

Correlación entre la absorción de agua, la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del hormigón con diferentes contenidos de puzolana

R. A. Medeiros-Junior^{1*} , G. S. Munhoz¹ , M. H. F. Medeiros¹ 

*Autor de Contacto: medeirosjunior.ufpr@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

Recepción: 16/07/2018 | Aceptación: 27/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

Editor Asociado Responsable: Dr. Pedro Garcés Terradillos

RESUMEN

Esta investigación correlaciona las siguientes propiedades: absorción de agua (por inmersión y capilaridad), resistividad eléctrica y resistencia a compresión. Se ensayaron dos tipos de hormigones con cementos diferentes. Los resultados mostraron que los hormigones con mayor contenido de puzolanas y relación agua-cemento menor que 0,60, presentaron mayor resistividad y absorción por capilaridad. Ese comportamiento se atribuye a la reducción del diámetro de los poros. Por otro lado, en los hormigones con relación agua/cemento de 0,60, pero con menor contenido de puzolanas, también se observó un aumento de la absorción por capilaridad. Como esperado, la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica fueron inversamente proporcionales a la relación agua/cemento, en cuanto que la absorción por inmersión y capilaridad se mostraron directamente proporcionales a la relación agua/cemento. Las correlaciones encontradas entre los ensayos tuvieron altos coeficientes de determinación.

Palabras clave: durabilidad; concreto; absorción; Resistividad; resistencia a la compresión.

Citar como: Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. F. (2019), “Correlaciones entre absorción de agua, Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión de concreto con diferentes contenidos de puzolana”, Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 152 – 166, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

¹ Department of Civil Construction, Federal University of Parana - UFPR, Curitiba, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan

ABSTRACT

This research confronts the following concrete properties: water absorptions (by immersion and capillarity), electrical resistivity and compressive strength. Concrete mixtures with two types of cement were tested. Results showed that concretes with higher content of pozzolan had higher resistivity and greater absorption by capillarity, for water/cement ratios lower than 0,60. This behavior is attributed to reduced pore diameters and microstructure densification. However, for water/cement ratio of 0,60, concrete with lower content of pozzolan presented higher absorption by capillarity. It was observed that the compressive strength and the electrical resistivity behaved inversely proportional to the water/cement ratio, and the absorption by immersion and capillarity are directly proportional to the water/cement ratio. Correlations with high determination coefficients were found between tests.

Keywords: durability; concrete; absorption; resistivity; compressive strength.

Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana

RESUMO

Essa pesquisa confronta as seguintes propriedades do concreto: absorção de água (por imersão e capilaridade), resistividade elétrica e resistência à compressão. Concretos com dois tipos de cimento foram ensaiados. Os resultados mostraram que os concretos com maior teor de pozolana apresentam maior resistividade e absorção por capilaridade, para relação água/cimento menor que 0,60. Esse comportamento é atribuído à redução no diâmetro dos poros. No entanto, para relação água/cimento de 0,60, concretos com menor teor de pozolana apresentaram maior absorção por capilaridade. Ademais, a resistência à compressão e a resistividade elétrica são inversamente proporcionais a relação água-cimento, enquanto que a absorção por imersão e capilaridade são diretamente proporcionais a relação água/cimento. Correlações com elevados coeficientes de determinação foram encontradas entre os ensaios.

Palavras-chave: durabilidade; concreto; absorção; resistividade; resistência à compressão.

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras de concreto tiene impacto directo en la economía de la industria de la construcción civil. Por lo tanto, es esencial comprender los mecanismos que causan la degradación de esas estructuras. Algunas de las principales variables que controlan los procesos de degradación en el concreto son la Resistividad eléctrica, la absorción de agua y la porosidad. La Resistividad eléctrica puede ser correlacionada con la velocidad de corrosión y su nivel de deterioro, en cuanto a las absorciones de agua (por inmersión y capilaridad) pueden ser directamente relacionadas a la difusividad de iones agresivos en la microestructura del concreto. Además de eso, la porosidad (tamaño de los poros, conectividad y tortuosidad) es, también, un aspecto importante que puede influir en todas esas propiedades, incluyendo la resistencia a la compresión (Hornbostel et al., 2013; Ye et al., 2017).

Ramezaniyanpour et al. (2011) estudiaron la relación entre la Resistividad del concreto, la absorción de agua, y la penetración de cloruros y la resistencia a la compresión, a fin de ofrecer un mejor entendimiento sobre esas propiedades. Los autores concluyeron que la Resistividad, la absorción

de agua y la penetración de cloruros pueden ser correlacionadas. Entre tanto, al contrario de lo esperado, la resistencia a la compresión no puede expresar una correlación clara con la Resistividad eléctrica, una vez que ambos parámetros tienen variables (como el tipo de cemento) que no fueron contabilizados en el estudio. Por lo tanto, el presente artículo intenta aclarar esa laguna con el estudio de cementos con diferentes contenidos de puzolana.

Aún en esa perspectiva, Andrade y D'Andrea (2011), Silva et al. (2011), Ait-Mokhtar et al. (2013) y Sengul (2014) también estudiaron extensivamente esas correlaciones. De acuerdo con sus investigaciones, debido a la relación existente entre la porosidad, permeabilidad, nivel de saturación, resistencia mecánica, penetración de cloruros y la difusividad, la Resistividad eléctrica puede ser muy conveniente para la previsión de vida útil de los elementos de concreto.

La influencia de diferentes tipos de cemento y adiciones minerales en las propiedades físico-eléctricas del concreto fué investigada en diversos estudios (López y Castro, 2010; Yildirim et al., 2011; Lübeck et al., 2012; Hoppe Filho et al., 2013; Medeiros-Junior y Lima, 2016). Algunos de ellos ensayaron sustituciones parciales de cemento por escoria de alto horno, sílica activa y ceniza volante. En general, los autores concluyeron que mayores coeficientes de Resistividad eléctrica y menores absorciones de agua fueron encontrados en concretos con sustituciones parciales por adiciones minerales debido al refinamiento de los poros, que reducen la conectividad. Sin embargo, los efectos aún no son totalmente comprendidos. El curado del concreto, por ejemplo, puede desempeñar un papel importante en esas relaciones. Presuel-Moreno et al. (2013) y Sabbag y Uyanik (2018) concluyeron que el proceso de curado influye en la permeabilidad del concreto, reflejando en mayores velocidades de absorción de agua y Resistividad eléctrica, y menor resistencia a la compresión. Según esos autores, mejores resultados fueron encontrados cuando probetas de prueba fueron curados inmersas en agua ó al menos, almacenados en la cámara húmeda. El objetivo de esa investigación es estudiar las posibles correlaciones entre la absorción de agua del concreto (por inmersión y capilaridad), la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión, comparando dos tipos de cemento con diferentes contenidos de ceniza volante (12,5% y 27,0%). Por tanto, ese estudio procura determinar la intensidad de las correlaciones entre esas variables por medio de los coeficientes de correlación y como esas relaciones son afectadas por los diferentes contenidos de puzolana.

Finalmente, los resultados obtenidos con esa investigación serán útiles para mejor comprender la relación entre los parámetros asociados a la durabilidad de las estructuras de concreto y su resistencia a la compresión, que es la principal variable en el control de calidad de proyectos y en la construcción de edificios.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

En ese estudio, dos mezclas con diferentes contenidos de puzolana fueron ensayadas. La Dosis I, compuesta por cemento Portland IP modificado con puzolana (12,5% de ceniza volante) y la Dosis II, compuesta por cemento Portland-puzolánico IP-MS (27,0% de ceniza volante). La composición química y las propiedades físicas de ambos cementos están listadas en la Tabla 1. Además de eso, las principales características de los agregados fino y grueso son mostrados en la Tabla 2. Arena natural fue utilizada como agregado fino, proveniente del Rio Iguaçú, Porto Amazonas.

Tabla 1. Características mecánicas, físicas y químicas del cemento.

Propiedades y Características	Unidad	Dosis I: Cemento Portland Modificado	Dosis II: Cemento Portland Puzolánico
Contenido de ceniza volante	%	12,5	27,0
Al ₂ O ₃	%	6,22	9,77
SiO ₂	%	21,98	29,17
Fe ₂ O ₃	%	3,08	3,84
CaO	%	54,46	45,04
MgO	%	3,68	2,94
SO ₃	%	2,54	2,27
Pérdida al fuego	%	5,40	3,54
CaO libre	%	0,66	0,61
Residuos insolubles	%	11,04	25,62
Contenido alcalino (Na ₂ O e K ₂ O)	%	0,85	1,15
Expansibilidad	mm	0,24	0,26
Tiempo de inicio de pega	h:min	4:20	4:26
Tiempo de fin de pega	h:min	5:06	5:11
Blaine	cm ² /g	3.560	4.193
# 200	%	1,83	0,49
# 325	%	8,33	2,78
Resistencia a compresión (1 día)	MPa	11,8	13,0
Resistencia a compresión (3 días)	MPa	25,3	25,9
Resistencia a compresión (7 días)	MPa	32,1	32,9
Resistencia a compresión (28 días)	MPa	41,0	45,4

Tabla 2. Características de los agregados utilizados.

Características dos agregados	Unidad	Dosis I		Dosis II	
		Fino	Grueso	Fino	Grueso
Tipo	-	Arena natural	Piedra basáltica	Arena natural	Piedra granítica
Dimensión Máxima Característica	mm	2,36	19	2,36	19
Peso específico	g/cm ³	2,35	2,71	2,65	2,71
Absorción de agua	%	1,88	0,40	0,70	0,20

De acuerdo con Bem et al. (2018), los aditivos químicos pueden afectar las propiedades eléctricas del concreto. Por lo tanto, no fueron utilizados en esta investigación. La dosis en peso, de las mezclas de concreto fue fijada en 1:1,4:2,1 (cemento: agregado fino: agregado grueso). El consumo (kg/m³) de los materiales utilizados en cada dosis es mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosis de los especímenes de concreto.

Código	Dosis I			Dosis II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Cemento (kg/m³)	489,8	480,0	470,6	484,9	471,2	458,3	446,0
Agregado fino (kg/m³)	685,7	672,0	658,8	678,9	659,7	641,5	624,4
Agregado grueso (kg/m³)	1028,6	1008,0	988,2	1018,3	989,5	962,3	936,6
Agua (kg/m³)	195,9	240,0	282,4	203,7	226,2	247,5	267,6
Relación agua/cemento	0,40	0,50	0,60	0,42	0,48	0,54	0,60

Las probetas de prueba de concreto son en muestras cilíndricas, que miden Ø100 mm x 200 mm de altura. Esa geometría fue seleccionada debido a los datos tabulados del factor de corrección de forma, que es necesario para determinar la Resistividad eléctrica. De acuerdo con la norma UNE 83988-2 (2014), para esa geometría, el factor es 0,377.

Los concretos fueron vaciados siguiendo las recomendaciones de la norma brasileña NBR 5738 (2015). Así que pasadas 24 horas posterior al vaciado, las muestras fueron desencofradas y curadas en cámara húmeda (humedad relativa $\geq 95\%$ y temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) por 28 días. Finalmente, tres probetas de prueba fueron utilizadas para cada ensayo realizado, los resultados discutidos en ese estudio son el promedio de tres repeticiones.

2.2 Métodos

2.2.1 Resistividad eléctrica

El ensayo no destructivo de Resistividad eléctrica fue realizado de acuerdo con la norma europea UNE 83988-2 (2014), que establece la configuración del experimento para la técnica de cuatro pines (método de Wenner). En ese ensayo, cuatro electrodos son colocados sobre la superficie de la muestra. Entonces el concreto es sometido a una corriente eléctrica aplicada entre los dos electrodos externos. De esa forma, la diferencia resultante en el potencial eléctrico puede ser medida por los dos electrodos internos. Para cada muestra fueron necesarias tres medidas con un ángulo de 120° de distancia entre ellas. Las probetas estaban en condición saturada con superficie seca durante el experimento.

2.2.2 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en las mismas probetas utilizadas en los experimentos de Resistividad eléctrica. Además de eso, los procedimientos de ensayo fueron cumplidos según lo descrito en la norma brasileña NBR 5739 (2018). En ese contexto, las muestras fueron colocadas en la prensa hidráulica, donde fueron cargadas por compresión hasta la ruptura. Durante el ensayo, fue utilizado un equipo con capacidad de carga de 1000 kN, con velocidad de carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

2.2.3 Absorción de agua por inmersión

El ensayo de absorción de agua por inmersión, realizado apenas para las muestras de la Dosis II, obedeció a las consideraciones de la norma brasileña NBR 9778 (2009). El experimento tuvo inicio con el secado de las muestras en estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), hasta la variación de peso ser menor que 0,10 g. Seguidamente al peso seco en estufa fue registrada. En la secuencia, las probetas fueron sumergidas en agua durante 72 horas. La inmersión fue realizada de acuerdo con la norma brasileña: 1/3 de la altura de las muestras sumergidas en las primeras 4 horas, 2/3 en las 4 horas siguientes y finalmente, la inmersión total de la muestra de concreto en las 64 horas restantes. Así, la velocidad de absorción de agua por inmersión, en porcentaje, representa la diferencia entre el peso de la muestra posterior a la inmersión (72h) y su peso seco en la estufa.

2.2.4 Absorción de agua por capilaridad

El objetivo de ese procedimiento es monitorear el aumento de peso de las muestras debido a la absorción de agua por capilaridad. De esa forma, el ensayo es iniciado con el secado de las muestras en la estufa ($T=105^{\circ}\text{C}$), hasta la variación de peso ser menor que 0,10 g, según la NBR 9779 (2012). Después de ello, las probetas fueron colocadas en una capa de agua de (5 ± 1) mm, con fondos expuestos, y sus pesos fueron tomados luego de 3, 6, 24, 48 y 72 horas de exposición. Esas medidas también fueron usadas para determinar la absorptividad (S), de acuerdo con la ecuación 1.

$$S = \frac{V_{\text{agua}}}{A \times \sqrt{t}} \quad (\text{Eq.1})$$

Donde, V_{agua} representa el volumen de agua absorbida por capilaridad, en mm^3 ; A representa el área de la cara de muestra en contacto con el agua, en mm^2 ; y t es el período de exposición, en horas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Resistividad eléctrica y resistencia a compresión

La Tabla 4 muestra la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión para cada dosis y relación agua/cemento, a los 28 días. De acuerdo con la Tabla 4, cuanto mayor es la relación agua/cemento, menor la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión. A medida que la relación agua/cemento aumenta, la porosidad interna de la microestructura del concreto y su conectividad también aumentan. Por tanto, cuanto mayor es la permeabilidad del concreto, menor es la resistencia mecánica, así como la resistencia al flujo de corriente eléctrica. Ese comportamiento ya fue constatado por varios estudios (Mehta y Monteiro, 2006; Ait-Mokhtar et al., 2013; Olsson et al., 2013).

Tabla 4. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Código	Dosis I			Dosis II			
	B0,40	B0,50	B0,60	G0,42	G0,48	G0,54	G0,60
Resistividad eléctrica (kΩ.cm)	8,3	5,5	4,3	14,9	11,5	9,7	8,7
Resistencia a compresión (MPa)	45,2	33,2	21,4	49,3	41,0	32,0	27,9

Medeiros-Junior y Lima (2016) y Yu et al. (2017) también comentaron que el aumento de la relación agua/cemento con el aumento de la porosidad de las probetas de prueba. De esa forma, la resistencia al flujo de corriente eléctrica disminuye cuando más agua esté presente, dentro de los poros de concreto. Para garantizar eso, fue realizado el ensayo de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) en las muestras G0,42 e G0,54. Los resultados mostraron que la porosidad fue de 23,6% y 36,3%, respectivamente. Además de eso, los diámetros promedio de los poros fueron de 43,9 nm y 48,8 nm, para cada concreto ensayado.

La Dosis II presentó los mayores valores de Resistividad y resistencia a la compresión entre las mezclas probadas (Tabla 4). La mayor cantidad de puzolana en la Dosis II contribuyó con el refinamiento de los poros, restringiendo su conectividad. Este efecto contribuyó directamente para la reducción de la permeabilidad y aumentó la resistencia contra el flujo de corriente eléctrico. Resultados semejantes fueron encontrados por López y Castro (2010), Yildirim et al. (2011) y Medeiros-Junior et al. (2014). Además de esto, la sustitución parcial del cemento por puzolana resultó en el consumo de hidróxido de calcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - en una combinación química denominada Reacción Puzolánica. Ese proceso hidrata las mezclas cementíceas de forma gradual y lenta,

contribuyendo para el aumento de la resistencia mecánica a lo largo del tiempo, según comprobaron Medeiros-Junior y Lima (2016).

Finalmente, a fin de confirmar las diferencias observadas en los resultados obtenidos para cada tipo de cemento adoptado, los valores de la Tabla 4 fueron sometidos a un tratamiento estadístico. El Análisis de Varianza (ANOVA) con factor único y significancia de 5% demostró que la Resistividad eléctrica y la resistencia a compresión fueron estadísticamente diferentes para cada grupo ensayado.

En un gráfico con curvas para cada dosis, se correlacionó la Resistividad eléctrica con la resistencia a la compresión (Figura 1). Además de eso, para describir el comportamiento de esas variables, se optó por un tratamiento logarítmico. Ese fue el mejor ajuste de datos, y también fue utilizado por otros estudios (Andrade y D'Andrea, 2011; Wei y Xao, 2014; Medeiros-Junior et al., 2014).

En la Figura 1, ambos parámetros son directamente proporcionales, es decir, cuanto mayor la resistencia a la compresión, mayor la Resistividad eléctrica. Ese comportamiento también fue observado por Dinakar et al. (2007) y Lubeck et al. (2012), y está relacionado con la clara influencia que la porosidad tiene sobre ambas propiedades. Además de eso, la buena correlación gráfica mostrada en la Figura 1 (ambos R-cuadrado encima de 0,98) reafirma esa relación.

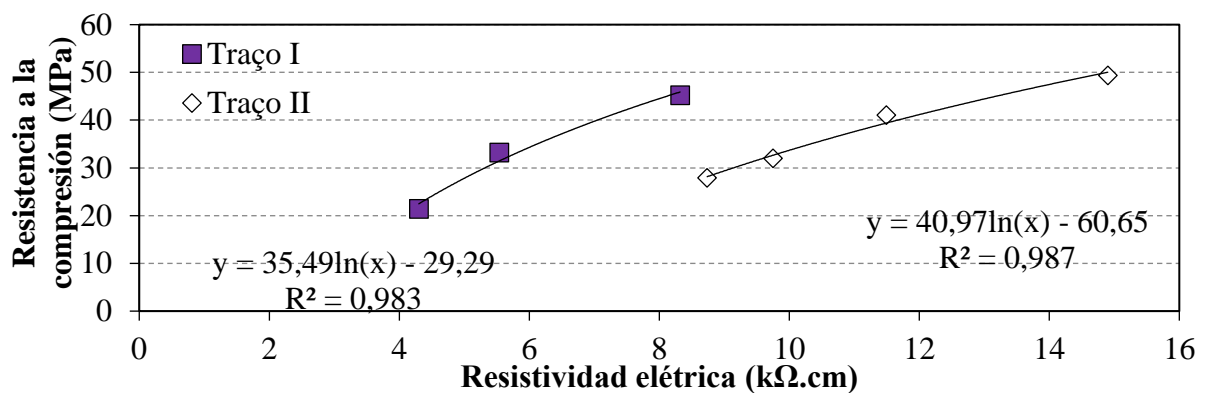


Figura 1. Correlación entre Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

Además de eso, cuando ambas mezclas son comparadas con el mismo rango de resistencia a compresión, también puede ser observado que la curva de correlación para la Dosis II tiene una inclinación más suave. Eso se debe al mayor contenido de puzolana en la Dosis II, que cree una microestructura más densa con mayor Resistividad eléctrica.

3.2 Absorción de agua por inmersión

Las absorciones de agua por inmersión fueron de 3,67%, 4,32%, 5,69% y 6,36% para las muestras G0,42, G0,48, G0,54 y G0,60, respectivamente. Por tanto, a medida que la relación agua/cemento aumentó, también aumentaron los coeficientes de absorción. Esto ya había sido observado por Zhang y Zong (2014), Castro y Ferreira (2016), Gans (2017) y Pinto et al. (2018), y se debe, principalmente, a la porosidad en la microestructura del concreto y a su permeabilidad, una vez que ambos son parámetros significativamente influenciados por la relación agua/cemento.

Además de eso, de acuerdo con el Comité Euro-International du Béton (CEB 192, 1989), el concreto puede ser cualitativamente clasificado como bueno, mediano o malo de acuerdo con el nivel de absorción por inmersión. La Figura 2 correlaciona los resultados obtenidos por medio de los experimentos con tales niveles. En la Figura 2, en cuanto las mayores relaciones agua/cemento (0,60 y 0,54) están asociadas a un concreto de baja calidad, los valores más bajos de ese parámetro (0,42 y 0,48) permiten clasificar al concreto de una calidad promedio.

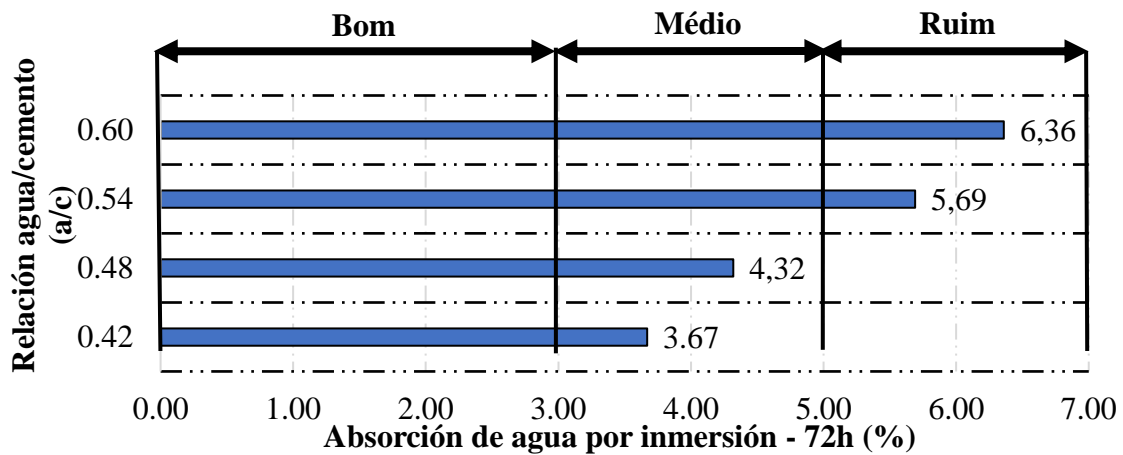


Figura 2. Absorción de agua por inmersión y calidad del concreto de acuerdo con los criterios propuestos por la CEB192 (1989).

La Figura 3 muestra la correlación entre la absorción de agua por inmersión y la Resistividad eléctrica. Similarmente la Figura 1 un método logarítmico describió mejor el comportamiento de ambas variables.

La buena correlación obtenida en la Figura 3 retrata el comportamiento inverso entre la absorción de agua por inmersión y la Resistividad eléctrica. Así, el agua absorbida en la microestructura de concreto aumenta su conductividad eléctrica y, en consecuencia, reduce su Resistividad eléctrica. La Figura 4 correlaciona la absorción de agua por inmersión y la resistencia a la compresión, usando un método logarítmico.

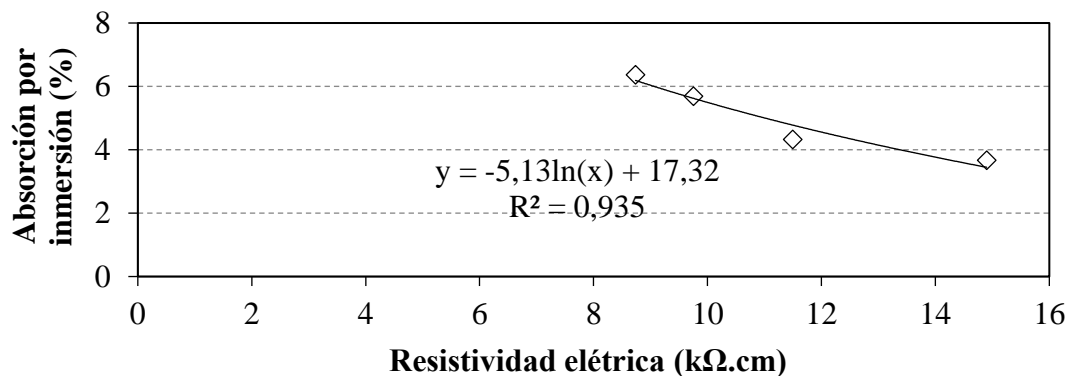


Figura 3. Correlación entre la Resistividad eléctrica y la absorción por inmersión.

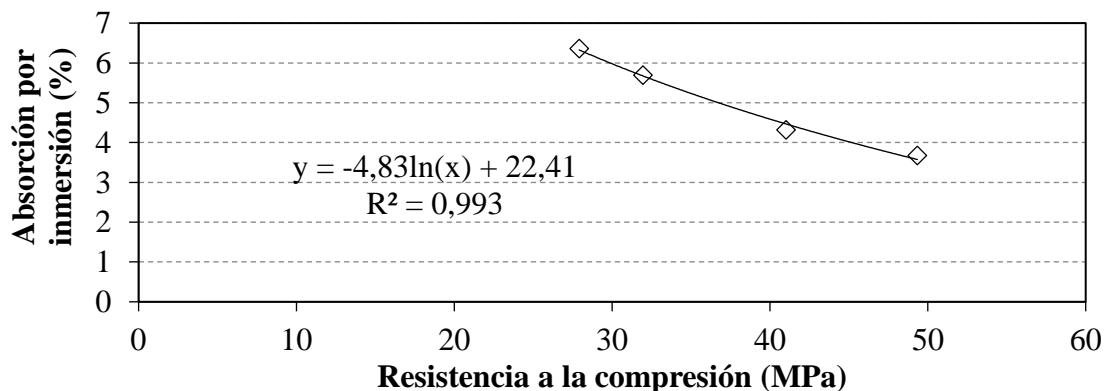


Figura 4. Correlación entre resistencia a compresión y absorción por inmersión.

De acuerdo con la Figura 4, a medida que la absorción de agua por inmersión aumenta, la resistencia a la compresión disminuye. Las curvas de la Figura 3 y de la Figura 4 tienen el mismo comportamiento, ya que los parámetros que influyen esos ensayos son semejantes. Por tanto, cuanto mayor la relación agua/cemento, mayor es la porosidad y su conectividad. Ello implica la reducción de la resistencia a la compresión y Resistividad eléctrica, en cuanto la absorción de agua por inmersión es aumentada.

En resumen, comparando los valores de R-cuadrado de ambos gráficos (Figuras 3 y 4), se puede notar que la absorción de agua por inmersión es mejor correlacionada con la resistencia a la compresión, que con la Resistividad eléctrica. Eso puede estar relacionado con la dependencia que la Resistividad eléctrica tiene con la composición química de la solución presente dentro de los poros del concreto (Ramezani-pour et al., 2011; Presuel-Moreno et al., 2013; Sabbag y Uyanik, 2018). Ese comportamiento explica la baja dispersión obtenida en la curva de regresión mostrada en la Figura 3, aunque haya sido encontrado un alto coeficiente R-cuadrado ($R^2 = 0,935$).

3.3 Absorción de agua por capilaridad

En las Figuras 5 y 6 muestran la variación da agua absorbida por capilaridad a lo largo del tiempo para la Dosis I y II, respectivamente. La absorción de agua por capilaridad aumentó a lo largo de la exposición de 72 horas, en ambas mezclas. No en tanto, la medida que la muestra aproximó su capacidad máxima de absorción, una tendencia de estabilización fue identificada. Ese comportamiento puede ser observado por diferentes inclinaciones en las curvas a lo largo del tiempo. Generalmente, el aumento en el nivel de absorción fue mayor en las primeras 12 horas del experimento.

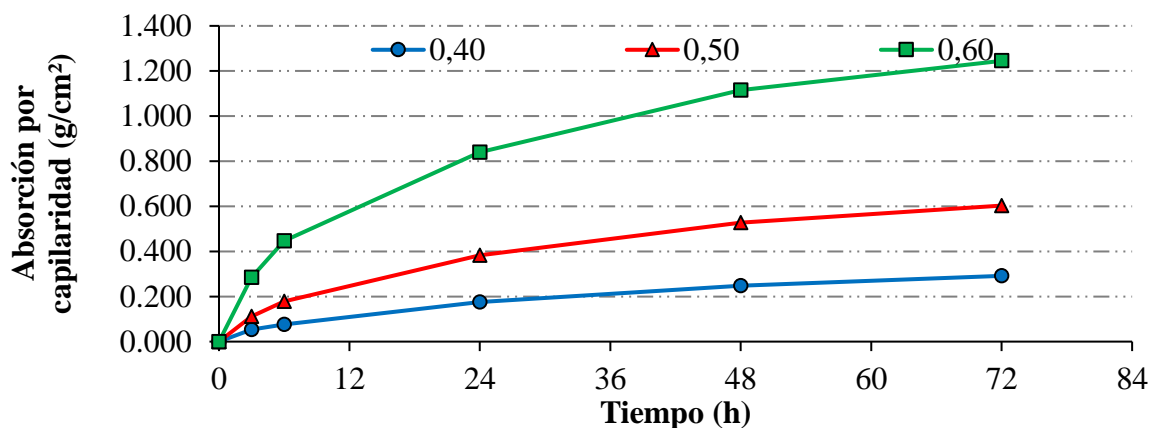


Figura 5. Absorción por capilaridad a lo largo del tiempo - Dosis I.

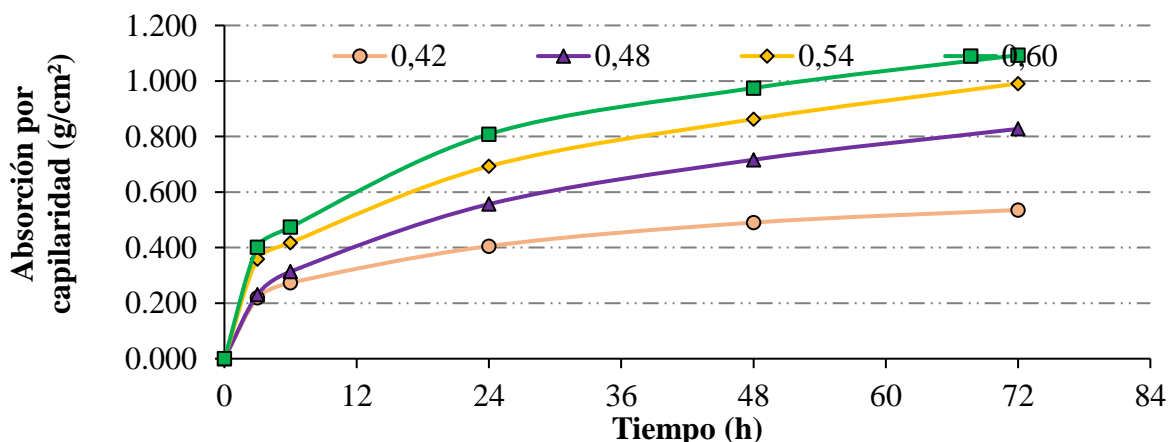


Figura 6. Absorción por capilaridad a lo largo del tiempo - Dosis II.

Además de eso, la absorción de agua por capilaridad aumentó con la relación agua/cemento. De esa forma, según fue comprobado anteriormente por el ensayo MIP, un concreto más poroso contribuye directamente con la absorción y percolación del agua.

Además, a fin de determinar la absorción del concreto, los resultados obtenidos con la absorción por el experimento de capilaridad fueron usados en la ecuación (1). La absorción de las probetas varió de 0,034 a 0,147 g/(cm².min^{1/2}). La Figura 7 ilustra la correlación y la variación de ese parámetro de acuerdo con la relación agua/cemento.

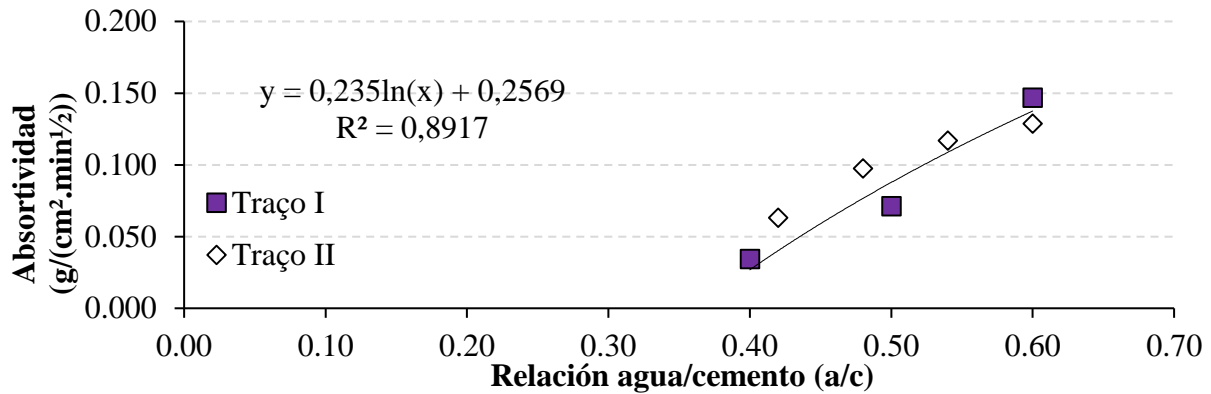


Figura 7. Variación de la absorción con diferentes relaciones agua/cemento.

Como es mostrado en la Figura 7, mayores relaciones agua/cemento presentaron mayores valores de absorción. Eso ocurre, principalmente, debido al aumento de la porosidad. No obstante, comparando las dos dosis, se puede notar que la Dosis II (con mayores cantidades de puzolana) tuvo coeficientes de absorción por capilaridad mayores que el primero. Eso es observado visualmente en los puntos sobre la línea de tendencia, mostrada en la Figura 7.

La principal razón para mayores coeficientes en la Dosis II fue el refinamiento de los poros y la reducción de sus diámetros. En consecuencia, en asociación con la tensión superficial del agua, fuerzas capilares más fuertes estuvieron presentes y por tanto más agua fue absorbida (Mehta y Monteiro, 2006; Yildirim et.al., 2011; Medeiros et.al., 2017).

De la misma manera, Pinto et al. (2018) observaron el mismo comportamiento al analizar la influencia de la carbonatación en la absorción de agua por capilaridad. Según López y Castro (2010), Chen et al. (2014) y Leung et al. (2016), cuanto mayor la sustitución de cemento por puzolana, mejor la microestructura se desarrolla y, por lo tanto, menos porosa se hace.

Por otra parte, comparando los resultados de la relación agua/cemento igual a 0,60, se observa que el comportamiento de la absorción fue el opuesto, con la Dosis I (con menor contenido de puzolana) desarrollando coeficientes mayores. Eso también fue relatado por Olsson et al. (2013), y puede estar relacionado a la calidad de los poros. En ese caso, mayores contenidos de sustitución por puzolanas inducen a poros más tortuosos, como lo observado por Medeiros-Junior y Lima (2016). Así, a pesar de sus fuerzas capilares ser más fuertes, su absorción por los coeficientes de capilaridad es menor.

En resumen, el efecto de los diámetros reducidos de los poros capilares asociados a la tensión superficial del agua fue el principal responsable por el aumento de la absorción capilar en menores relaciones agua/cemento (absorción de la Dosis II > Dosis I). Por otro lado, para mayores relaciones agua/cemento, la calidad de los poros fue el principal factor que llevó a menores coeficientes de absorción de la Dosis II.

Además de eso, la absorción de agua por capilaridad fue correlacionada con otras propiedades del concreto. La Figura 8 muestra la absorción capilar luego de 72 horas y la correlación con la Resistividad eléctrica. La Figura 9 presenta el comportamiento de la absorción capilar versus la resistencia a compresión.

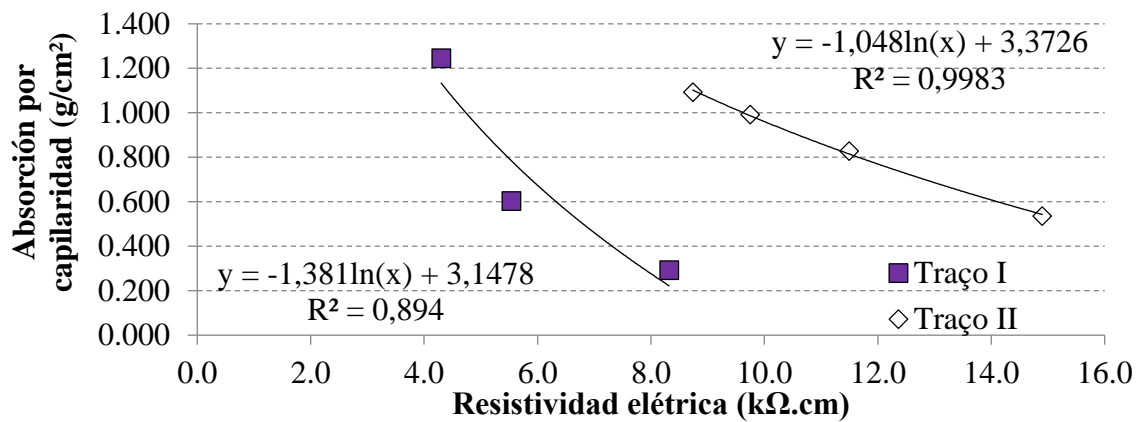


Figura 8. Correlação entre a Resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade.

De acordo com a Figura 8, a absorção de água por capilaridade diminui à medida que a Resistividade elétrica aumenta, para ambas as dosagens ensayadas. De maneira semelhante, de acordo com a Figura 9, a absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão são parâmetros inversamente relacionados. Também foram encontrados bons coeficientes R-ao-quadrado, o que reitera a dependência entre as duas variáveis.

Ademais, a Figura 10 mostra a correlação entre a absorção de água por imersão versus a absorção por capilaridade. Ambas as medidas de absorção estão diretamente relacionadas e de acordo com a Figura 10, uma alta dependência pode ser identificada entre elas, consolidando a influência de ambas as propriedades na absorção e percolação da água na microestrutura do concreto.

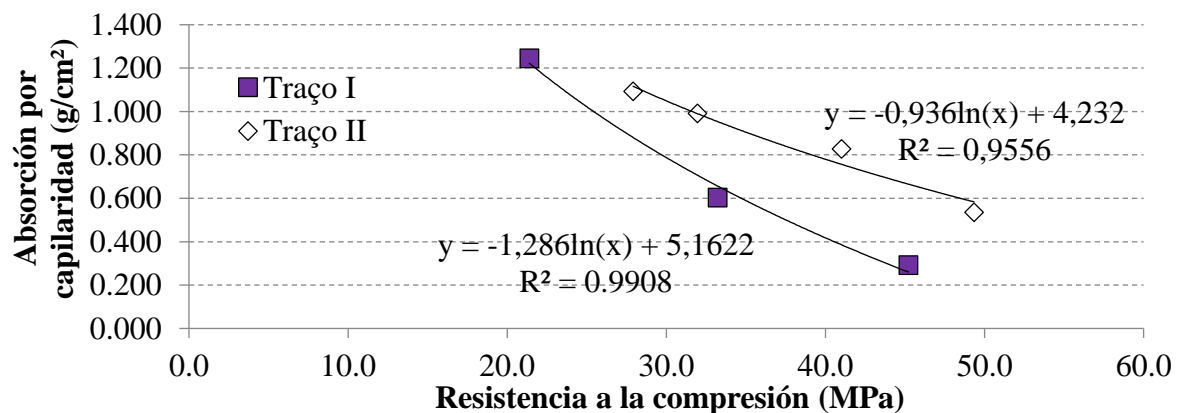


Figura 9. Correlação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade.

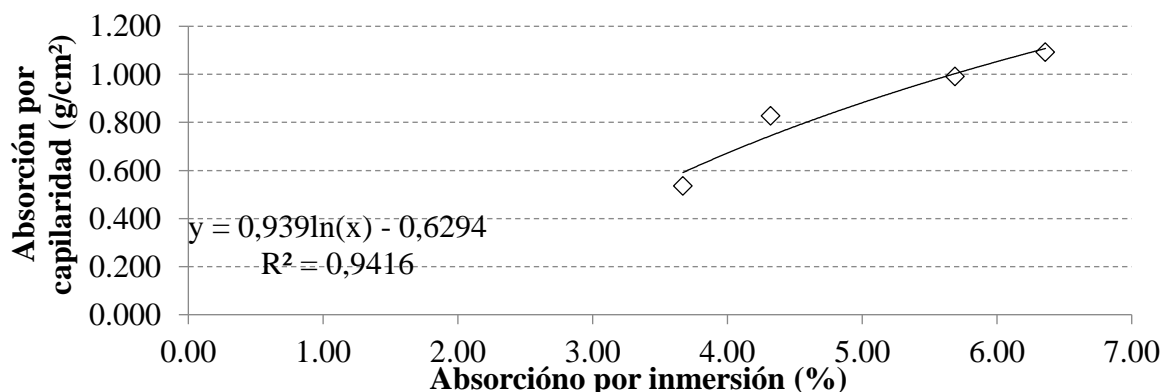


Figura 10. Correlação entre a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Finalmente, la Tabla 5 resume todas las ecuaciones de tendencia logarítmica obtenidas con las correlaciones. De acuerdo con la Tabla 5, la mayoría de los coeficientes R-cuadrado encontrados fue mayor que 0,900. Eso es consecuencia de la dependencia entre todos los parámetros estudiados (Resistividad eléctrica, resistencia a la compresión, absorción de agua por inmersión y por capilaridad) y la porosidad del material, aun cuando esa correlación no sea exclusiva. No obstante, las ecuaciones en la Tabla 5, deben ser extrapoladas con mucha cautela, pues son válidas inicialmente apenas para los materiales y consideraciones adoptadas en esta investigación. Aun así, el estudio de la validación de esas ecuaciones, bien como otros materiales, es altamente confiable.

Tabla 5. Ecuaciones de correlación de los parámetros evaluados.

Parámetros	Ecuación	Dosis	R ²
Resistencia a compresión (f_c) e Resistividad eléctrica (p)	$f_c = 35,49\ln(p)-29,29$	I	0,983
	$f_c = 40,97\ln(p)-60,65$	II	0,987
Absorción por inmersión (A_i) e Resistividad eléctrica (p)	$A_i = -5,13\ln(p)+17,32$	II	0,935
Absorción por inmersión (A_i) e Resistencia a compresión (f_c)	$A_i = -4,83\ln(f_c)+22,41$	II	0,993
Absorción por capilaridad (A_c) e Resistividad eléctrica (p)	$A_c = -1,38\ln(p)+3,15$	I	0,895
	$A_c = -1,05\ln(p)+3,38$	II	0,998
Absorción por capilaridad (A_c) e Resistencia a compresión (f_c)	$A_c = -1,29\ln(f_c)+5,16$	I	0,991
	$A_c = -0,94\ln(f_c)+4,23$	II	0,956
Absorción por capilaridad (A_c) e Absorción por inmersión (A_i)	$A_c = 0,94\ln(A_i)-0,63$	II	0,942

4. CONCLUSIÓN

Las siguientes conclusiones fueron obtenidas con el desarrollo de este estudio:

- Existe una relación de dependencia entre la resistencia a la compresión y la Resistividad eléctrica, que fue comprobada por el coeficiente R-cuadrado encima de 0,98 para ambas dosis. Así, la Resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión del concreto tienden a crecer juntas, al menos hasta la edad investigada en este artículo.
- La absorción de agua por inmersión fue inversamente proporcional a la resistencia a la compresión y la Resistividad eléctrica del concreto. Además de eso, la absorción por inmersión fue directamente proporcional a la relación agua/cemento.
- El mismo comportamiento puede ser observado en la absorción de agua por capilaridad. Coeficientes de correlación superiores a 0,89 fueron observados en ese caso.
- Concretos con mayor contenido de puzolana presentaron mayor Resistividad y absorción por capilaridad, para relaciones agua/cemento, menores que 0,60. Ese comportamiento es atribuido a la reducción de los diámetros de los poros y a la densificación de la microestructura. Sin embargo, concretos con menor contenido de puzolana presentaron mayor absorción por capilaridad para la relación agua/cemento de 0,60, debido a la menor tortuosidad de los poros.
- Quedó probado que la correlación entre los parámetros debe ser utilizada separadamente para cada tipo de cemento con diferentes contenidos de puzolana, una vez que las curvas de correlación fueron construidas para cada uno de los dos tipos de cemento utilizados en ese artículo. La única excepción fue la correlación entre la absorción y la relación agua/cemento, que permitió un ajuste entre las dos dosis como un único grupo (R-cuadrado = 0,89).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) de la Universidad Federal del Paraná (UFPR) por su apoyo a la infraestructura para el desarrollo de esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Benboudjema, F., Burlion, N., Capra, B., Carcasses, M., Colliat, J. B., Cussigh, F., Deby, F., Jacquemot, F., Larrard, T., Lataste, J. F., Bescop, P. L., Pierre, M., Poyet, S., Rougeau, P., Rougelot, T., Sellier, A., Yanez-Godoy, H. (2013), *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties*. Cement and Concrete Research. 45:21-36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.11.002>
- Andrade, C., D'andrea, R. (2011), *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*, Revista ALCONPAT, 1(2), 93-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
- Asociación Española de Normalización (2014). *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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 9778: Argamassa/concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Bem, D. H., Lima, D. P. B., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of chemical admixtures on concrete's electrical resistivity*. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 36(2):174-187. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2017-0058>
- Castro, A., Ferreira, F. (2016), *Effect of particle packing in the durability of high performance concretes*. Ingeniería de Construcción. 31(2):91-104. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000200003>
- Chen, C. T., Chang, J. J., Yeh, W. C. (2014), *The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete*. Construction and Building Materials. 71:35-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>
- Comité Euro-International du Béton. (1989). *CEB Bull 192: Diagnosis and assessment of concrete structures — state of the art report*. Lausanne.
- Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. (2007), *Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes*. Cement and Concrete Composites. 29(2):136-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.005>
- Gans, P. S. (2017), *“Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à Compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e Secagem com cloretos e sulfatos”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Hoppe Filho, J., Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P., Isaia, G. C. (2013), *High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(3):411-418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596)

- Hornbostel, K., Larsen, C. K., Geiker, M. R. (2013), *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review*. Cement and Concrete Composites. 39:60-72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
- Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M. P. (2016), *Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume*. Construction and Building Materials. 113:369-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071>
- López, M., Castro, J. T. (2010), *Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo*. Ingeniería de Construcción, 25(3):419-431. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732010000300006>
- Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., Siqueira, H. C. (2012), *Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag*. Cement and Concrete Composites. 34(3):392-399. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>
- Medeiros, M. H. F., Raisdorfer, J. W., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. A. (2017), *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2(4):1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G. (2016), *Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement*. Construction and Building Materials. 107:11-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>
- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., Real, L. V. (2014), *Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento*. Revista ALCONPAT, 4(2), 113-128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2006), “Concrete – Microstructure, Properties and Materials”. McGraw Hill, New York City, United States, cap. 5, pp. 121-198.
- Olsson, N., Baroghel-Bouny, V., Nilsson, L. O., Thiery, M. (2013), *Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements*. Cement and Concrete Composites. 40:40-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.001>
- Pinto, S. R., Macedo, A. L. A., Medeiros-Junior, R. A. (2018), *Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 3(3):1-10. <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>
- Presuel-Moreno, F., Wu, Y. Y., Liu, Y. (2013), *Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time*. Construction and Building Materials. 48:874-882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.094>
- Ramezaniyanpour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F. (2011), *Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength*. Construction and Building Materials. 25(5):2472-2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>
- Sabbag, N., Uyanik, O. (2018), *Determination of the reinforced concrete strength by electrical resistivity depending on the curing conditions*. Journal of Applied Geophysics. 155:13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>
- Sengul, O. (2014), *Use of electrical resistivity as an indicator for durability*. Construction and Building Materials. 73:434-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., Figueiras, H. (2011). “Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure” in: Freitas, V. P., Corvacho, H., Lacasse, M. (Eds.), XII International Conference on Durability of Building Materials and Components, FEUP Edições, Porto: Distrito de Porto (PT), 8 p.
- Wei, X., Xao, L. (2014), *Kinetics parameters of cement hydration by electrical resistivity measurement and calorimetry*. Advances in Cement Research. 26(4):187-193. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00034>

- Ye, H., Jin, N., Jin, X. (2017), *An Experimental Study on Relationship among Water Sorptivity, Pore Characteristics, and Salt Concentration in Concrete*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 61:530-540. <https://doi.org/10.3311/PPci.9621>
- Yildirim, H., Ilica, T., Sengul, O. (2011), *Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration*. Construction and Building Materials. 25(3):1282-1288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023>
- Yu, B., Liu, J., Chen, Z. (2017), *Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity*. Construction and Building Materials. 138:101-113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100>
- Zhang, S. P., Zong, L. (2014), *Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials*. Advances in Materials Science and Engineering. 2014:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/650373>