

# Determinación electroquímica de la corrosión en el hormigón armado en solución salina

Evaluation of corrosion in reinforced concrete cylindrical specimens

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: DICIEMBRE 18, 2012; ACEPTADO: FEBRERO 18, 2013

Ángel Villabona Ortiz  
[angelvillabona@yahoo.es](mailto:angelvillabona@yahoo.es)

Candelaria Tejada Tovar  
[candelariatejada@yahoo.com](mailto:candelariatejada@yahoo.com)

Yurley Paola Villabona Durán  
[ypvillabonad@gmail.com](mailto:ypvillabonad@gmail.com)

Universidad de Cartagena, Colombia

## Resumen

La presente investigación evalúa el comportamiento al ataque de la corrosión ocasionada por ion cloruro de sodio (NaCl) –presente en la solución salina–, en estructuras de hormigón armado, mediante la utilización de cuatro probetas cilíndricas de 30cm de altura y 15cm de diámetro, de las dos marcas de mayor circulación en el sector de la construcción en la ciudad de Cartagena (Colombia), con dos relaciones agua-cemento equivalentes a 3000 y 4000 PSI y tiempo de exposición de inmersión en la solución salina; se determinó el grado de corrosión utilizando el método electroquímico por medición de potencial eléctrico de corrosión  $E_{corr}$  y el método de resistividad eléctrica. De la medición del potencial eléctrico  $E_{corr}$  se encontró que, tanto para 3000 PSI como para 4000 PSI, el fenómeno de la corrosión se encuentra en estado activo para las dos marcas; sin embargo, la marca B presenta menor tendencia a la corrosión.

## Palabras Clave

Iones cloruros; potencial eléctrico; resistividad eléctrica; corrosión.

## Abstract

This study evaluates the performance of corrosion attack caused by ion sodium chloride (NaCl) in reinforced concrete structures present in saline. Which were developed for four cylindrical specimens 30cm in height and 15cm in diameter, two brands of cement found in the middle of the construction of general circulation in the city of Cartagena, two water-cement ratios equivalent to 3000 and 4000 PSI and exposure time of immersion in saline solution, was determined using the degree of corrosion by the electrochemical method of measuring electrical potential  $E_{corr}$  and corrosion resistivity. Measurement of the electric potential  $E_{corr}$  was found to 3000 PSI, the corrosion phenomenon is in active state both for brand A and brand B, with the lower mark B which presents corrosion tendency, so Similar to 4000 PSI, the same phenomenon is observed.

## Keywords

Chloride ions; electrical potential; electrical resistivity; corrosion.

## I. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las barras de refuerzo es una de las principales causas de la degradación del hormigón armado; su fuente principal, en ambientes marinos, es el ion cloruro, que causa graves daños a la estructura puesto que las barras de acero presentes dentro del hormigón son susceptibles a la corrosión al penetrar estos iones en la profundidad del acero (Jamil, Montemor, Boulif & Shriiri, 2003; Lee, Moon, & Swam, 2005; Ki-Yong & Ha-Won, 2007).

El proceso de corrosión de las estructuras de hormigón armado con frecuencia causa graves daños que terminan con la vida útil de una estructura (Vera, Villarreal, Delgado, Carvajal, & De Barbieri, 2009), especialmente los ubicados en ambientes agresivos marinos. El refuerzo en todas las estructuras proporciona seguridad a la construcción (Venkatesan, Palaniswamy, & Rajagopal, 2006). Cuando el acero se corroe en concreto, la sección transversal de la barra de refuerzo se hace más pequeña, reduciendo así la capacidad de carga del elemento de hormigón armado (Kondratova, Montes, & Bremner, 2003). Además, la presencia de la tensión mecánica en el acero, la presencia de iones agresivos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc), efectos atmosféricos por  $\text{CO}_2$  (carbonatación) o cualquier líquido que neutraliza la alcalinidad puede ser responsable de la degradación del metal (Vera et al., 2009), lo que conlleva al mantenimiento y a incurrir en altos costos de reparación (Trocónis-de-Rincón et al., 2007).

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica en el cual la zona anódica y catódica se crea en la superficie del metal en un material que actúa como un electrolito y cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para formar una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material en contacto con otro, para intercambiar electrones, y de un medio conductor. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y experimenta la reacción de oxidación; el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en donde se encuentran el ánodo y el cátodo, y permite el flujo de iones se conoce como electrolito (Fontana & Greene, 1967; Askeland & Phule, 2004).

Cuando se da el proceso de corrosión en el concreto, la sección transversal de la barra de refuerzo se hace más pequeña, reduciendo así la capacidad de carga del elemento de hormigón armado (Kondratova et al., 2003). En el

ambiente marino, el acero de refuerzo a la corrosión es el resultado natural de la penetración de cloruros en el hormigón, bajo estas condiciones, la despasivación de barras de acero puede conducir a la formación localizada de capas de óxido porosas en la interfase acero / concreto. Como las capas de óxidos de hierro tienen un volumen dos o cuatro veces mayor que el volumen de hierro, se pueden generar tensiones en el hormigón y crear fisuras que pueden causar una aceleración del proceso de corrosión en cuanto a las condiciones electroquímica en el cambio de interfaz (Poupard, L'Hostis, Catinaud, & Petre-Lazar, 2006).

Para detectar la carga negativa con la que resulta la armadura se usa el método de potencial, el cual puede emplearse para: definir las zonas en que se deben realizar más ensayos, para así poder determinar realmente el estado en que se encuentra la estructura y diseñar las medidas de protección catódica.

La interpretación de las medidas de potencial de corrosión se suele hacer calificando el riesgo de acuerdo con el criterio de la Norma ASTM C-876-09; este método permite medir el potencial de corrosión en diferentes puntos de la armadura y se completa trazando curvas equipotenciales; es un método rápido y económico, que puede además ser asociado a la resistividad del hormigón (Garcés, Climent, & Zornoza, 2008).

A lo largo de la historia del concreto reforzado se han encontrado pocos casos donde una estructura haya fallado debido a cargas mecánicas que no se consideraron en la fase de diseño. La normativa técnica ofrece suficiente información a la hora de dar una guía al ingeniero para diseñar una estructura adecuada para soportar todas las cargas mecánicas (Vera et al., 2009).

El proceso de corrosión en hormigón armado se presenta por la interacción entre el material y el ambiente. Con frecuencia es la causa de graves daños en la vida útil de una estructura, lo que, como se dijo, genera altos costos de mantenimiento y reparación de las estructuras (Trocónis-de-Rincón et al., 2007).

Por lo anterior, la corrosión inducida por craqueo de recubrimiento de hormigón es un problema importante y esencial en las estructuras de hormigón, ya que afecta directamente no sólo la durabilidad, sino también la vida de servicio de tales estructuras (Schueremans, Gemert, & Giessler, 2007).

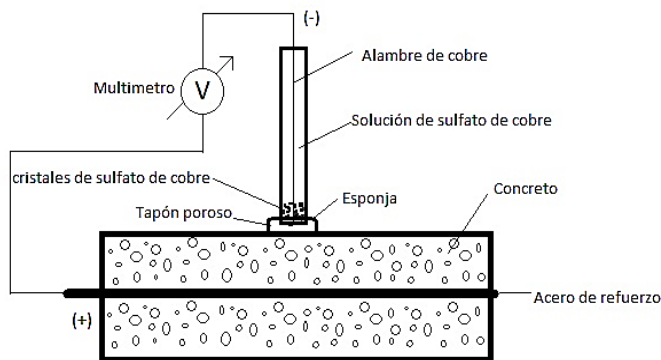
## II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del experimento se realizaron cuatro probetas cilíndricas de hormigón armado, utilizando las dos marcas de mayor circulación en la ciudad de Cartagena de Indias y a dos resistencias mecánicas (3000 y 4000 PSI), las cuales se sumergieron en una solución de cloruro de sodio durante 510 días.

El grado de la corrosión se evaluó mediante propiedades electroquímicas de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y la resistencia mecánica de las probetas de hormigón armado sumergidas en solución salina a 510 días después de la inmersión.

Las mediciones de potencial eléctrico de corrosión ( $E_{corr}$ ) se realizaron con un electrodo de referencia externo de Cobre-Sulfato de cobre ( $Cu/CuSO_4$ ), conectado a un multímetro de alta impedancia HIBOK 50B; los valores se interpretaron según la norma ASTM C-876 (ASTM, 2009) para así establecer en qué estado se encuentra la armadura, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Esquema ilustrativo de medición de potenciales de corrosión (Gundaker, 1996)



Para esto, se tuvo en cuenta que estos parámetros dependen de la cinética de las reacciones de corrosión; estas variaciones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del potencial de corrosión en voltios (Moreno, Requena, Morris, Álvarez, & Duffo, 2000)

$E_{corr}$	Criterio
$> -0,2 V$	Pasivo
$-0,2 a -0,35$	Cierta incertidumbre
$< -0,35 V$	Activo

Las mediciones de resistividad eléctrica se realizaron con un electrodo de referencia externo de Cobre-Sulfato de cobre ( $Cu/CuSO_4$ ), conectado a un multímetro de alta

impedancia HIBOK 50B y se calcularon a partir de los datos obtenidos del  $E_{corr}$  de acuerdo a la ecuación 1

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

Dónde:

- $\rho$ : resistividad eléctrica ( $\Omega cm$ )
- R: resistencia eléctrica ( $\Omega$ )
- A: área transversal ( $cm^2$ )
- L: longitud (cm)

Con base en los rangos estándar existentes para definir el valor de la resistividad eléctrica del hormigón, se empleó como criterio general el mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterio general de valores de resistividad eléctrica del hormigón (Mejía-Orellana & Peña-Estrella, 2010)

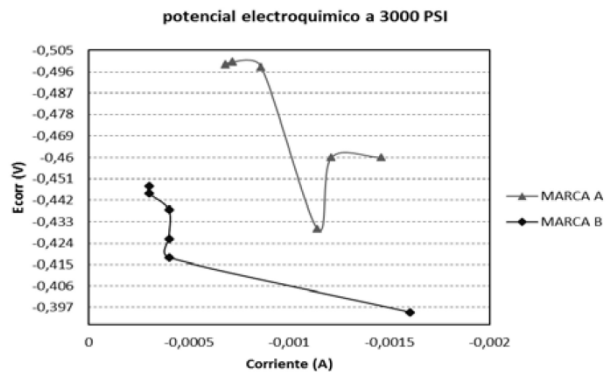
Valor	Criterio
$\rho > 200 k\Omega \cdot cm$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 k\Omega \cdot cm$	Riesgo moderado
$\rho < 10 k\Omega \cdot cm$	Alto riesgo

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

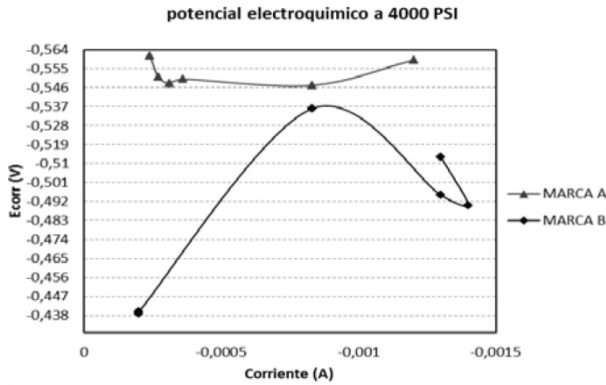
Para la determinación del potencial de corrosión, se construyó una curva de potencial Vs corriente eléctrica; se tomaron seis mediciones, tal como se relaciona a continuación.

Se realizaron ensayos de voltamperometría cíclica para determinar el intervalo de potenciales en que se encuentra la zona de pasividad. Las Figuras 2 y 3 muestran la variación del potencial eléctrico  $E_{corr}$  a 3000 y 4000 PSI de las probetas de las marcas A y B trascurridos 510 días de estar sumergidas en solución salina de cloruro de sodio con una pasivación a 200 mV durante 12 minutos.

Figura 2. Variación del potencial eléctrico (resistencia de 3000 PSI) para la relación agua/cemento 0.5 a 510 días



**Figura 3. Variación del potencial eléctrico (resistencia de 4000 PSI) para la relación agua/cemento 0.4 a 510 días**



Teniendo en cuenta la clasificación referida en la Tabla 1, donde se establecen los parámetros del potencial de corrosión, en la Figura 2, para 3000 PSI, se puede observar que el fenómeno de la corrosión se encuentra en estado activo tanto para la marca A, como para la marca B, sin embargo, la marca B es la que menor tendencia a la corrosión presenta; de manera similar en la Figura 3, para 4000 PSI, se observa el mismo fenómeno, la corrosión se encuentra en estado activo para ambas marcas, pero la marca B es la que menor tendencia a la corrosión presenta.

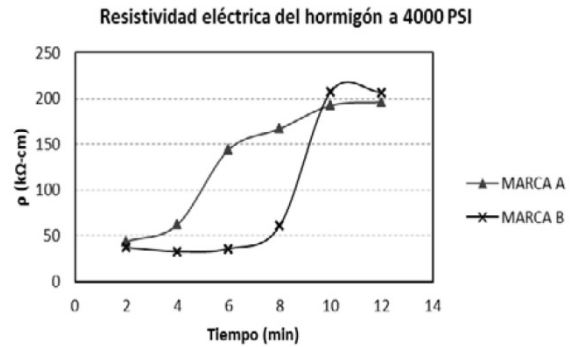
De igual forma, en los gráficos se pueden observar caídas de potencial; este comportamiento se puede interpretar como picaduras en la superficie de la varilla de refuerzo, debido que, al formarse una de ellas, se genera una zona anódica muy pequeña, en la cual se presenta una diferencia de potencial considerable, porque el área que está siendo corroída es menor con respecto al resto del material, que crea zonas activo-pasivas; de ahí estas caídas y la recuperación del Ecarr.

Para la determinación de la resistividad eléctrica, se construyó una curva de resistividad vs tiempo; se tomaron seis mediciones, tal como se relaciona a continuación. Las Figuras 4 y 5 muestran la variación de la resistividad eléctrica del hormigón a 4000 y 3000 PSI de las probetas de las marcas A y B trascurridos 510 días de estar sumergidas en una solución salina de cloruro de sodio con una pasivación a 200 mV durante 12 minutos.

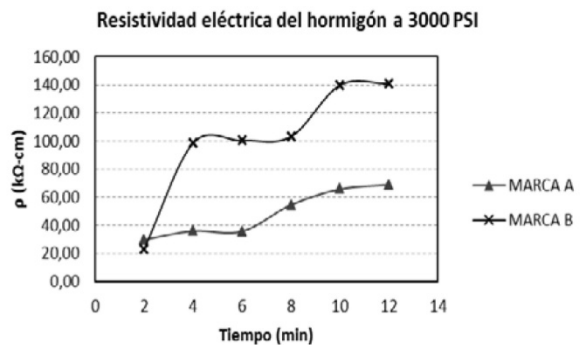
Teniendo en cuenta la clasificación referida en la Tabla 2, donde se establece el criterio general para la resistividad eléctrica del hormigón, en la Figura 4, para 4000 PSI, se puede observar que existe riesgo moderado del fenómeno de la corrosión para la marca A y que el comportamiento es similar para la marca B, que presenta riesgo moderado, aunque al final tiende a ser poco riesgo. En la Figura 5,

para 3000 PSI, se observa el mismo fenómeno, un riesgo moderado de corrosión para ambas marcas, con menor tendencia a la corrosión en la marca B.

**Figura 4. Variación de la resistividad eléctrica (resistencia de 4000 PSI) para la relación agua/cemento 0.5 a 510 días**



**Figura 5. Variación de la resistividad eléctrica (resistencia de 3000 PSI) para la relación agua/cemento 0.4 a 510 días**



#### IV. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las mediciones obtenidas del potencial eléctrico Ecarr, se concluye que para resistencias de 3000 PSI el fenómeno de la corrosión se encuentra en estado activo, tanto para la marca A como para la marca B, siendo la marca B la que presenta menor tendencia a la corrosión. De manera similar, se observa que para resistencias de 4000 PSI, la tendencia se mantiene para ambas marcas, siendo la marca B la que presenta menos propensión a la corrosión.

Independiente de la relación agua / cemento, las probetas sumergidas por 510 días en solución salina presentaron potenciales de corrosión y voltajes de corrosión negativos, por lo tanto, las corrientes de corrosión en el acero son bastante representativas para indicar el riesgo por corrosión del sistema en estudio; además, el funcionamiento del electrodo es adecuado para

determinar si las estructuras de hormigón armado presentan problemas de corrosión causados por distintos factores.

La variación de la resistividad eléctrica del hormigón a 3000 y 4000 PSI de las probetas de las marcas A y B trascurridos 510 días de sumergidas en solución salina de cloruro de sodio permite concluir que para 4000 PSI existe poco riesgo del fenómeno de la corrosión tanto para la marca A como para la marca B, manteniendo una tendencia similar. Para 4000 PSI, se observa el mismo fenómeno, existe poco riesgo de corrosión para ambas marcas, siendo la marca B la que menor tendencia a la corrosión presenta.

## V. REFERENCIAS

- Askeland, D. & Phule, P. (2003). *Ciencia e ingeniería de los materiales* [4a ed.]. México D.F., México: International Thomson
- ASTM International (2009). *ASTM C876 - 09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM
- Fontana, M. & Greene, N. (1967). *Corrosion engineering*. New York, NY: McGraw-Hill
- Garcés, P., Climent, M. A., & Zornoza, E. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de Hormigón Armado*. Alicante, España: ECU
- Gundaker, E.F. (1996). *Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects* [ponencia en 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE-International, The National Association of Corrosion Engineers, September 9-13, Rio de Janeiro, Brazil.
- Jamil, H., Montemor, F., Boulif, R., & Shrii, A. (2003). An electrochemical and analytical approach to the inhibition mechanism of an amino-alcohol-based corrosion inhibitor for reinforced concrete. *Electrochimica Acta*, 48(23), 3509-3518
- Ki-Yong, A., & Ha-Won, S. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosionscience*, 49(11), 4113-4133
- Kondratova, I., Montes, P., & Bremner, T. (2003). Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs. *Cement & Concrete Composites*, 25(4-5), 483-490
- Lee, S., Moon, H., & Swam, Y. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. *Cement & Concrete Composites*, 27(1), 65-76
- Mejía-Orellana, V. & Peña-Estrella, J. (2010). *Determinación de la Resistencia y Resistividad Eléctrica de Probetas de varios Diseños de Hormigón sometidas a Ataques de Contaminantes* [Proyecto de grado]. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral [ESPOL]
- Moreno, Requena, Morris, Álvarez, & Duffo. (2000). Corrosión de armaduras en hormigones de altas prestaciones. En *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000*, (pp. 775-782). Disponible en <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/0817.PDF>
- Poupard, O., L'Hostis, V., Catinaud, S., & Petre-Lazar, I. (2006). Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 504-520.
- Schueremans, L., Gemert, D. V., & Giessler, S. (2007). Chloride penetration in RC-structures in marine environment – Long term assessment of a preventive hydrophobic treatment. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1238-1249
- Trocónis-de-Rincón, O. et al. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: Duracon project/CYTED. *Corrosion Science*, 49(7), 2832-2843.
- Venkatesan, P., Palaniswamy, N. & Rajagopal, K. (2006). Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment. India. *Progress in Organic Coatings*, 56(1), 8-12

Vera, R., Villarreal, M., Delgado, D., Carvajal, A. M., & De Barbieri, F. (2 de junio de 2009). Duración: influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. *Revista de la Construcción*, 8(1), 13-23

## CURRÍCULOS

*Candelaria Tejada Tovar*. Candidata a Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Cartagena (Colombia). Magíster en educación, Universidad del Norte (Colombia). Especialista en Química analítica, Universidad de Cartagena. Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander (Colombia). Profesora de tiempo completo del programa de ingeniería química y docente del grupo de investigación GIPIQ de Ingeniería Química (Universidad de Cartagena). Línea de investigación: corrosión en ambientes marinos, remoción de metales en efluentes industriales. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Procesos Ambientales y Biotecnológicos en el Programa de Ingeniería Química de Universidad de Cartagena.

*Ángel Villabona Ortíz*. Candidato a Magíster en Ingeniería Ambiental y Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Químico de la Universidad industrial de Santander. Profesor de tiempo completo del Programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena. Actualmente coordina la especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la Universidad de Cartagena y trabaja en corrosión en ambientes marinos; además, se encuentra adelantando proyectos para el uso de biomasas para el tratamiento de aguas oleosas y trabaja en la búsqueda de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas.

*Yurley Paola Villabona Durán*. Ingeniera Química de la Universidad de Cartagena, trabajó en la línea de investigación de corrosión en ambientes marinos. Joven investigador patrocinado por Colciencias en el área de síntesis de nanopartículas para la modificación de biomateriales.