

The use of electrical resistivity measurement to estimate compressive strength in precast concrete processes.

Melina Scasserra, MSc¹ , Humberto Balzamo, Ing.¹ , Luis Fernandez Luco, PhD¹ .

¹ Universidad de Buenos Aires, Argentina, mscasserra@fi.uba.ar, hbalzamo@fi.uba.ar, lfdezluco@fi.uba.ar.

Abstract: *In a precast concrete process, it is common to verify if the precast element has the necessary strength, for prestress release or demoulding, by testing concrete cylinders cured at equivalent conditions. This technique requires a considerable number of work hours, what makes the process inefficient. Considering that concrete electrical conductivity measurements can be used to estimate the pore structure of concrete, this study proposes the use of this technique to estimate concrete compressive strength, analysing its application with variable temperature. The use of non-destructive testing methods, as a suitable substitute of traditional techniques, considerably simplifies and modernizes the industrial process. This paper presents preliminary tests aimed at obtaining correlation graphs between concrete compressive strength and electrical conductivity, considering factory conditions. The correlation is good, a tendency curve approximation by logarithmic function was used with an R^2 great than 0,99, but it is important to use correction factors to consider the shape and size of the element and the temperature of measurement. Moreover, the percolation condition of water must be high enough to obtain comparable results.*

Keywords: *Precast concrete, manufacturing, compressive strength, electrical resistivity, non-destructive methods.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

La resistividad eléctrica como indicador de la resistencia a compresión en procesos de prefabricación con hormigón

Melina Scasserra, MSc¹, Humberto Balzamo, Ing.¹, Luis Fernandez Luco, PhD¹.

¹ Universidad de Buenos Aires, Argentina, mscasserra@fi.uba.ar, hbalzamo@fi.uba.ar, lfdezluco@fi.uba.ar.

Resumen – En los procesos de prefabricación con hormigón se suele verificar la resistencia necesaria para el desmolde y transferencia de tensiones de pretensado por medio el ensayo de varios pares de probetas cilíndricas sometidas al mismo curado que los elementos en producción. Este mecanismo de verificación supone un esfuerzo singular en horas-hombre y es poco eficiente. Dado que la conductividad eléctrica del hormigón en condiciones de saturación ha demostrado ser un indicador de la estructura de poros, se propone evaluar el empleo de la medida de la resistividad como estimador de la resistencia a la compresión, incluso en condiciones variables de temperatura. La sustitución de los procedimientos tradicionales por este método no destructivo conduce a una metodología de control simplificada y con menores necesidades tecnológicas y de recursos humanos. Este trabajo ilustra los procedimientos preliminares para obtener las curvas de correlación resistividad – resistencia a la compresión, considerando las condiciones de uso en fábrica. La correlación es satisfactoria, siguiendo una ley del tipo logarítmica con un valor de R^2 mayor a 0,99, pero requiere de diversos factores de corrección para considerar el efecto forma y tamaño y la temperatura de medición. Además, se deben mantener condiciones de percolación de la fase líquida al momento de la medida

Palabras Claves – Hormigón prefabricado, Producción, Resistencia a compresión, Resistividad eléctrica, Métodos no destructivos.

I. INTRODUCCIÓN

En la producción de elementos prefabricados de hormigón, se suele acelerar la ganancia inicial de resistencia del material para mejorar la productividad del proceso; un recurso habitual es el curado con vapor, que además de aumentar la temperatura del hormigón evita su desecación prematura. Una vez finalizado el ciclo de curado, hay que determinar el momento más temprano para continuar con las demás etapas de producción: transferencia de tensiones del pretensado y/o desmolde (según corresponda). En cualquier caso, se necesita asegurar que la resistencia del hormigón es suficiente para que el material no se dañe en ninguna de estas operaciones. Por tal motivo, se estima la resistencia del hormigón de los elementos premoldeados por medio del resultado del ensayo de compresión no confinada de pares de probetas cilíndricas sometidas a condiciones de curado equivalentes al elemento estructural en proceso. Esta metodología supone un esfuerzo considerable en horas hombre

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

y el moldeo de un número importante de muestras, para disponer de pares sin ensayar en el caso que la evolución de propiedades mecánicas sea más lenta de lo previsto.

Como la evolución de la estructura de poros que ocurre a edades tempranas - responsable de la evolución de la resistencia a la compresión - induce cambios en la resistividad eléctrica del hormigón, se propone emplear a la medida de resistividad eléctrica del hormigón como indicador de la resistencia a la compresión del hormigón. Una característica interesante de esta medición es que la misma es no destructiva y que puede aplicarse in situ.

En base a lo expuesto, el presente trabajo propone simplificar el procedimiento de autocontrol reemplazando parcialmente el ensayo de probetas por la medida no destructiva de la resistividad eléctrica, es decir, analizar si esta medición puede llegar a tener carácter predictivo sobre la resistencia a compresión temprana del material.

II. PRINCIPIOS DE LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica del hormigón es una medida no destructiva que cuantifica la “movilidad de los iones” en el agua de poros presente en la micro y mesoestructura. En condiciones de saturación, esta movilidad de los iones está condicionada por la estructura de poros, esencialmente su distribución, conectividad y tortuosidad [1]. Al mezclar el agua y el cemento para la producción del hormigón se obtiene una suspensión, que se condice con una resistividad muy baja; sin embargo, a medida que el hormigón va fraguando y endureciendo la resistividad aumenta [2]. Por tal motivo, el grado de hidratación es una característica que podría valorarse por medidas de la resistividad eléctrica.

Existen diferentes técnicas para medir la resistividad eléctrica; la medida directa se emplea solamente en condiciones de laboratorio y se basa en la ley de Ohm, dentro de una jaula de Faraday, mientras que para medidas in situ y laboratorio se emplean resistivímetros de electrodos puntuales, de dos o cuatro puntas, según configuración de Wenner. En particular, este último ensayo ha surgido inicialmente para medir la resistividad del suelo [3] y posteriormente adaptado para realizar la medición sobre muestras de hormigón con un dispositivo similar. Actualmente, el ensayo se encuentra normado por la UNE 83988-2:2014 “Durabilidad del hormigón, Métodos de ensayo. Determinación de la

resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner” [4].

Este métodos ha ganado gran popularidad en los últimos años, especialmente para la realización de evaluaciones in-situ, debido a su simplicidad, rapidez y bajo costo de implementación [5].

La medida es completamente no destructiva y su resultado se debe interpretar en función de las condiciones de la muestra en el momento de la medida. Para una muestra dada, la técnica puede emplearse para mediar la capacidad de transporte del hormigón, cuando la muestra se encuentra saturada. No obstante, la medida depende fuertemente del contenido de humedad de la muestra y el valor medido puede llegar a crecer considerablemente si la muestra se encuentra parcialmente seca [6]. Adicionalmente, Presuel-Moreno y Liu [7] han demostrado la influencia que tiene la temperatura de medición sobre la medida de resistividad eléctrica del hormigón, haciendo que los valores obtenidos bajen a medida que aumenta la temperatura. Dichos autores han analizado el comportamiento de las muestras hasta una temperatura de 45°C, temperatura menor a la temperatura máxima de curado usualmente utilizada en fábrica. Este aspecto es importante a la hora de evaluar la aplicación del método en la fabricación de elementos premoldeados que se encuentran sometidos a ciclos de curado acelerado.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la influencia de la forma y el tamaño de la muestra de ensayo en los valores de resistividad eléctrica obtenidos. En esta línea, Morris et al. [8] han propuesto factores adimensionales para poder estimar la resistividad absoluta, la que realmente tiene el material, a partir de la resistividad aparente, la que se obtiene de las mediciones realizadas con un equipo de Wenner. Estos factores fueron desarrollados para probetas cilíndricas y tienen en cuenta la distancia entre los puntos de medición y la geometría de la probeta, diámetro y longitud (Fig. 1). Mas recientemente, Minagawa et al. [9] han desarrollado un trabajo similar, realizando ensayos experimentales y comparando los mismos con resultados obtenidos por modelación numérica, incluyendo también en el análisis la correlación con probetas prismáticas. En este sentido, para la utilización del método a escala industrial, sería necesario obtener los factores de forma y tamaño que permitan realizar las mediciones de forma directa sobre el elemento prefabricado a temprana edad.

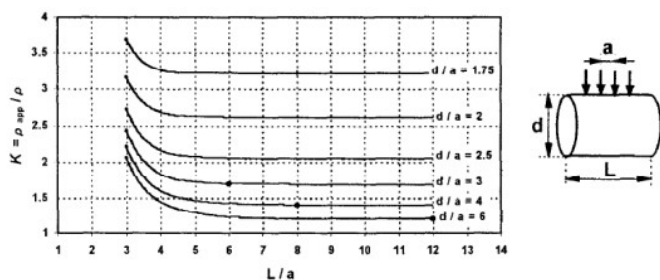


Fig. 1 Estimación del factor de forma K, para mediciones realizadas sobre la generatriz de la probeta cilíndrica 15x30 [8]

Finalmente, Garzon et al. [10] han demostrado que la presencia de las barras de acero en mediciones realizadas sobre hormigón armado puede llegar a alterar la medición realizada, dependiendo principalmente de la disposición relativa del equipo de medición con respecto a la armadura y del espesor del recubrimiento.

III. APLICACIONES DE LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La medida de la resistividad se emplea como indicador de la durabilidad potencial del hormigón. En esta línea, algunos autores [11-13] han estudiado la correlación entre la resistencia del hormigón a la penetración del ion cloruro y la resistividad eléctrica del hormigón. Sumado a las aplicaciones relacionadas con la durabilidad del hormigón, también se han encontrado otras aplicaciones que están relacionadas con la valoración in situ del proceso de secado [6].

Por otro lado, hay evidencias experimentales [14] de que existe una correlación entre la resistividad eléctrica y la evolución de resistencia, correlación que podría utilizarse para emplear a la resistividad como indicador de la evolución de las propiedades mecánicas a escala industrial.

De esta forma, para la utilización de la medida de resistividad eléctrica como método predictivo sobre la resistencia a compresión temprana del hormigón en elementos prefabricados, sería necesaria la identificación del coeficiente de forma y tamaño que relaciona a la resistividad aparente (medida por el instrumento) con la resistividad absoluta medida sobre elemento premoldeado. Asimismo, para el caso de procesos de fabricación con ciclos de curado acelerado, se deberá tener en cuenta la influencia de la temperatura sobre la resistividad aparente.

La aplicación de este método a escala industrial ofrece numerosas ventajas con respecto a los procedimientos de control utilizados en la actualidad. Desde el punto de vista del rendimiento de la mano de obra, al sumar un método predictivo de la resistencia a compresión se espera tener mayor precisión del momento de pretensado y así reducir el número de ensayos de compresión a realizar. En consecuencia, esto no solo permitiría tener un proceso productivo más eficiente, al poder optimizar los tiempos de producción, sino que también conllevaría a lograr un ahorro de material y una disminución de desechos, con una consecuente mitigación del impacto ambiental que generan, en especial, las industrias que utilizan cemento en sus procesos productivos. Por último, la metodología podría proporcionar más seguridad al proceso productivo y mas calidad al producto terminado, al disminuir las probabilidades de que el número de muestras moldeadas no alcancen para estimar la resistencia a compresión necesaria al momento de destesado.

IV. HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

Para poder desarrollar la aplicación de la medida de la resistividad eléctrica del hormigón, a edad temprana, como un indicador de evolución de propiedades mecánicas en ciclos de curado con vapor es necesario validar las siguientes hipótesis:

- Para las condiciones de trabajo, la correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón y la resistividad eléctrica medida por método de Wenner sobre probetas saturadas es satisfactoria (R^2 mayor que 0,85), medidas a temperatura ambiente.
- Es posible calibrar la influencia de la temperatura sobre la resistividad, en condiciones saturadas.
- Es posible calibrar la influencia de la forma y tamaño del elemento prebrabricado sobre el cual se realizan las medidas de resistividad eléctrica a temprana edad.

Para el desarrollo del presente estudio, y en especial para la definición de la geometría de los elementos a analizar, se supuso que el método será utilizado en la prefabricación de durmientes de hormigón pretensados.

V. METODOLOGÍA

La metodología a aplicar es experimental y tiene como objetivo la calibración del método no destructivo, basado en la medida de la resistividad eléctrica del hormigón por método de las 4 puntas. El mismo busca evaluar la variabilidad del método frente a cambios en la forma y el tamaño del elemento y frente a variaciones de temperatura.

En primer lugar, se moldearon once probetas cilíndricas de 10x20 y realizaron ensayos para obtener la correlación entre la resistencia a compresión de un hormigón H60 (resistencia comúnmente utilizada en la producción de durmientes) y la resistividad eléctrica absoluta del mismo. Las diez probetas utilizadas para los ensayos a compresión fueron denominadas como H60-P1 a H60-P10 y la probeta utilizada como referencia para la medición de la resistividad eléctrica fue denominada H60-PR1. Luego, la propuesta general se ha basado en desarrollar experimentos en los que se desacoplen las variables que enuncian a continuación:

- Para desacoplar la influencia de la temperatura sobre la resistividad, todas las medidas que no involucren ciclos térmicos se realizaron en condiciones de laboratorio a temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Para desacoplar la influencia del coeficiente de forma, se realizaron mediciones paralelas y comparativas de la resistividad eléctrica sobre una probeta cilíndricas de 10x20 (H60-PR1), sobre dos probetas cilíndricas de 15x30 (H60-PI, H60-PII) y sobre un elemento prismático de 15x15x30 (H60-PA), que representa los posibles elementos premoldeados a fabricar.
- Para analizar la influencia de la temperatura en la medida de resistividad, se analizó como esta

característica varía en una muestra que es sometida a ciclos térmicos de curado.

Se muestra en la Fig.2 las probetas moldeadas.



Fig. 2 Muestras para calibración del método

VI. CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SOBRE PROBETAS SATURADAS

Se procedió a medir la resistividad eléctrica del hormigón (Fig. 3) a diferentes intervalos de tiempo (6-12hs, 24hs, 2d, 3d-4d, 7d, y 28 días) sobre una probeta que se encontró en todo momento bajo curado normalizado. Para los mismos intervalos de tiempo, se ensayaron a compresión (Fig. 4) probetas cilíndricas que se encontraban curándose bajo las mismas condiciones.



Fig. 3 Medición de resistividad eléctrica sobre probeta cilíndrica



Fig. 4 Ensayo a compresión de probetas cilíndricas

En la Fig. 5 se han graficado el resultado de los ensayos y la línea de tendencia que acompaña la relación entre ambos valores (resistencia a compresión y resistividad eléctrica absoluta).

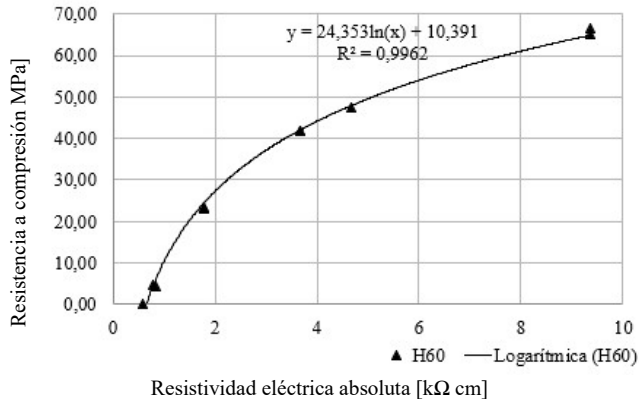


Fig. 5 Relación entre Resistencia a compresión del hormigón y la Resistividad eléctrica absoluta (H60)

Se observa de la figura, en línea con lo indicado por la bibliografía, la relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica del hormigón sigue una ley del tipo logarítmica con un valor de R^2 mayor a 0,99. Esto nos permite validar la primera hipótesis planteada.

Los pasos que siguen buscarán independizar el valor de los resultados de la forma del elemento que se evalúa y de la temperatura de medición para calibrar un modelo en laboratorio que pueda ser extrapolado al control de calidad en fábrica.

VI. INFLUENCIA DE LA FORMA Y EL TAMAÑO DEL ELEMENTO EN LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SOBRE PROBETAS SATURADAS

Para evaluar la influencia del tamaño y la forma de la probeta en la medida de resistividad eléctrica, se compararon en el tiempo el resultado de las mediciones realizadas sobre una probeta cilíndrica 10x20 (H60-PR1), sobre dos probetas cilíndricas 15x30 (H60-PI, H60-PII) y sobre un bloque prismático de 15x15x30 (H60-PA).

En la Fig. 6 se grafica como varía el valor de la resistividad aparente a lo largo del tiempo según que elemento sea ensayado. Para mayor claridad, se grafica un promedio de los valores obtenidos para las dos probetas cilíndricas 15x30 (H60-PI, H60-PII). Se observa de la figura que todas las curvas siguen una línea de tendencia logarítmica, siendo el R^2 más bajo el correspondiente al ensayo realizado sobre la muestra H60-PR1 (probeta cilíndrica de 10x20) y superior a 0,97.

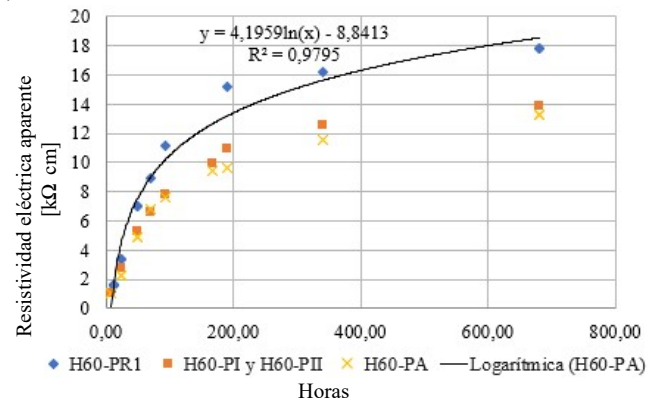


Fig. 6 Relación entre la Resistividad eléctrica aparente del hormigón y las horas de curado para distintas geometrías de probeta (H60)

Asimismo, si se toma como referencia los valores obtenidos para las probetas H60-PI y H60-PII (probetas cilíndricas 15x30) y se divide los valores obtenidos para la probeta cilíndrica 10x20 y para la prismática de 15x15x30 por dichos valores de referencia, se obtiene la gráfica de la Fig. 7. Es importante mencionar que se ha realizado este análisis solo para las primeras 100 horas, ya que el control de la resistencia a compresión en fabricación no suele exceder dicho período de tiempo.

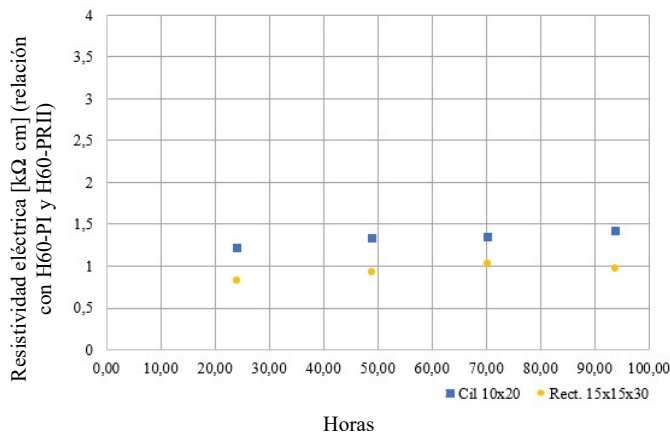


Fig. 7 Relación entre la Resistividad Eléctrica del hormigón (relación con H60-PI y H60-PII) y las horas de curado para distintas geometrías de probeta (H60)

Se observa de la figura que las relaciones obtenidas tienen una tendencia constante, lo cual se condice con lo indicado por Morris et al. [8] y Minagawa et al. [9]. Esto nos permite suponer que los factores de forma y tamaño también pueden ser aplicados a elementos de hormigón a temprana edad. Asimismo, así como pudo verificarse la correlación entre elementos prismáticos y cilíndricos a temprana edad, los resultados obtenidos permiten concluir que también podría ser posible encontrar una correlación entre los resultados obtenidos con otras geometrías de elemento, como ser por ejemplo la de un durmiente de hormigón.

Para validar el ensayo realizado, se compara a continuación el resultado obtenido en los ensayos experimentales con el valor teórico obtenido por medio del ábaco de Morris et al. [8] y el informado por Minagawa et al. [9] para probetas cilíndricas. En este sentido, del mencionado ábaco [8] se puede ver que los valores aproximados de K – teniendo en cuenta la separación entre puntas utilizada (38 mm) y la geometría de las probetas cilíndricas de 10x20 y de 15x30 – es de 1,9 y 1,35, respectivamente. De esta forma, el cociente entre ambos factores – y en consecuencia el cociente entre la resistividad eléctrica aparente de cada probeta – da un valor de 1,41. Por otro lado, de los resultados presentado por Minagawa et al. [9] puede observarse que ese coeficiente es de 1,35. Finalmente, se observa de la figura que el promedio de los resultados obtenidos experimentalmente para dicha relación es de 1,32, difiriendo en menos de un 5% de los valores antes mencionados.

Finalmente, el análisis de los resultados nos permite concluir que, una vez calibrado el método para la geometría del elemento prefabricado, sería posible independizar el resultado del ensayo de las características geométricas del elemento para el control de calidad directo en fábrica.

VII. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SOBRE PROBETAS SATURADAS

Para evaluar la influencia de la temperatura en la medición de la resistividad eléctrica, se realizaron baños

térmicos (Fig. 8) y se procedió a realizar mediciones de resistividad (Fig. 9) a diferentes escalones de temperatura. Entre escalón y escalón, se dejó descansar la muestra a temperatura del agua constante durante una hora. De esta forma se asume que la temperatura medida en el agua es igual a la temperatura en la masa del hormigón de las muestras.

Atendiendo al objetivo del presente estudio, las mediciones se realizaron hasta una temperatura máxima de 60 °C, conforme a los límites indicados por las normas en realización a temperaturas de curado acelerado.



Fig. 8 Muestras de hormigón en baño térmico

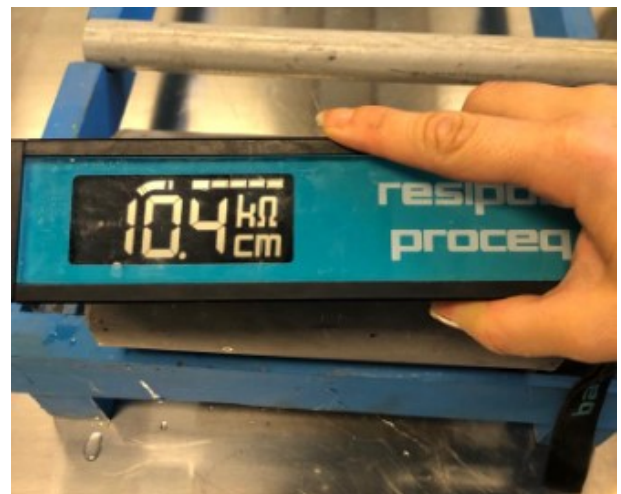


Fig. 9 Medición de resistividad eléctrica sobre muestra sometida a baño térmico

La temperatura inicial del ensayo fue de 26 °C ya que a esa temperatura se encontraba el agua de las piletas de donde

fueron extraídas las probetas previo al comienzo del ensayo. En la Fig. 10 se grafica como varía la resistividad eléctrica de las muestras a medida que aumenta la temperatura del baño térmico.

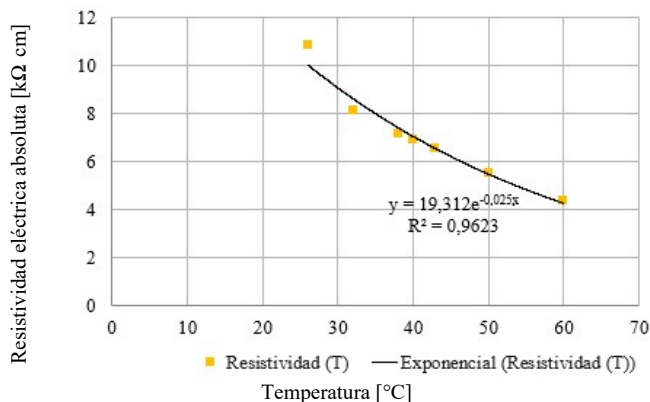


Fig. 10 Evolución de la medida de Resistividad Eléctrica con el aumento de la temperatura (H60)

Como se observa de la figura, la relación entre la medida de Resistividad Eléctrica y el aumento de la temperatura sigue una tendencia exponencial, conforme lo indicado por la bibliografía, por un R^2 mayor a 0,96. Asumiendo que el valor de resistividad eléctrica a 26 °C es igual a uno, se calculó la relación entre la resistividad medida a diferentes temperaturas y dicha resistividad de referencia (Fig. 11).

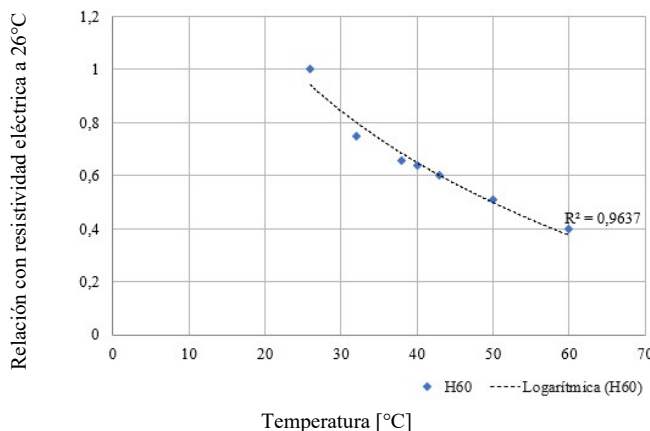


Fig. 11 Relación con resistividad eléctrica a 26°C

De la gráfica puede observarse que la relación entre ambos factores sigue una tendencia logarítmica con un R^2 mayor a 0,96. De esta forma, se pueden concluir entonces que, al igual que para el tamaño y forma de la muestra a ensayar, puede encontrarse un factor de corrección que permita independizar el resultado del ensayo de la temperatura de medición.

VIII. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos puede concluirse que es posible calibrar el método para ser utilizado en fábrica como

un ensayo de carácter predictivo sobre la resistencia a compresión temprana del material.

De las mediciones realizadas se verifica que, para el conjunto de materiales de uso industrial, existe una correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón y la resistividad eléctrica medida por método de Wenner a temperatura de laboratorio, siguiendo una ley del tipo logarítmica con un valor de R^2 mayor a 0,99. Asimismo, se observó que es posible calibrar la influencia de la forma del elemento en los valores de resistividad obtenidos, lo cual permitiría aplicar el método a escala industrial y realizar las mediciones directamente sobre el elemento estructural. Para validar los ensayos realizados, se comparó el resultado obtenido en los ensayos experimentales con el valor teórico, obteniendo una diferencia menor al 5%. Por último, se ha demostrado que, para el rango de temperaturas que usualmente se utilizan en el curado acelerado de hormigones a escala industrial, es posible encontrar un factor de corrección que permita independizar el resultado del ensayo de la temperatura de medición, obteniendo correlaciones con un R^2 mayor a 0,96 .

Para futuros trabajos se recomienda evaluar si la condición de no saturación que tiene un elemento premoldeado en fábrica afecta la medición de la resistividad eléctrica del hormigón, aun cuando se trata de un elemento prefabricado a temprana edad que aún no fue desmoldado. Asimismo, las mediciones fueron realizadas sobre probetas prismáticas de 15x15x30, cuya geometría difiere ligeramente de la de un durmiente real. Para su aplicación a la fabricación de durmiente, se recomienda estudiar que factor de forma es necesario aplicar para realizar las mediciones directamente sobre los elementos premoldeados y evaluar también la posible incidencia de la presencia de armaduras en el resultado de la medición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todo el equipo del Laboratorio de Materiales y Estructuras de la FIUBA por la colaboración para la realización del presente trabajo, al Rectorado de la UBA por la financiación recibida para el Proyecto de Desarrollo Estratégico, en el marco del cual se realizó el presente estudio, y al Ing. Gastón Fornasier de Hormigones Lomax por facilitar materiales para la elaboración de hormigones.

REFERENCIAS

- [1] P.C. Silva, R.M Ferreira y H. Figueiras, “Electrical Resistivity ad a Mean of Quality Control of Concrete – Influence of Test Prodecudre”, XII International Conference of Durability of Building and Materials and Components., Porto – Portugal, 12-15 de abril, 2012.
- [2] C. Andrade y R. D’Andrea. “La resistividad como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad”, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, vol. 1, núm. 2, pp. 93 – 101, mayo-agosto 2011.

- [3] F. Wenner, "A Method of measuring earth resistivity," Bull. Bur. Stand., vol. 12, pp. 469-478, 1915.
- [4] UNE, Norma UNE 83988-2:2014 "Durabilidad del hormigón, Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner.
- [5] P. Azarsa y R. Gupta "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review", Hindawi Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2017, 30 páginas, 2017.
- [6] L. Fernandez Luco, "Valoración de técnicas no destructivas para el control de la eficiencia de cursado del hormigón", Tesis Doctoral, Universidad de Alicante 2008.
- [7] F. Presuel-Moreno y Y. Liu, "Temperature effect on electrical resistivity measurement on mature saturated concrete", NACE – International Corrosion Conference Series, Enero 2012.
- [8] Morris, W., Moreno, E.I., Sagüés, A.A. "Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in Test Cilindres using a Wenner Array Probe", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 12, pp. 1779-1787, 1996
- [9] H. Minagawa, S. Miyamoto, I. Kurashige y M. Hisada, "Appropriate geometrical factors for four-probe method to evaluate electrical resistivity of concrete", Construction and Building Materials, Vol. 374, 2023.
- [10] A.J. Garzon, J. Sanchez, C. Andrade, N. Rebolledo, E. Menéndez y J. Fulla, "Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars", Cement & Concrete Composites, vol. 53, pp. 249-257, 2014.
- [11] R. D'Andrea, "Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de resistividad eléctrica", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2010.
- [12] C.E. Tinto Balestra, T. Alessi Reichert, W.A. Pansera, "Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment", Construction and Building Materials, Vol. 230, 2020.
- [13] S.E. Chidiac, M. Shafikhani, "Electrical resistivity model for quantifying concrete chloride diffusion coefficient", Cement and Concrete Composite, Vol. 113, 2020.
- [14] C. Cavalcante Araujo y G. Rocha Meira, "Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity", IBRACON Structures and Materials Journal, vol. 15, núm. 1, e15103, 2022.