensayo No Destructivo (END), del tipo del “método de Wenner” u otro similar. En los estudios previos del Laboratorio de Materia Condensada (Palenque et al., 2020), se ha determinado la relación matemática entre la relación de la resistencia mecánica σ (en MPa) como función de la resistividad eléctrica ρ (en Ωm) y la relación agua a cemento (a/c), que se expresa como:

$$\sigma = (0.52 \pm 0.03)\rho - (50 \pm 2) \left(\frac{a}{c}\right) + (1.8 \pm 0.1) \quad (6)$$

Esta relación es una correlación lineal explícita entre la resistencia mecánica σ como función de la relación agua / cemento (a/c) y la resistividad eléctrica ρ (determinada mediante el método de Wenner). La relación entre la resistencia mecánica σ y la relación agua / cemento (a/c) corrobora la ley de Adams; cuantificando así el factor de proporcionalidad A, citado líneas arriba. Por otro lado, si se invierte la relación, se puede colocar la relación agua cemento (a/c) como función de la resistencia mecánica σ y de la resistividad eléctrica; por lo que su aplicación en ingeniería forense viene a dar un método para encontrar la proporción original de la mezcla de la argamasa fresca, a partir de Ensayos No Destructivos (esclerometría y método Wenner) del hormigón de un determinado elemento estructural en una obra ya consolidada.

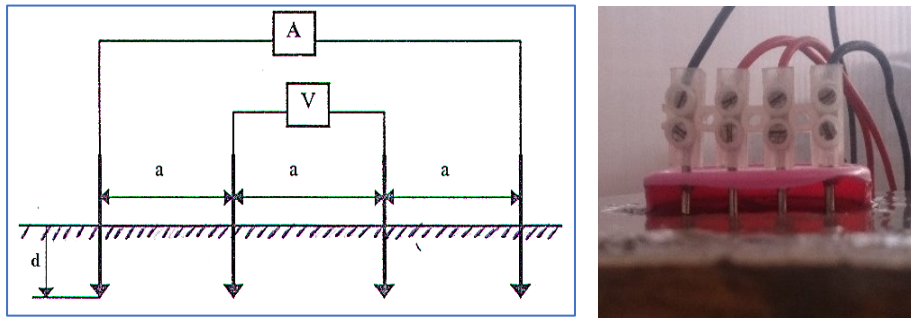
Un tercer aspecto, es que si se conoce (o supone conocida) la relación agua cemento (a/c), lo cual es común ya que los constructores utilizan la relación ($a/c = 0.5$) para hormigones H18 a H20, que son los más utilizados en edificaciones civiles; la relación entre la resistencia mecánica σ y la resistividad eléctrica pueden relacionarse directamente con la difusividad, a través del “factor de formación F ” ya nombrado.

METODOLOGÍA

Inicialmente se realizaron medidas de resistividad eléctrica sobre muestras de hormigones de las distintas marcas que se consiguen el mercado local, todas con el mismo tipo de dosificación para obtener un hormigón del tipo H21. Las muestras fueron preparadas en las instalaciones del Laboratorio de Materia Condensada, IIF – UMSA; donde se mantuvieron en condiciones ambientales estables, con variaciones térmicas diarias (curado en seco al ambiente), y a las cuales se les realizaron las medidas de resistividad mediante el método de Wenner (de cuatro puntas), como se observa en la figura 2:

Figura 2

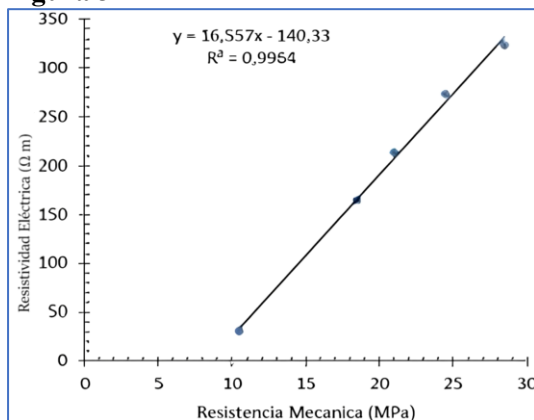
A la derecha, esquema general del sistema Wenner “de cuatro puntas”, con electrodos separados a una distancia a , y con una fracción d incrustada dentro del material. A la izquierda, detalle de los electrodos.



Adaptado de Valero (2016).

En los experimentos previos (Valero, 2016) con otras dosificaciones ($a/c = 0.45, 0.40$ y 0.58), se obtuvo resultados con comportamientos similares, variando únicamente en el valor máximo al cual tienden las curvas. Los ajustes empíricos de curvas a funciones del tipo $y = A \cdot \ln(x) + B$ dan unos índices de correlación mayores a $R = 0.97$ tanto para la resistividad eléctrica, como para la resistencia mecánica. Al realizar una correlación entre ambas variables medidas, se obtuvo una correlación lineal casi perfecta, como se observa en la figura 3:

Figura 3



Ajuste de correlación lineal entre la resistividad eléctrica y la resistencia mecánica para muestras de morteros de cemento Portland con ($a/c = 0.50$) durante la fase sólida hasta el estándar de los 28 días (Quispe Colque, 2014). Se destaca el valor del coeficiente de regresión $R^2 = 0.9964$

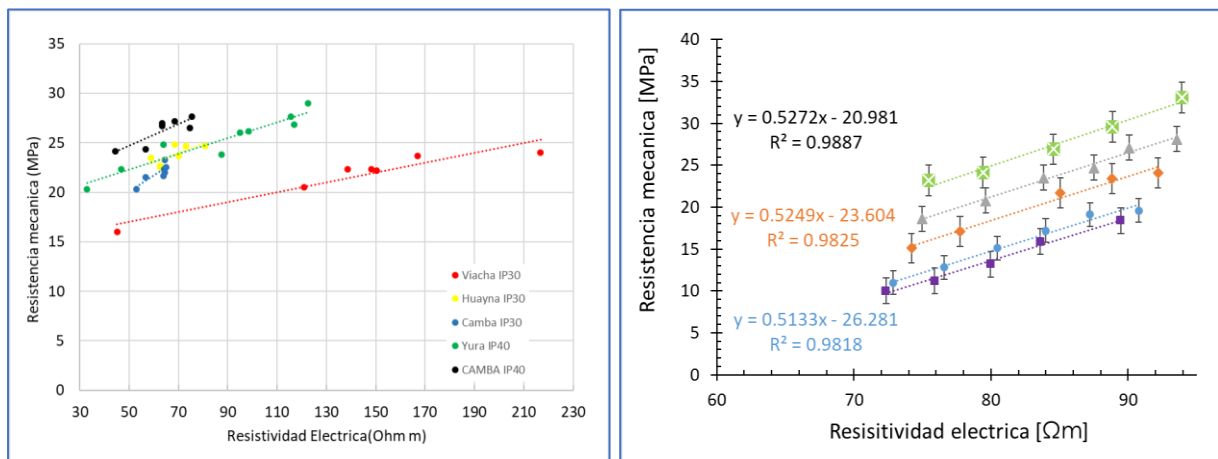
Al realizar el mismo análisis de correlación para las muestras con otras dosificaciones, con distintas razones agua a cemento ($a/c = 0.58, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40$), lo que se obtuvo es una familia de rectas prácticamente paralelas, lo que debe interpretarse que, al tener la misma pendiente, el coeficiente A de las regresiones de la ecuación ($y = A \cdot \ln(x) + B$) es independiente de la dosificación y sólo depende del tipo de cemento y del historial de la muestra.

Posteriormente, se realizó un estudio de compacidad con el tomógrafo ultrasónico (Palenque, 2020), para determinar la homogeneidad de las muestras. La lógica detrás del análisis por ultrasonido reside en el hecho que, si el material bajo ensayo es homogéneo y compacto, la onda inicial atraviesa la muestra, llega a la pared del fondo, rebota y retorna con la misma forma, sólo atenuada por la absorción. Sin embargo, si el material no es homogéneo, la dispersión en pequeñas regiones o discontinuidades causarían deformaciones en la onda de retorno. Si se conoce la geometría, y por tanto, el camino recorrido por las ondas ultrasónicas dentro del hormigón, se puede (por una deconvolución) encontrar el factor de inhomogeneidad del material. En el caso de los morteros de hormigón, ese factor está directamente relacionado con la porosidad. Por tanto, la medida de atenuación de las señales de ultrasonido, dan una medida de la porosidad, además de medir la resistencia mecánica a través de la relación de Rayleigh. En forma paralela, también se tomaron medidas de la resistencia mecánica a través del método esclerométrico, utilizando el “martillo Schmidt”, que también es un END.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al cruzar la información obtenida por los diferentes métodos, se obtuvo una serie de datos que se muestran en la figura 4:

Figura 4

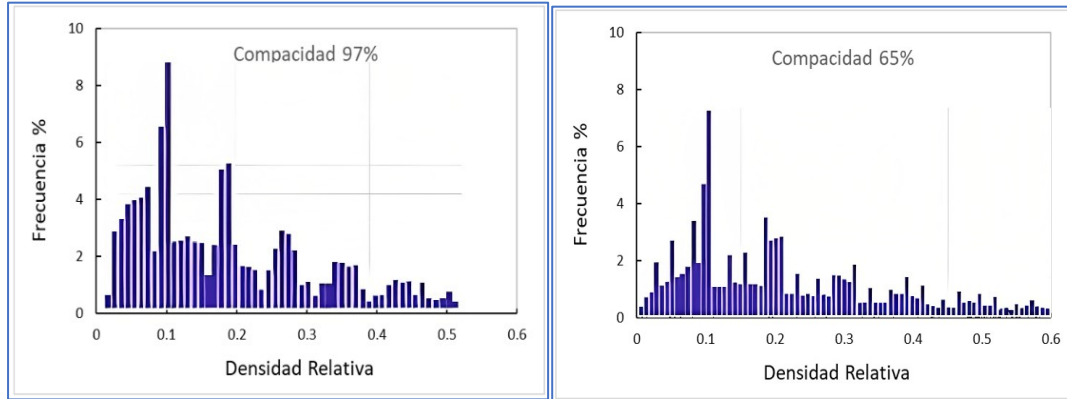


A la derecha, el gráfico de resistencia mecánica (σ) como función de la resistividad eléctrica (ρ) para diferentes marcas comerciales de cemento Portland. A la izquierda, el mismo gráfico para diferentes relaciones agua a cemento (a/c) para un cemento en particular.

A partir de las medidas de ultrasonido, se pueden obtener los histogramas de las diferentes medidas sobre cada muestra, que no son completamente uniformes. En un material totalmente homogéneo, los histogramas obedecerían a una distribución de Maxwell – Boltzmann, con una curva envolvente completamente suave. Las diferencias se utilizan para calcular la compacidad, y por diferencia, los

espacios no ocupados. Bajo los modelos considerados anteriormente (Garboczi y Bentz, 1996, Mosavi et al., 2020, etc.) esos espacios libres se pueden contabilizar como el espacio ocupado por los poros del hormigón, o sea, el parámetro ϕ de las ecuaciones citadas.

Figura 5



Histogramas obtenidos con el conteo de los pulsos de retorno de los ensayos por ultrasonido para muestras cúbicas de hormigones. A la derecha, un hormigón de alta compacidad (97%); a la izquierda, un hormigón de baja compacidad (65%).

CONCLUSIONES

Con los datos correspondientes a las medidas por ultrasonido, como por las obtenidas por esclerometría se puede obtener una aproximación de la porosidad, con un margen amplio, de cerca del 15% de incertidumbre. Sin embargo, las medidas de la resistividad eléctrica, que también son un END, resultan ser mucho más precisas. Calculando primero el factor de formación F como cociente de la resistividad ideal y la medida, se tiene un valor que, al ser introducido en la ecuación citada por Malhorta y Carino (1991) nos da directamente el valor de la porosidad. Alternativamente, se puede trabajar un poco la ecuación de Garboczi y Bentz (1996) para despejar el valor de ϕ .

Por tanto, se concluye que aquí se ha presentado un nuevo método para medir la porosidad mediante métodos de END, y necesidad de llevar las muestras al laboratorio; lo que tiene evidentes ventajas cuando se trata de obras de construcción alejadas, como puentes o caminos.

LISTA DE REFERENCIAS

- Andrade, C. y D'Andrea, R. (2011), "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad" en ALCONPAT, Vol.1, N°2, p. 93 – 101.
- Bhavikatti, S.S. , (2010), "Basic Civil Engineering", New Age International Ltd. Publishers.
- Dugall, S.K. (2008), "Building Materials" 3d Ed., New Age International Limited, Publishers, ISBN (13): 978-81-224-2975-6.

- Garboczi, E.J. y Bentz, D.P. (1996), “Modelling of the microstructure and transport properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol.10, p. 293 – 300, DOI: 10.1016/0950-0618(94) 00019- 0.
- Malhotra V.M. y Carino N.J. , (1991), “Handbook on Non Destructive Testing of Concrete”, CRC Press, Boca Ratón, Florida.
- Mosavi, H. et al. (2020), “Use of electrical test method on determination aging factor of concrete incorporating supplementary cementitious materials”, en J.F: Martirena – Hernandez et al, editors, *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*, RILEM Bookseries N°22.
- Palenque, E. R. (2020), “Teoría del Ultrasonido en hormigones”, en prensa.
- Palenque, E.R. et al. (2020), “La resistencia eléctrica como Ensayo No Destructivo predictivo para la resistencia mecánica de los hormigones”, en prensa.
- Roy, D.M. e Idorn, G.M. (1993), “Concrete microstructure”, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- Winslow, D.N. et al. (1994), “Percolation and pore structure in mortars and concrete”, *Cement and Concrete Research*, vol.24, p. 25 – 37.