

EFECTO DE LOS CLORUROS DE LOS AGREGADOS EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO

EFFECT OF THE CHLORIDES OF THE AGGREGATES IN THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE

J. A. Cabrera-Madrid, A. López-González

RESUMEN

Se evaluó el efecto de los cloruros contenido en los agregados pétreos para concreto, a través del parámetro de resistividad, y la implicación que tiene en la durabilidad. Para ello se elaboraron dos mezclas con agregados gruesos de diferentes densidades. Se caracterizaron física y químicamente los materiales empleados para el concreto. Se determinó la resistividad del concreto a través de 4 procedimientos y se evaluaron según las especificaciones. Se observó que el agregado menos denso, aportó mayor cantidad de cloruro en la mezcla de concreto y por lo tanto mayor posibilidad a deteriorarse por corrosión. El efecto de los agregados con cloruros tiene un impacto en la durabilidad, ya que una menor resistividad implicaría la disminución del periodo de iniciación de la corrosión, lo cual se puede determinar mediante la resistividad eléctrica del concreto, la cual disminuye en aquellos concretos con mayor contenido de cloruros, lo que representaría una velocidad de corrosión moderada a alta.

Palabras Clave: Cloruros, resistividad, durabilidad, corrosión, concreto.

ABSTRACT

Through the evaluation of the resistivity and the durability of the concrete, the effect of the aggregate with chlorides was

determined. Two mixtures were made, with coarse aggregates of different densities, and also two cylinders for each mixture. The materials used for the concrete were physically and chemically characterized. The resistivity of the concrete was determined through 4 methods, and evaluated according to specifications. It was observed that the less dense aggregate, has a greater contribution of chloride in the concrete mixture and therefore greater possibility to deteriorate by corrosion. The effect of the aggregates with chlorides on the durability, could be corroborated by determining the resistivity, which decreases in those concrete with higher chloride content, also represents a moderate corrosion rate.

Keywords: Chlorides, resistivity, durability, corrosion, concrete.

INTRODUCCIÓN

Conocer la durabilidad del concreto desde la etapa de diseño, es un tema relevante desde hace algunos años. Sin embargo, esta propiedad del concreto puede resultar complicada para su determinación y alcance, debido a diversos factores involucrados desde la etapa de fabricación, y hasta la colocación final del concreto (Aitcin, 2003).

Por otro lado, algunas pruebas para determinar la durabilidad de un concreto desde su fabricación, resultan en procedimientos e interpretación complejos, y de elevado costo económico. Ante dicha problemática, se han investigado diversos procedimientos alternativos que resulten más económicos; y que se puedan evaluar los concretos en tiempos más cortos. Así también, que proporcione información para poder estimar la durabilidad de un determinado concreto, tal como la medición de la resistividad eléctrica (Andrade, 2011) (Kim, 2016).

El término de durabilidad es una propiedad enfocada principalmente para los concretos de alto des-

¹ Profesores de la Facultad de Ingeniería, Campus I, Universidad Autónoma de Chiapas.

empeño. La determinación de durabilidad para un concreto, se relaciona con la capacidad que tendrá el concreto para soportar los efectos del ambiente, y de contener las acciones de los agentes que deterioran al concreto durante su vida de servicio (Neville, 2001). Ésta capacidad será promovida por las características físicas, químicas y fisicoquímicas de la materia prima para su fabricación (Papadakis, 1991).

Contar con procedimientos sencillos y no destructivos, para determinar algunos parámetros relacionados con la durabilidad del concreto, permitirá obtener mayor información, y así poder estimar un tiempo posible para que inicie el deterioro del concreto reforzado. Pudiendo además, implementar algún modelo que permita estimar el tiempo de vida útil de la estructura, o bien modelos para diseñar mezclas de concreto durable (Andrade, 2011). La resistividad eléctrica del concreto representa un procedimiento económico, sencillo de implementar, no es destructivo, y fácil de interpretar los sus resultados (Andrade, 2011). A través de la resistividad se pueden evaluar diversas condiciones del concreto, como: densidad, porosidad, contenido de humedad interna, su potencialidad en la velocidad de corrosión, y la posibilidad de correlacionarlo con la resistencia mecánica del concreto (Ramezani pour, 2011) (Tumidajski, 1996). Además, se considera que podría obtenerse información relacionada con los agregados y de cómo influye sus compuestos en la durabilidad del concreto.

Por lo anterior, el presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la influencia de los agregados con cloruros en la resistividad eléctrica de un concreto de alto desempeño, para lo cual se determinó la resistividad del concreto y sus características químicas de los materiales. Así como también, evaluar el desempeño futuro del concreto con respecto a su durabilidad, relacionada con la velocidad de corrosión que tendría el acero de refuerzo.

METODOLOGÍA

Se emplearon cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud, preparando 2 cilindros con mezcla de concreto que contenía el agregado triturado A, y dos más con el agregado triturado B. Se eligió esta cantidad de cilindros para la determinación de la resistividad, debido al tiempo que se

disponía para utilizar los equipos de medición de resistencia eléctrica; mientras que otras 2 probetas elaboradas del mismo tipo de mezcla, fueron empleadas para otros tipos de ensayos destructivos. En la tabla 1 se muestran las densidades de los agregados A y B, además de las cantidades de los materiales para cada mezcla. La resistencia a compresión especificada para las 2 mezclas fue de 400 kg/cm², empleando cemento portland puzolánico (CPP) comercial y empleado para estructuras en zona tropical marina. Además, se usaron dos tipos de aditivos para concreto: reductor de agua de alto rango a base de policarboxilato y sin contenido de iones cloruros; y aditivo plastificante como retardador de fraguado sin contenido de cloruros.

Previo a elaborar las mezclas, se realizaron los análisis químicos y físicos en los materiales primarios. La composición química y mineralógica del CPP, se determinó mediante los análisis de Florescencia de rayos X y el método de disolución sucesiva de fases, los valores determinados por la técnica de rayos X fueron comparados con las especificaciones de la norma mexicana (NMX-C-414-ONNCCE, 2017). Los parámetros característicos del cemento: módulo de finura, resistencia a compresión en pastas de cemento a los 3 y 28 días, y la resistencia a los sulfatos. El proceso se llevó a cabo según lo descrito en la norma mexicana (NMX-C-056, 2013) (NMX-C-061, 2015) (NMX-C-185, 2015). Los valores fueron comparados con los límites permitidos de la norma NMX-C-414.

Tabla 1. Características de las mezclas de concreto

	Mezcla I (con agregado A)	Mezcla II (con agregado B)
Cemento CPP 30R/RS (kg/m ³)	480	480
Humo de sílice (kg/m ³)	38.4	38.4
Relación a/c	0.32	0.32
Tamaño máximo del agregado (mm)	20	20
Densidad específica agregado grueso	2.38	2.01
Absorción del agregado grueso (%)	7	8

La determinación de la concentración de iones cloruro en los agregados pétreos A y B, y del CPP, se realizó según las normas (ASTM-D1411, 2009) y (ASTM-C1152, 2003) respectivamente. Para la medición de la concentración se utilizó la técnica de electrodos de ion selectivo, con un equipo potenciométrico Conductronic. La extracción de cloruros totales desde los materiales, fue realizado por medio de la solución de ácido nítrico (0.4M). En la figura 1 se muestra las imágenes del proceso metodológico, el cual consiste en: trituración y pulverización de las muestras de concreto por medio de un mortero con pistilo; mezcla de la muestra pulverizada con ácido nítrico en vaso de precipitación; filtración de la mezcla mediante un embudo y papel filtro whatman de porosidad media; calibración del equipo de medición con una solución estándar y medición de solución filtrada.

La resistividad eléctrica se determinó en los 4 cilindros de concreto durante un periodo de 28 días, empleando 4 procedimientos de medición con equipos diferentes. Durante el periodo de monitoreo de la resistividad, todos los cilindros de concreto estaban bajo agua.

El procedimiento I se realizó de acuerdo a la metodología para inspección de estructuras de concreto reforzado (O. Troconis, 1998), donde se utilizaron dos placas de acero inoxidable colocadas en los extremos de los cilindros, midiendo la resistencia eléctrica con el equipo Nilson 400 (ver figura 2a). La resistividad ($k\Omega\text{-cm}$) se determinó mediante la ecuación 1, donde R es la resistencia eléctrica ($k\Omega$), L la longitud del cilindro (cm) y A su sección transversal (cm^2).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (1)$$



Figura 1. Ilustración del proceso de extracción de iones cloruros y equipos empleados (Autoría propia).

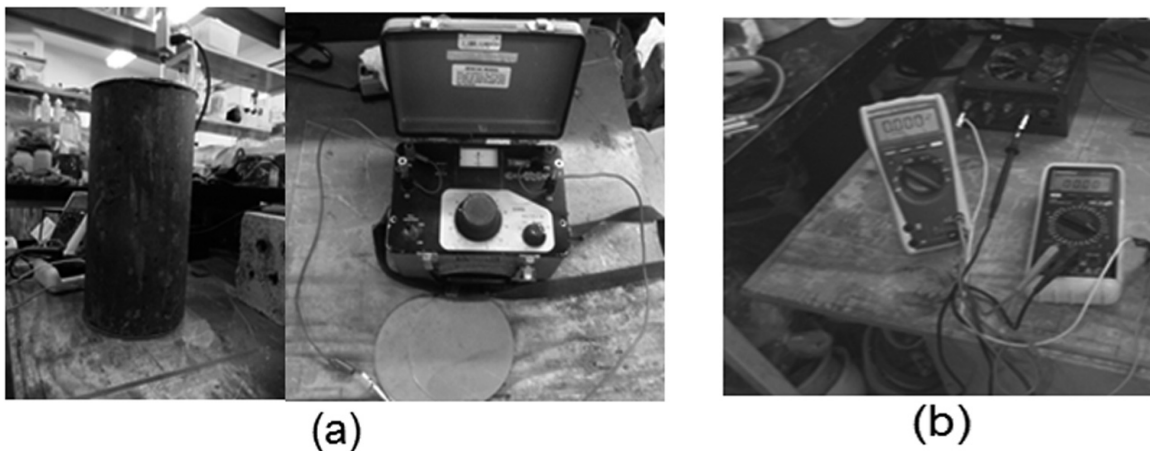


Figura 2. Ilustración (a) cilindro y equipo Nilson 400 con las placas de acero inoxidable. (b) Multímetro de alta impedancia y fuente de corriente alterna (Autoría propia).

El procedimiento II se procedió según la norma (UNE-83988-1, 2008), la cual consiste en aplicar una intensidad de corriente alterna (I) de 50 mA con una frecuencia de 500 Hz sobre una de las dos placa de acero inoxidable con esponjas húmedas, colocadas en los extremos del cilindro. Se registra el valor de potencial eléctrico (V) con un multímetro de alta impedancia (ver Figura 2b). Con los valores de I y V se determinó la resistividad eléctrica del concreto por medio de la ley de Ohm y el factor de configuración geométrica del cilindro, como el área (A) entre la longitud (L) (Ec. 2).

$$\rho = \left(\frac{V}{I}\right) \frac{A}{L} \quad (2)$$

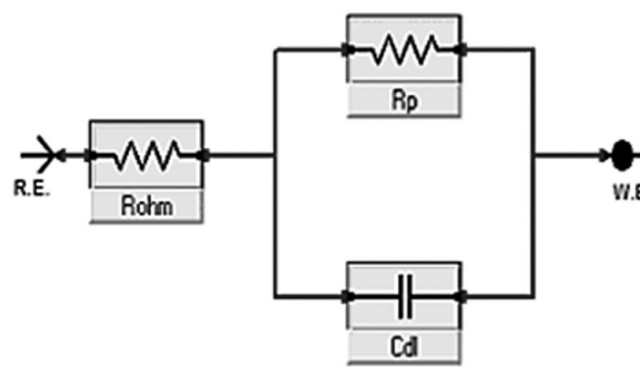
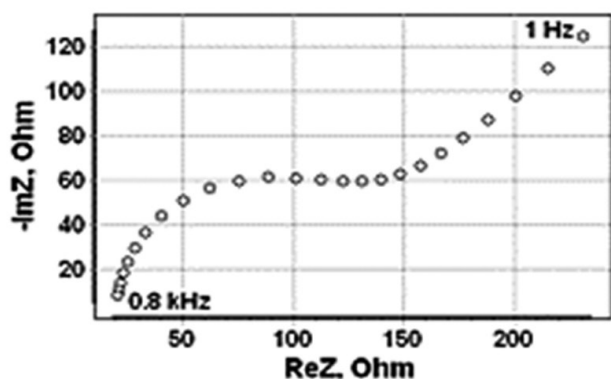


Figura 3. Diagramas de bode obtenidos con EIS y circuito Randles (Autoría propia).

El procedimiento IV se determinó la resistividad a través de la técnica de Wenner (de 4 puntas o electrodos) y empleando un equipo resistivímetro James Instruments. El proceso consiste en aplicar una corriente eléctrica de hasta 40 mA con frecuencia de 500 Hz, entre dos electrodos situados en los extremos y la medición del voltaje a través de otros dos electrodos situados entre los anteriores, los cuales deben estar alineados. Los electrodos son de acero inoxidable de 4 mm de diámetro acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. En cada electrodo se colocó una esponja individual humectada previamente por cada medición. Para este proceso se efectuaron 4 mediciones de resistividad en caras paralelas sobre la superficie del cilindro de concreto, posteriormente se obtuvo una resistividad promedio que fue registrada como la medida para un solo día.

El procedimiento III se utilizó la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), procediendo de acuerdo a lo descrito en la norma (ASTM-G3, 1989). Para la adquisición de los datos de potencial e intensidad de corriente, se dispuso de un equipo Potenciostato/Galvanostato (Gamry), con el cual se indujo una señal sinusoidal de corriente alterna con amplitud de 10 mV y un rango de frecuencia de 100 kHz hasta 10 mHz, a través de una par de placas de acero. Posteriormente, con los datos obtenidos del barrido, se realizó el análisis del diagrama de Bode con el software Zview (Figura 3), con el que se modeló el circuito equivalente de Randles para determinar la resistencia eléctrica y posteriormente la resistividad del concreto empleando la ecuación 1.

RESULTADOS

Caracterización química y física del cemento

La Tabla 2 muestra los resultados de Fluorescencia de rayos X y disolución sucesiva de fases, con los principales óxidos y minerales del cemento. Cabe destacar que el compuesto SO_3 que puede representar un riesgo para la durabilidad del concreto (S. Horkoss G. E., 2016), se encuentra por debajo de 4.0% especificada en la norma NMX-C-414. Por otro lado, la fase mineral con mayor cantidad es silicato tricálcico (C_3S), dando la característica principal del cemento de resistencia temprana, seguido por las fases de hierro-aluminato tetracálcico y el silicato dicálcico. Los resultados de los parámetros que caracterizan mecánicamente y de resistencia a los sulfatos del CPP, se muestran en la Tabla 3. Mostrando también sus

valores especificados y los métodos para las pruebas. Se observó que los resultados de las resistencias a compresión a 3 y 28 días, realizadas en cubos de pasta (cemento-agua), estuvieron por encima del valor mínimo especificado en las normas NMX-C-414. Igualmente en la prueba química de resistencia a los sulfatos, se obtuvieron valores inferiores a los especificados.

Tabla 2. Composición química y mineralógica del cemento CPP.

Compuesto químico	Resultados (%)	Fases minerales	Resultados
SiO ₂	20	C ₃ S (Alita)	65.6
Al ₂ O ₃	4.1	C ₂ S (belita)	7.9
Fe ₂ O ₃	4.6	C ₄ AF	13.9
CaO	63.5		
MgO	1.7		
SO ₃	2.5		
K ₂ O	0.4		

Tabla 3. Parámetros característicos del cemento CPP y las normas de prueba.

Parámetros	Resultados	Valores especificados NMX-C-414	Metodología NMX-
Módulo de finura (Blaine) (cm ² /g)	3818	-	C-056
Resistencia a los 3 días (N/mm ²)	27.9	Mínimo 20	C-061
Resistencia a los 28 días (N/mm ²)	43.6	Mínimo 30 – Máximo 50	C-061
Resistencia a los sulfatos (%)	0.054	Máximo 0.10	C-185

Concentración de iones cloruro en los materiales primarios y en el concreto

La Tabla 4 muestra los resultados de la técnica de ion selectivo, con las concentraciones de cloruro aportado por cada material de la mezcla de concreto. Además, se muestra la cantidad total de cloruros, para cada una de las mezclas, la cual resulta de la sumatoria de las aportaciones de cada material empleado. Estos valores fueron comparados con los criterios especificados en la normativa (ACI-222R, 2001), donde se indica que la concentración máxima permitida de Cl⁻ solubles en ácidos (ASTM-C1152, 2003), es de 0.10% por peso de cemento para concreto reforzado expuesto en condición húmeda; y 0.20% por peso de cemento para concreto reforzado expuesto en condición seca. En la Tabla 4 se observa que la mezcla I de concreto con el agregado A, obtuvo una concentración de 0.110%, siendo menor que la

mezcla II con 0.159%. Sin embargo, para los criterios especificados en el ACI, ambas mezclas no estarían aptas para estructuras expuestas en ambiente húmedo, pero serían idóneas para ambientes secos.

Con la finalidad de comparar las concentraciones de Cl⁻, mostradas en la Tabla 4, se determinó la concentración de Cl⁻ en el concreto endurecido. Para ello se analizaron muestras pulverizadas de cada cilindro de concreto. El resultado fue que el concreto con el agregado A, obtuvo una concentración de Cl⁻ de 0.140%, siendo mayor que el mostrado en la tabla 4 para la mezcla 1 con 0.110%.

Resistividad eléctrica

Proceso I: Doble placa y con el Nilson 400.

En la Figura 4 se muestran las gráficas de resistividad contra tiempo, obtenidas mediante el proceso de doble placa y con el equipo Nilson 400 para las dos mezclas. En dichas gráficas, se observa una diferencia clara entre las resistividades, siendo la mezcla I la que obtuvo mayores valores de resistividad comparada que la mezcla II. Dicho efecto se presentó desde el día 5 y se mantuvo en esa condición durante toda la etapa de medición. Los primeros 4 días no se registraron las medidas de resistividad por motivos de: su endurecimiento, desmolde y curado inicial del concreto.

Proceso II: Doble placa según UNE83988-método directo

En la Figura 5 se muestran las gráficas de resistividad de las 4 probetas cilíndricas, determinadas por el método directo descrito en la UNE 83988-1. Pudiendo observar un efecto similar como el que se presentó en el proceso I, mostrado en la Figura 4.

Tabla 4. Resultados de los contenidos de Cl⁻ en los materiales para el concreto.

Material	Peso del material kg/m ³	% Cl ⁻ por peso de material	Cloruro aportado kg/m ³
Cemento	480	0.01223	0.0587
Árido fino	866	0.04675	0.4049
Árido grueso B	686	0.07481	0.5132
Árido grueso A	686	0.02522	0.1730
Agua	181	255ppm	0.0462
Humo de sílice	38.4	-	0.0000
Total de Cl ⁻ por m ³ de concreto con agregado B (Mezcla II)			1.0230
Total de Cl ⁻ por m ³ de concreto con agregado A (Mezcla I)			0.6828
Concentración de Cl ⁻ del concreto de la mezcla II (%)			0.159
Concentración de Cl ⁻ del concreto de la mezcla I (%)			0.110

Proceso III: Técnica de EIS.

En la Figura 6 se muestran las gráficas de resistividad con respecto al tiempo, obtenidas mediante la técnica de EIS en los 4 cilindros. En las gráficas se observa la diferencia de las resistividades en las dos mezclas de concreto, desde el día 5 y se mantiene en esa tendencia para el tiempo subsecuente, pero a diferencia de los procesos I y II (Figura 4 y 5), con la técnica EIS se obtuvieron valores menores de la resistividad.

Proceso IV: Resistivímetro de 4 puntas.

En la Figura 7 se muestran las gráficas de resistividad de las 4 probetas, determinadas con un resistivímetro. Con este proceso, no se observó una clara diferencia de la resistividad entre ambas mezclas (Mezcla-1-A y Mezcla-1-B). Sin embargo, durante los primeros días, la resistividad de mezcla-I-A (alrededor de 40 kΩ-cm) fue mayor que la resistividad de las probetas con la mezcla I-B (alrededor de 20 kΩ-cm), manteniéndose entre estos valores durante 10 días, aproximadamente.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de la caracterización química del cemento, se puede decir que el compuesto que se consideraría potencial para el riesgo de corrosión y de su durabilidad, ya que la presencia de SO_3 influye en la resistencia mecánica e impacta en la resistencia a los sulfatos (S. Horkoss R. L., 2011) (S. Horkoss G. E., 2016). Sin embargo, el SO_3 con 2.5%, se encuentra por debajo del límite máximo especificado por la norma NMX-C₄14.

Como característica esencial de un cemento de resistencia inicial, la fase mineral de C_3S (65.6%) está en mayor proporción, comparados con el C_2S (7.9%) y el C_4AF (13.9%) (ver tabla 2). Sin embargo, debido a la cantidad de C_3S generará un endurecimiento rápido, incrementando la posibilidad de fisura si no se implementa un curado eficaz, repercutiendo así en la durabilidad del concreto (Barret, 2011). Por otro lado, de acuerdo con las resistencias a compresión a los 3 y 28 días del cemento (27.8 y 43.6 N/mm² respectivamente), y resistencia a los sulfatos (<0,10%);

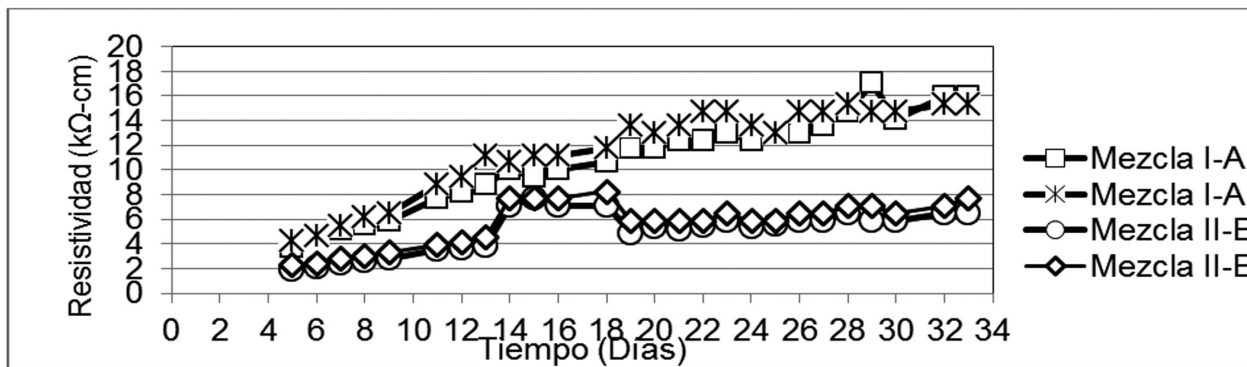


Figura 4. Resistividad del concreto con agregado A y B determinada por el proceso II, doble placa y equipo Nilson 400.

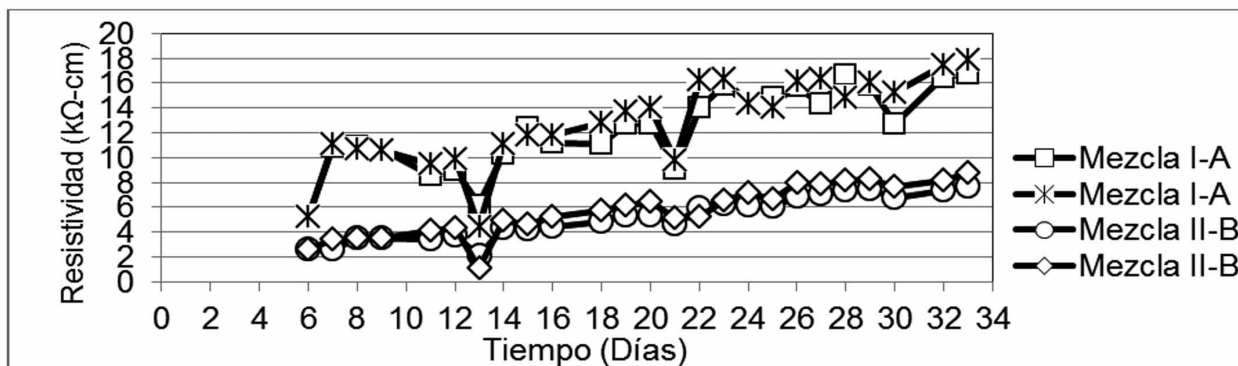


Figura 5. Resistividad del concreto con agregado A y B determinada por el método directo UNE 83988-1.

así como la concentración de iones cloruros en el cemento (Tabla 4), cumplen con los criterios establecidos en las normas y no representa un mayor riesgo para la durabilidad del concreto.

Sin embargo, las concentraciones de cloruros para la mezcla I y II, obtenidas al sumar las aportaciones de cada material, se pudo observar que los agregados pétreos son los que tienen una mayor incidencia en el contenido total de cloruros. Siendo el agregado B (0.0748%) quien aportó mayor contenido de cloruros, seguido por el agregado fino (0.04675%) y después el agregado grueso A (0.02522%). Estos valores son consistentes con las densidades específicas y de absorción para los agregados A y B, mostrados en la Tabla 1, ya que al presentar menor densidad el agregado B comparado con el A, aquel tendrá mayor porosidad, por lo tanto su capacidad de absorción y/o adsorción de los cloruros en la roca será mayor,

atribuyendo a que el agregado B tendrá mayor área superficial para que se adhiera o enlace iones cloruros en su composición química.

La comparación de los contenidos de Cl⁻ en el concreto de las mezclas I y II, resultaron ser mayores que los valores especificados en el ACI, correspondiente al concreto expuesto en ambiente húmedo. Sin embargo, ambas mezclas I y II pueden ser empleados para un ambiente de exposición seco. Algunos consideran que los cloruros se encuentran enlazados químicamente en la composición química del agregado y de la mezcla de concreto, no representan un riesgo para la durabilidad. Sin embargo, estos pueden ser liberados debido a los cambios fisicoquímicos que se presentan en la mezcla cementante, y entonces podrán participar en la ruptura de la capa pasiva del refuerzo para que se inicie la corrosión (G.K. Glass, 2000).

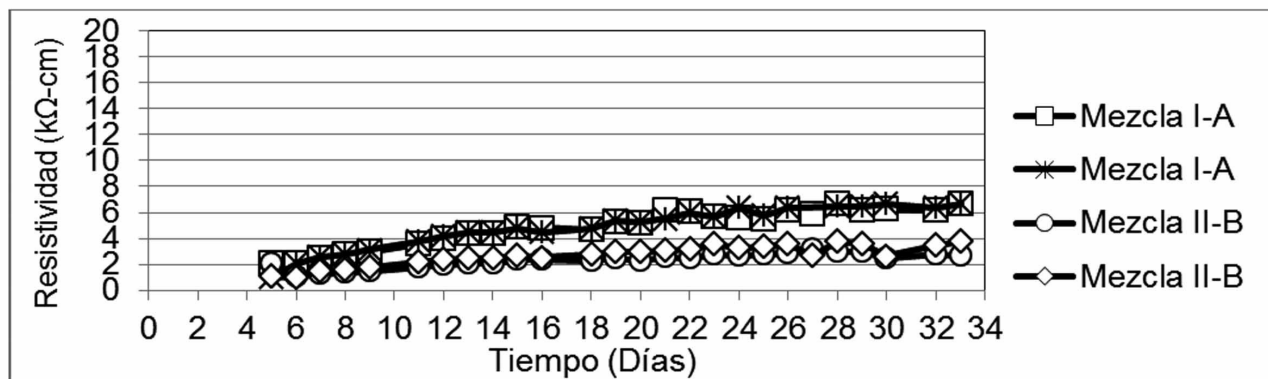


Figura 6. Resistividad del concreto con agregado A y B determinada por la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS).

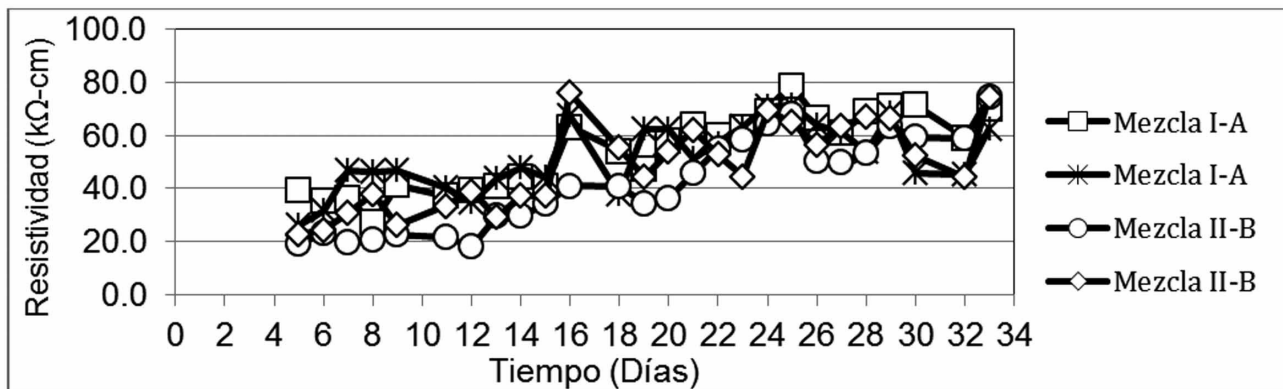


Figura 7. Resistividad del concreto con agregado A y B determinada por la forma directa con el resistímetro de 4 puntas.

Los resultados de la resistividad eléctrica determinada mediante los 4 procesos (Figuras 4, 5, 6 y 7), corroboran el efecto que puede representar el contenido de cloruro en el agregado y en el concreto. El cual puede influir en su desempeño por durabilidad, a través de la corrosión del acero de refuerzo. De manera general, se puede observar en 3 métodos que existe una diferencia clara de la resistividad entre las dos mezclas, siendo mayor en la mezcla I que en la mezcla II. Atribuyendo éste efecto por la mayor cantidad de cloruro en la mezcla II, con agregado B. Este efecto se puede explicar porque al haber mayor contenido cloruros en la solución del concreto, representará mayor conductividad iónica, disminuyendo de esta manera la resistencia eléctrica. Además, la porosidad del agregado B permitirá también que pueda haber mayor circular de la corriente al estar saturado, contribuyendo de esta manera en la disminución de la resistividad (Andrade, 2011).

Por otro lado, los valores de resistividad obtenidos con los 4 procesos, se puede percatar que entre el proceso I y II hay una similitud en sus valores. Sin embargo, no son semejantes con los procesos III y IV, aunque entre estos si tienen similitud entre sus valores. Este efecto se explica por la configuración de la celda de medición.

En base a los criterios de la Tabla 5, se puede decir que la mezcla I: de 14 kW-cm por el proceso I y 16 kW-cm por el proceso II a los 28 días, representaría un concreto que tendría moderada a baja velocidad de corrosión del acero. Mientras que la mezcla II, con 6 kW-cm por el proceso I y 8kW-cm por el proceso II, representaría un concreto que tendría una velocidad de corrosión alta. Para las resistividades de la mezcla I y II (3 y 6 kW-cm) determinadas por el proceso III, ambas mezclas generarían velocidades de corrosión alta; pero con el proceso IV las dos mezclas (60 y 67 kW-cm) serían de baja velocidad de corrosión. La diferencias entre los resultados evaluados, puede explicarse en base a la configuración de la celda de medición, ya que en los procesos: I, II y III, se considera la participación total del material de concreto para la determinación de la resistencia eléctrica, mientras que con el proceso IV solo considera la parte superficial hasta una profundidad de 5 cm aproximadamente. Sin embargo, los altos valores de resistividad obtenidos con el proceso IV, pueden deberse a un efecto de secado en la superficie del

concreto, atribuyendo posiblemente la misma causa de que no se observara diferencias, entre las resistividades de la mezcla I y II, como pasó con los otros métodos.

De manera general, dentro de los métodos para evaluar la durabilidad del concreto frente al proceso de corrosión del acero de refuerzo, la medida de la resistividad estaría orientado a la caracterización del estado de corrosión del acero de refuerzo y es un proceso no destructivo, mientras que los métodos de potencial de corrosión y resistencia a la polarización, se necesita perforar el recubrimiento de concreto para conectar un electrodo a la red del armado.

Tabla 5. Criterios de resistividad para concreto en condición de humedad (ASTM G57).

Resistividad $k\Omega$ - cm	Velocidad de corrosión
< 5	Muy alta
5 – 10	Alta
10 – 20	Moderada / baja
> 20	Baja

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos en la presente investigación, se presentan las siguientes conclusiones.

Con los datos de concentración de cloruros en los agregados, se observó que el agregado B de menor densidad, proporcionó mayor contenido de cloruros en el concreto de la mezcla II, que el agregado A utilizado en la mezcla I. Los contenidos de cloruros obtenidos en las mezclas I y II se pueden evaluar, según los criterios especificados en el ACI, como aptos para estructuras expuestas en ambientes secos.

La influencia de la calidad del agregado y la aportación de cloruros en la mezcla de concreto, queda evidenciado al observar las diferencias en la resistividad entre la mezcla I con el agregado A y la mezcla II con el agregado B. Siendo que la mezcla I, con menor contenido de cloruros, obtuvo valores de resistencia mayores que con la mezcla II, con mayor contenido de cloruros.

Los valores de la resistividad en el concreto, proporcionaron información con respecto a la velocidad de corrosión, la cual nos proporciona un indicio de la capacidad de durabilidad del concreto. Ya que la

evaluación de la resistividad obtenida mediante los procedimientos I, II y III, se tiene que para la mezcla I representaría una velocidad de corrosión moderada, y la mezcla II representaría velocidad de corrosión alta. Pero con el proceso IV, se obtienen resistividades más altas que los otros procedimientos, debiéndose esta diferencia a la configuración de la celda de medición.

Las conclusiones que se obtiene del presente trabajo, aplican para el caso de los agregados con contenido de cloruros, cualquier extrapolación a otros ambientes o materiales, deberá realizarse con cierta precaución.

REFERENCIAS

- ACI-222R. (2001). Protection of metals in concrete against corrosion. American Concrete Institute Committee.
- Aïtcin, P. A. (2003). The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 409-420.
- Andrade, C. R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, 1(2), 93-101.
- ASTM-C1152. (2003). Standard test method for acid soluble chloride in mortar and concrete.
- ASTM-D1411. (2009). Standard test methods for water soluble chlorides presents as admixtures in greded aggregate road mixes.
- ASTM-G3. (1989). Standard practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing.
- Barret, T. I. (2011). Reducing the risk of cracking in high volume fly ash concrete by using internal curing. Denver: World of Coal Ash Conference.
- G.K. Glass, B. R. (2000). The participation og bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete. *Corrosion Science*, 42(11), 2013-2021.
- Kim, G. K. (2016). Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound. *Materials and Structures*, 49(1-2), 399-409.
- Neville, A. (2001). Consideration of durability of concrete structures: past, present and future. *Materials nad structures*, 34(2), 114-118.
- NMX-C-056. (2013). Finura de los cementos hidráulicos (método de permeabilidad al aire.
- NMX-C-061. (2015). Resistencia a la compresión de cementos hidráulicos.
- NMX-C-185. (2015). Determinación de la expansión de barras de mortero de cemento sumergidas en agua.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2004). Industria de la construcción: cementos hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba.
- O. Troconis, A. R. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. México: Red DURAR. CYTED.
- Papadakis, V. C. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *Materials Journal*, 88(2), 186-196.
- Ramezaniapour, A. A. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and building materials*, 25(5), 2472-2479.
- S. Horkoss, G. E. (2016). The effect of the source of cement SO₃ on the expansion of mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 62-72.
- S. Horkoss, R. L. (2011). Influence of the clinker SO₃ on the cement characteristics. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 913-919.
- TP95, A. (2014). Standard method of test for surface resistivity indication of concrete ability to resist chloride ion penetration. AASTHO.
- Tumidajski, P. .. (1996). On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, 26(4), 539-544.
- UNE-83988-1. (2008). Durabilidad del hormigón: Método de ensayo determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo. Norma Española.