

# Aplicación de protección catódica en el laboratorio a los morteros de escoria activada alcalinamente y al Portland ordinario sometidos a un ambiente marino<sup>1</sup>

## Application of Cathodic Protection at the Laboratory in AAS and OPC Mortar Under a Marine Environment<sup>2</sup>

## Aplicação de proteção catódica no laboratório às argamassas de escória ativada alcalinamente e ao Portland ordinário, submetidos a um ambiente marinho<sup>3</sup>

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<77:APCMEA>2.3.TX;2-U

*William Aperador-Chaparro<sup>4</sup>*  
*Arnoldo Emilio Delgado-Tobón<sup>5</sup>*  
*Jorge Hernando Bautista-Ruiz<sup>6</sup>*

<sup>1</sup> Fecha de recepción: 21 de enero de 2011. Fecha de aceptación: 5 de octubre de 2011. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Corrosión en concretos armados novedosos*, desarrollado por los grupos de investigación Davinci y Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, y de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, respectivamente. La investigación contó con el apoyo de Colciencias en el marco del proyecto Geoconcrete.

<sup>2</sup> Submitted on January 21, 2011. Accepted on October 5, 2011. This article is the result of the research project *Corrosion in novel reinforced concrete*. Developed by the research groups Davinci, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia; and Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. The Project was supported by Colciencias within the Project Geoconcrete.

<sup>3</sup> Data de recepção: 21 de janeiro de 2011. Data de aceitação: 5 de outubro de 2011. Este artigo deriva do projeto de pesquisa denominado *Corrosão em concretos armados inovadores*, desenvolvido pelos grupos de pesquisa Davinci e Grupo de Pesquisa em Tecnologia Cerâmica da Universidade Militar Nueva Granada, Bogotá, Colômbia, e da Universidade Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colômbia, respectivamente. A pesquisa contou com o apoio de Colciencias dentro do projeto Geoconcrete.

<sup>4</sup> Físico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Doctor en Ingeniería de los Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Docente de tiempo completo, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: william.aperador@unimilitar.edu.co.

<sup>5</sup> Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Docente de tiempo completo, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: arnoldo.delgado@unimilitar.edu.co.

<sup>6</sup> Licenciado en Física y Matemáticas y Máster en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Profesor, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Correo electrónico: jbautistaruz@yahoo.es.

### Resumen

El artículo estudia la respuesta electroquímica del fenómeno corrosivo causado por el ingreso del ion cloruro y, posteriormente, la aplicación de la protección catódica sobre el acero embebido en morteros de escoria activada alcalinamente (AAS) y Portland ordinario tipo I (OPC). El estudio electroquímico se realizó mediante potencial de media celda, resistencia a la polarización lineal y espectroscopía de impedancia electroquímica. Se encontró que los morteros de escoria activada alcalinamente mejoran notablemente la resistencia a la corrosión del acero cuando se aplica protección catódica. Usando espectrometría de Mössbauer, se identificaron las diversas especies de óxidos e hidróxidos de hierro. Del estudio se concluye que en las superficies de los aceros embebidos en morteros AAS y OPC se encuentran los mismos tipos de óxidos e hidróxidos de hierro, al igual que los productos de corrosión (magnetita  $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ , Wüstite  $[\text{Fe}^2+\text{O}]$  y goethita  $(\text{Fe}^3+\text{O}[\text{OH}])$ ).

### Palabras clave

Protección catódica, efecto Mössbauer, espectroscopía de Mossbauer, aniones.

### Abstract

This paper analyzes the electrochemical response of the corrosive phenomenon caused by the entry of the chloride ion and, later, with the application of cathodic protection on steel embedded in mortar activated slag (AAS) and ordinary Type I Portland (OPC). The electrochemical study was performed by using half-cell potential, LPR and EIS. It was found that activated slag mortars were significantly activated thus improving the corrosion resistance of steel when cathodic protection is applied. By using Mössbauer spectroscopy, we identified the various types of iron oxides and hydroxides. The study shows that the same types of iron oxides and hydroxides are found on the surfaces of the steel embedded in AAS and OPC, as well as the corrosion products (magnetite  $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ , Wüstite  $[\text{Fe}^2+\text{O}]$  and goethite  $(\text{Fe}^3+\text{O}[\text{OH}])$ ).

### Keywords

Cathodic protection, Mössbauer effect, Mossbauer spectroscopy, anions.

### Resumo

O artigo estuda a resposta eletroquímica do fenômeno corrosivo causado pela entrada do íon cloro e, posteriormente, a aplicação da proteção catódica sobre o aço embebido em argamassa de escória ativada alcalinamente (AAS) e Portland ordinário tipo I (OPC). O estudo eletroquímico realizou-se mediante potencial de meia célula resistência à polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica. Encontrou-se que as argamassas de escória ativada alcalinamente melhoram notavelmente a resistência à corrosão do aço quando se aplica proteção catódica. Usando espectrometria de Mössbauer, identificaram-se as diversas espécies de óxidos e hidróxidos de ferro. Do estudo conclui-se que nas superfícies dos aços embebidos em argamassas AAS e OPC encontram-se os mesmos tipos de óxidos e hidróxidos de ferro, assim como os produtos da corrosão (magnetita  $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ , Wüstite  $[\text{Fe}^2+\text{O}]$  e goethita  $(\text{Fe}^3+\text{O}[\text{OH}])$ ).

### Palavras chave

Proteção catódica, efeito Mössbauer, espectroscopia de Mossbauer, anions.

## Introducción

Los morteros de escoria activada alcalinamente son una mezcla de escoria molida granulada, agregados finos y solución alcalina (silicato de sodio) en la cantidad requerida para la mezcla. Estos han sido y son objeto de estudio por parte de un gran número de investigadores (Caijun, 1996). Este tipo de material presenta ventajas tecnológicas y económicas frente a los morteros de cemento Portland (OPC) tradicionales, por ejemplo, menor calor de hidratación, baja permeabilidad, mayor resistencia a las altas temperaturas, mayor resistencia al ataque químico, mayores resistencias mecánicas, entre otras. De igual forma, presentan algunas desventajas como un fraguado más rápido, mayor formación de microfisuras y variabilidad en resistencias (Caijun y Jueshi, 2000).

El concreto reforzado es uno de los materiales para construcción más versátiles, por sus propiedades en servicio, por su gran variedad de aplicaciones y por su bajo costo; sin embargo, el acero de refuerzo en este tipo de estructuras es susceptible a corroerse y a disminuir considerablemente la vida útil del material compuesto mortero-acero (Holloway, y Sykes, 2005; Puertas, 1995).

La corrosión en el acero de refuerzo es una de las causas más probables del deterioro de las estructuras de concreto. En los concretos Portland, los iones cloruro libre desencadenan corrosión por picado. Estos atacan directamente la capa pasiva del acero e impiden que pueda regenerarse (Wenger, Galland y Lemoine, 1987; Cairns, Duy y Law, 2007). El estudio de la corrosión de los aceros embebidos en concretos de activación alcalina y la posterior protección catódica es novedoso y no se han realizado investigaciones de este tipo.

Con frecuencia se han promocionado las estructuras de concreto armado como construcciones con una vida en servicio ilimitada y con mínimas exigencias de mantenimiento. Sin embargo, en ciertas circunstancias especialmente desfavorables, esto deja de ser cierto, pues existen algunos factores de corrosión capaces de *despasivar* al acero embebido en el concreto, lo que da lugar a velocidades de corrosión que pueden plantear serios daños en pocos años (González et ál., 1996).

Es el caso de los tableros de puentes contaminados con sales de deshielo (Newton y Sykes, 1989), de las plataformas *offshore* (Brownea y Blundell, 1972) o de las estructuras expuestas a climas cálidos en ambientes marinos. En estas condiciones los deterioros conducen a la adopción de medidas preventivas, de costosas reparaciones o incluso a la demolición, en pocos años, dependiendo de que se hayan realizado inspecciones a tiempo, a destiempo o excesivamente tarde.

Cuando los daños afectan una parte importante de la estructura, el procedimiento convencional de reparación implica eliminar el hormigón contaminado con cloruros hasta detrás de las armaduras, su limpieza en todo su perímetro, el reemplazo del concreto afectado y la aplicación de algún tipo de protección que evite nuevas reparaciones (Hackerman, 1987). El proceso es muy caro, así como nocivo para los trabajadores y para el entorno ambiental. Agrava la magnitud del problema la importancia técnica, económica y social del sector de la construcción, uno de los que más contribuye a establecer el grado de bienestar de una sociedad.

Este artículo pretende dar a conocer las propiedades electroquímicas de un acero embebido en mortero de activación alcalina cuando es sometido a condiciones de cloruros y luego se aplica protección catódica. Los valores encontrados se compararon con los obtenidos en morteros basados en OPC, expuestos a las mismas condiciones agresivas. Se midió el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), la resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ) mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), a diferentes tiempos de exposición a un máximo de 84 días; adicionalmente, se identificaron y cuantificaron los óxidos de hierro de las barras de acero embebidas en una matriz cementicia de escoria activada alcalinamente. Esta evaluación se realizó mediante la técnica de espectrometría de Mössbauer.

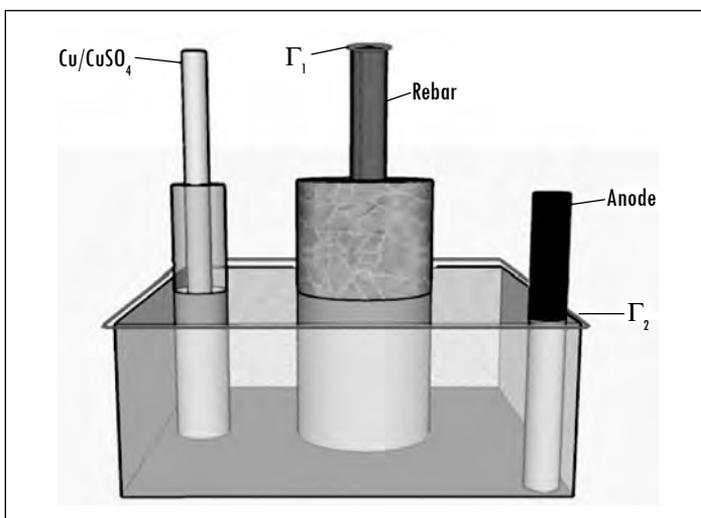
## 1. Metodología

Para el desarrollo de la investigación, como cementantes se escogió una escoria siderúrgica colombiana de alto horno con una composición química del 33,7% de  $\text{SiO}_2$ , 12,8% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 45,4% de  $\text{CaO}$ , 0,5% de  $\text{TiO}_2$  y 1% de  $\text{MgO}$ . Los coeficientes de basicidad ( $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) y de calidad ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ ) son 1,0 y 1,73, respectivamente. Como activador alcalino se utilizó una solución de silicato de sodio a una concentración del 5% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , expresado como porcentaje en peso de escoria. Los agregados finos utilizados corresponden a una arena de río con densidad de  $2470 \text{ kg/m}^3$  y absorción del 2,9%. Las mezclas OPC utilizaron cemento Portland comercial sin ningún aditivo. La fabricación de las mezclas de con-

creto en ambos casos contenía una dosificación de material cementante de  $400 \text{ kg/m}^3$ . Se asumió que las relaciones de agua-cemento y solución agua + activante/escoria son equivalentes, en ambos casos dicha relación fue de 0,4 (Torres-Gómez et ál., 2010).

Para las medidas electroquímicas se produjeron cilindros de 12,5 mm de diámetro por 25 mm de alto, con una varilla de acero 1018 colocada en el centro de la probeta. El diámetro del acero de refuerzo es de 6,15 mm. Se empleó una celda compuesta por un contraelectrodo de acero inoxidable, un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , y como electrodo de trabajo se utilizó el acero estructural ASTM A 706 (Torres-Gómez et ál., 2010) con un área expuesta de  $10 \text{ cm}^2$ . El montaje de protección catódica es el mostrado en la figura 1. En esta se representa un tanque plástico en dos dimensiones, la corriente impresa aplicada sobre el contraelectrodo (AISI 304 SS) en cada uno de los casos fue de  $55 \times 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$ .

Figura 1. Representación del montaje del diseño utilizado en protección catódica

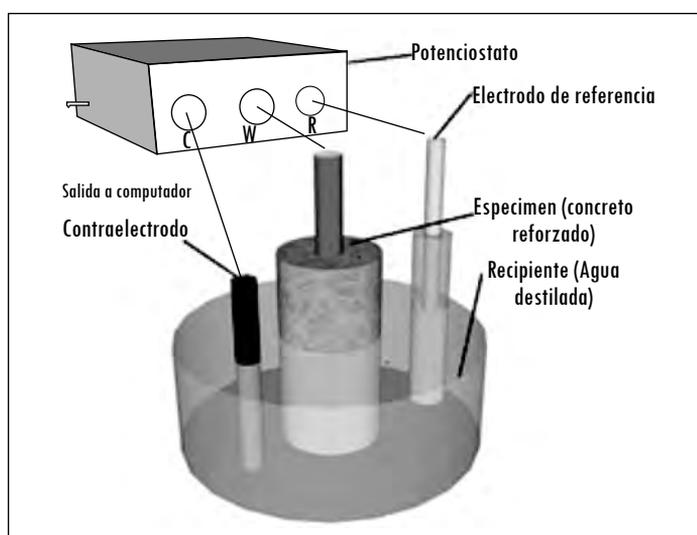


Fuente: presentación propia de los autores.

La caracterización electroquímica se realizó en un potenciostato/galvanostato Gamry modelo PCI 4, mediante las técnicas de potencial de circuito abierto, resistencia a la polarización lineal y EIS, empleando una celda compuesta por un contraelectrodo de grafito, un electrodo de referencia de  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ; entre tanto, como electrodo de trabajo se utilizó el acero estructural ASTM A 706 (Astm a706/a706m-09b, 2009) con un área expuesta de  $10 \text{ cm}^2$ .

Todas las pruebas electroquímicas se realizaron bajo inmersión en una solución de agua destilada. La figura 2 esquematiza el montaje de la prueba. Las pruebas de resistencia a la polarización lineal (LPR) se realizaron aplicando un pequeño potencial externo ( $\pm 20$  mV), alrededor del potencial de circuito abierto. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron realizando barridos de frecuencia en el rango de 100 kHz a 0,01 Hz, empleando una amplitud de la señal sinusoidal de 10 mV. La medida de potencial de circuito abierto se realizó en un tiempo de 12.000 segundos hasta que se llegó a su estabilización. Las medidas para el mortero de escoria activada alcalinamente (AAS) y cemento de Portland ordinario se realizaron en un lapso de siete días. Las probetas se sometieron a un proceso de corrosión durante 42 días, inmersas en una solución de NaCl al 3,5%. Luego de los 42 días se realizó la protección catódica durante 42 días posteriores.

Figura 2. Esquema del montaje experimental para las mediciones electroquímicas



Fuente: presentación propia de los autores.

Para las medidas de potencial de circuito abierto se aplicó la norma ASTM C876 (ASTM c876-09, 2009): la norma referenciada indica la probabilidad de corrosión en función del potencial de corrosión para este tipo de investigaciones.

Los espectros de Mössbauer se midieron mediante un arreglo típico de espectrometría Mössbauer de  $^{57}\text{Fe}$ . Como fuente Mössbauer se utilizó una pastilla de  $^{57}\text{Co}$  en una matriz de rodio, la cual decae radiactivamente a  $^{57}\text{Fe}$ . Debido a que en el proceso radiactivo de la fuente de  $^{57}\text{Co}$  se emiten distintos tipos de radiación, se tiene la posibilidad de dos modalidades de trabajo en la espectro-

metría de Mössbauer: de transmisión o de reflexión y en cada una de ellas se obtiene información diferente. En esta investigación se utilizó espectroscopía de Mössbauer de transmisión (EMT) (NACE Standard rp0290-90, 1990).

## 2. Resultados

### 2.1. Potencial de corrosión

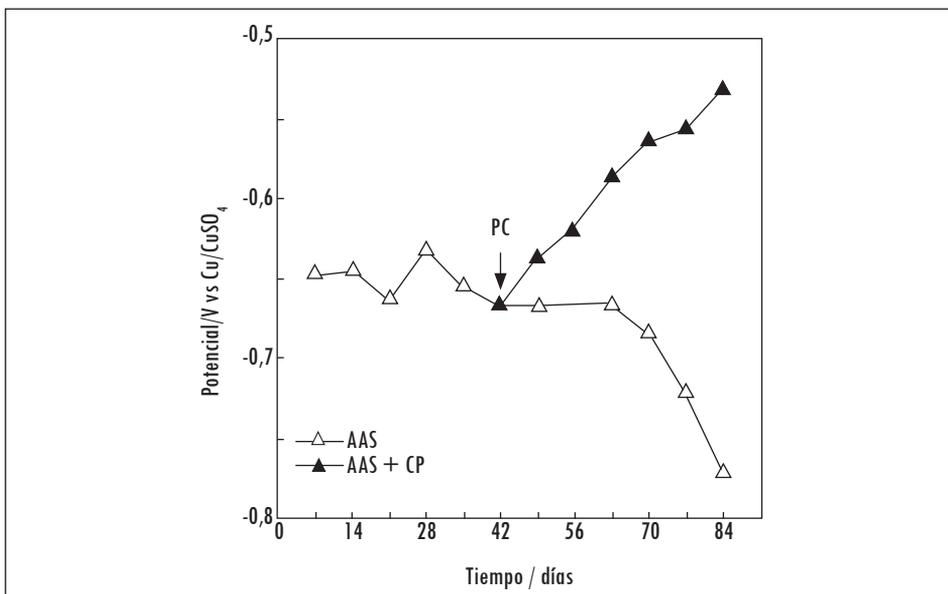
En la figura 3 se observa que los morteros AAS generan bajos valores de potencial de corrosión, lo cual indica que todos los sistemas analizados están en una alta probabilidad de corrosión; sin embargo, a los veintiocho días este comportamiento cambia, lo que puede deberse al taponamiento de poros que evita el ingreso de los iones agresivos. Luego de los veintiocho días se observa una nueva disminución de este parámetro y se vuelve a la tendencia inicial (Torres-Gómez, et ál., 2010).

Se realizó el seguimiento del potencial de corrosión luego de los 42 días en las mismas condiciones planteadas, a efectos de comparación. Otras probetas se dejaron sumergidas en la misma solución (3,5% de NaCl) y se les aplicó protección catódica con los criterios establecidos por la NACE (Rodríguez et ál., 2008), la cual aconseja que el potencial aplicado debe estar entre -0,85 y 1,2 V vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>.

En la figura 3 se visualiza el seguimiento del potencial de corrosión. El efecto de la protección catódica cambia la tendencia, debido a que el potencial se incrementa hacia potenciales más nobles del orden de -500 a -600 mV en promedio. En principio, ello indica que los morteros AAS pueden estar presentando pasivación igual que en el caso contrario a los 42 días, que el potencial tiende a mantenerse, por lo que todos están por debajo de los 350 mV, lo que indica están en el 90% de probabilidad de corrosión.

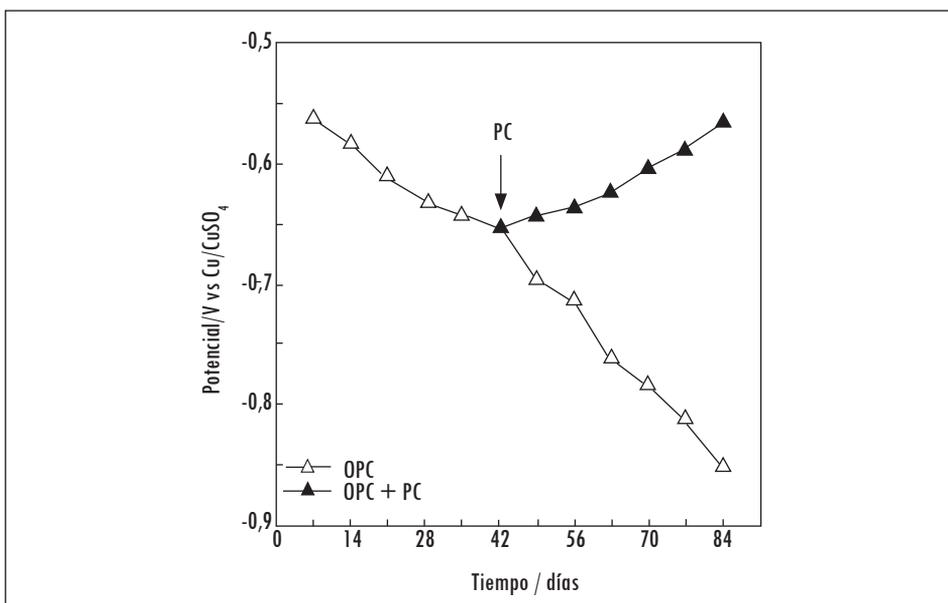
Los morteros OPC sometidos a NaCl (figura 4) muestran una tendencia similar a la descrita para la AAS. Se puede observar que los sistemas OPC, sometidos a una solución con cloruro tienden a generar potenciales de corrosión cada vez menores. Esta tendencia se observa hasta el final de las mediciones, aunque el mortero OPC muestra un leve aumento y una constante en el potencial en los últimos niveles de evaluación. Sin embargo, es muy pequeño este valor; se observa que se trata de estabilizar luego de los veintiocho días de evaluación. En la figura 4 se muestra el efecto de la protección catódica, que cambia la tendencia del OPC sometido a cloruro hasta los 42 días, debido a que el potencial se incrementa hacia potenciales más nobles del orden de -550 a -650 mV en promedio. Ello indica que los morteros AAS presentan una mayor rapidez de pasivación. Sin embargo, ambos morteros se encuentran en una zona de alta probabilidad de corrosión.

Figura 3. Potencial de corrosión de los concretos AAS con y sin protección catódica



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 4. Potencial de corrosión de los concretos OPC con y sin protección catódica



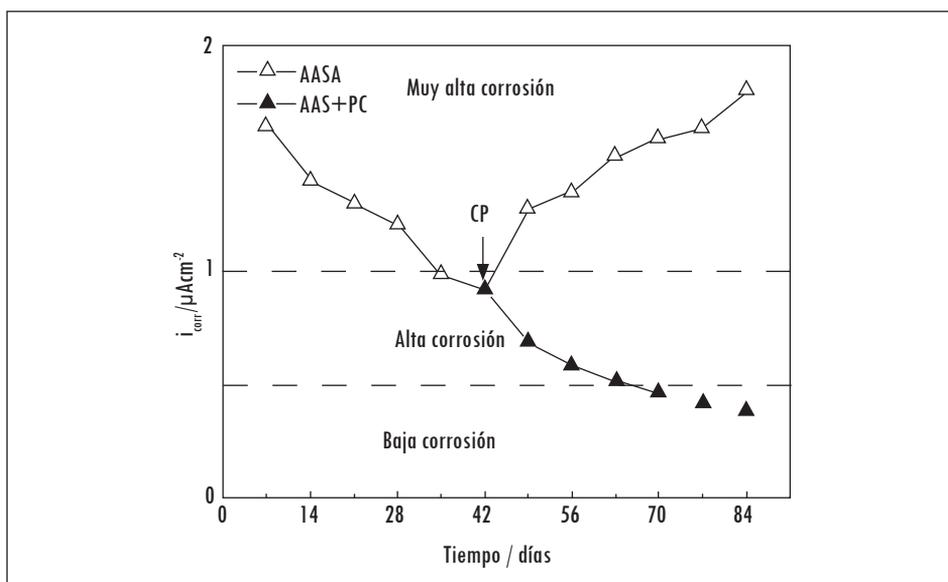
Fuente: presentación propia de los autores.

## 2.2. Resistencia a la polarización

En la resistencia a la polarización se aplican sobrepotenciales de  $\pm 20$  mV. Esta técnica es ampliamente utilizada por su rapidez y se caracteriza principalmente, porque no perturba al sistema por hallarse en el límite de  $E_{\text{corr}}$ . La pendiente de la curva es la medida directa de la resistencia que ofrece la interfase metal solución al paso de la corriente.

En la figura 5 se muestran los valores de resistencia a la polarización hallado por medio de la técnica LPR. Aquí se observa un valor alto en la densidad de corrosión para el mortero AAS, sometido a una solución con cloruro en todos los tipos de evaluación. El mismo comportamiento se presenta al aplicar la técnica de potencial de corrosión. Luego de los 42 días la densidad de corrosión aumenta en función del tiempo, debido a que la corriente de corrosión es una función inversa a la resistencia de la polarización.

Figura 5. Resistencia a la polarización y densidad de corriente de los aceros embebidos en morteros AAS con y sin protección catódica



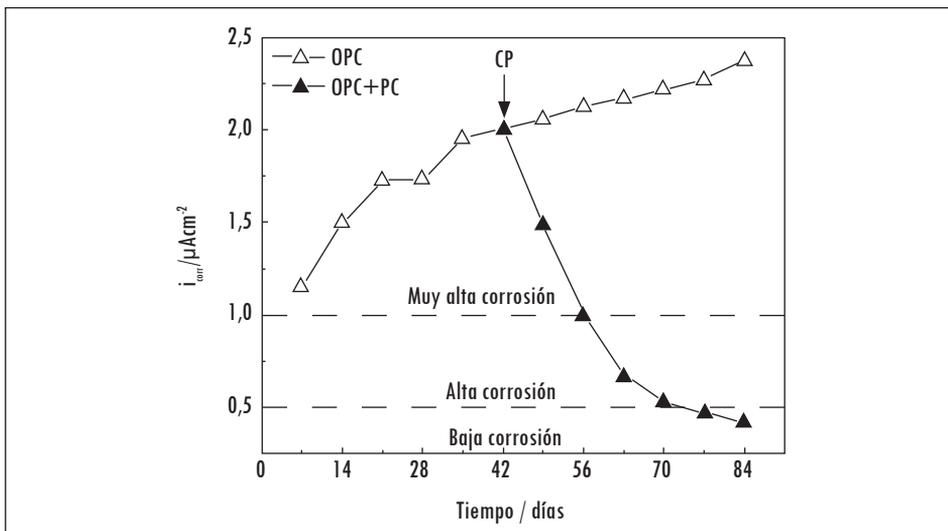
Fuente: presentación propia de los autores.

Se encuentra que, según el criterio de protección establecido por la NACE para el OPC y comparado para el mortero AAS sometido a cloruro, tiene desde el inicio un alto valor de densidad de corrosión, y este sigue aumentando pasando de un nivel conocido como alta corrosión a muy alta corrosión. Al aplicar la

protección catódica, este comportamiento varía, debido al cambio de tendencia en todas las medidas realizadas. El comportamiento protector generado por la protección catódica lleva a niveles de baja corrosión, luego de los setenta días de exposición en una solución de NaCl al 3,5%.

En la figura 6 se observa el mortero OPC con protección catódica y sin esta, respectivamente. Cuando este tipo de mortero es sometido a soluciones que contienen cloruro, su resistencia a la polarización disminuye considerablemente, debido a que muestran el mismo comportamiento desde el inicio del ensayo. La similitud en el comportamiento se debe a la desestabilización de la capa protectora del acero por contacto con la solución de trabajo. Cuando las probetas se someten a una solución con cloruro, la capa se encuentra más comprometida y ello genera menores valores de resistencia a la polarización.

Figura 6. Resistencia a la polarización y densidad de corriente de los aceros embebidos en morteros OPC con y sin protección catódica



Fuente: presentación propia de los autores.

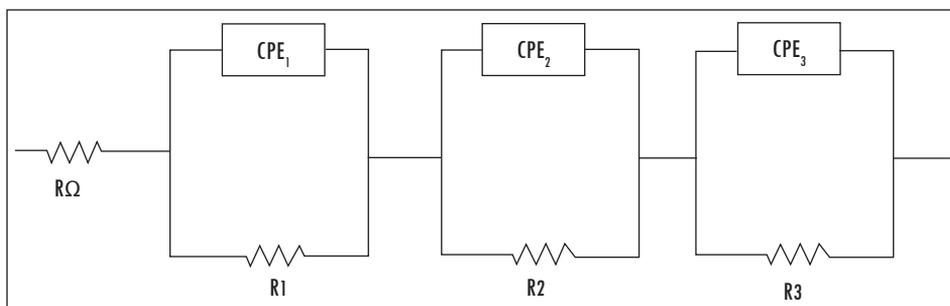
Posterior a los 42 días se obtiene que, frente a la corriente de corrosión, los morteros OPC sometidos a una solución con cloruro generan, en cada caso, un aumento en el valor de esta y se pueden ubicar en una región de muy alta corrosión. Por lo tanto, se esperan los mayores valores de velocidad de corrosión para el caso de los morteros sometidos a la solución con cloruro. Con protección catódica se observa que la corriente de corrosión disminuye; pero

los valores son altos, debido a que están en el rango de alta corrosión. Al evaluar los comportamientos de los OPC frente a los AAS, se observa que existe una mejora en el desempeño para los AAS, por la tendencia de este mortero a mantenerse con bajos valores de corrosión. En cuanto al OPC, su tendencia es permanecer en altos valores de corrosión, causados por la densificación de la matriz y generar mayor cantidad de poros permeables.

### 2.3. Espectroscopía de impedancia electroquímica

Mediante la técnica EIS se determinó la respuesta electroquímica de los morteros de una forma más precisa. El circuito de la figura 7 muestra una primera resistencia asociada a la solución de poro del mortero a altas frecuencias (100 kHz). Luego se encuentra un CPE y una resistencia asociada a los primeros elementos que se detectan en el concreto en su parte externa. Tales elementos pueden deberse a las reacciones generadas o absorción superficial de algunas de las especies al ingreso del  $\text{CO}_2$ . A frecuencias intermedias es posible encontrar otros elementos como un CPE y una resistencia asociados a la zona de transición interfacial pasta-agregados, que constituyen el mortero. En el dominio de bajas frecuencias se encuentran los procesos de transferencia de carga y transferencia de masa, correspondientes a la última R y al CPE, respectivamente. Estos elementos se ubican en la zona interfacial relacionados con el concreto y el acero.

Figura 7. Esquema del circuito equivalente empleado en el ajuste de los datos de impedancia del acero embebido en los morteros AAS y OPC

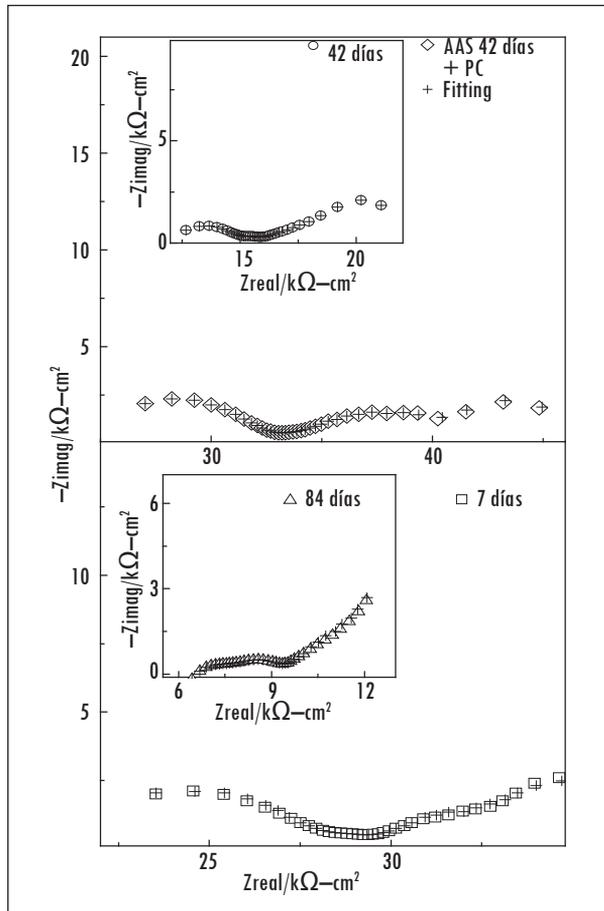


Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 8 se observan los diagramas de Nyquist correspondientes a los 7 y 42 días para el mortero inmerso en una solución con contenido de cloruro. El valor de las resistencias involucradas en cada uno de los sistemas empieza a disminuir, debido a su desplazamiento hacia la parte izquierda. Se puede observar que el parámetro más importante para este estudio disminuye considerablemente,

lo que indica su bajo desempeño electroquímico cuando ha sido sometido a cloruro durante más de cuarenta días. En la figura 8, se compara el comportamiento del mortero AAS expuesto a cloruro con protección catódica y sin esta. En la parte superior se observa el comportamiento del mortero sin protección catódica; en la parte inferior muestra el comportamiento del mortero con la protección catódica. Se observa que el ingreso del ión cloruro de forma continua genera una disminución en los parámetros encontrados; sin embargo, si se aplica la protección catódica, se ve claramente la evolución de las propiedades electroquímicas, dado el aumento de los valores de impedancia. Ello indica que el desempeño electroquímico se puede mejorar con la aplicación de la protección catódica y generar sistemas con mejores propiedades.

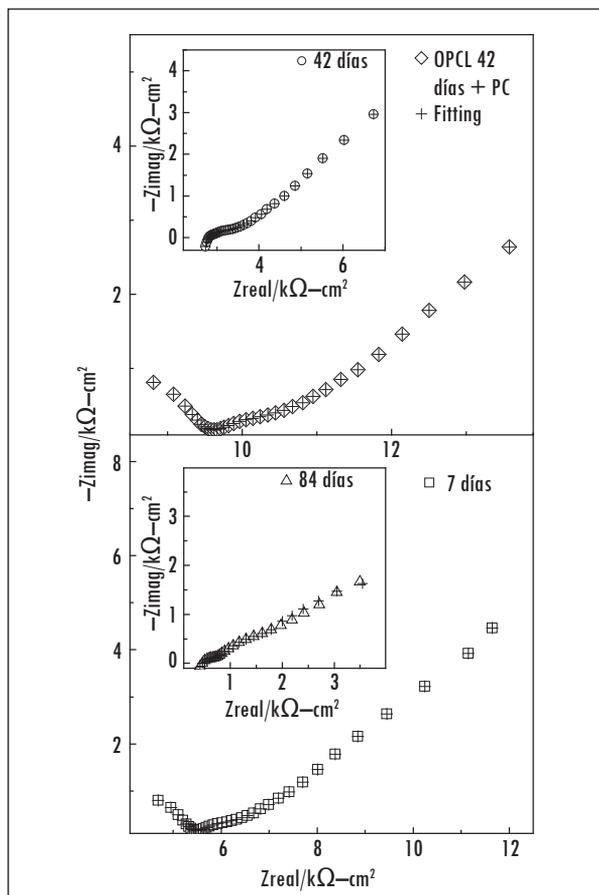
Figura 8. Diagramas de Nyquist del mortero AAS sometido en cloruro, con y sin protección catódica



Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 9 se observa un comportamiento similar al obtenido en los morteros AAS. Los parámetros hallados para el OPC inmersos en una solución con cloruro muestran una disminución de sus resistencias involucradas en el sistema, lo que genera un material más vulnerable electroquímicamente. Su valor de resistencia a la polarización disminuye gradualmente. Ello establece en los últimos niveles (84 días) una estabilización, debido a una mínima variación. Se muestra el OPC con cloruro que ha generado un desempeño equivalente al AAS. Se compara el efecto a los 42 días, tiempo en el que se le aplicó la protección catódica y se observa cómo las curvas cambian de sentido, por el efecto protector. Para el ASS se visualiza un aumento en los valores de impedancia del sistema en cada uno de los niveles. Sin embargo, los mejores comportamientos se presentan para el concreto AAS.

Figura 9. Diagramas de Nyquist del mortero OPC sometido en cloruro, con y sin protección catódica

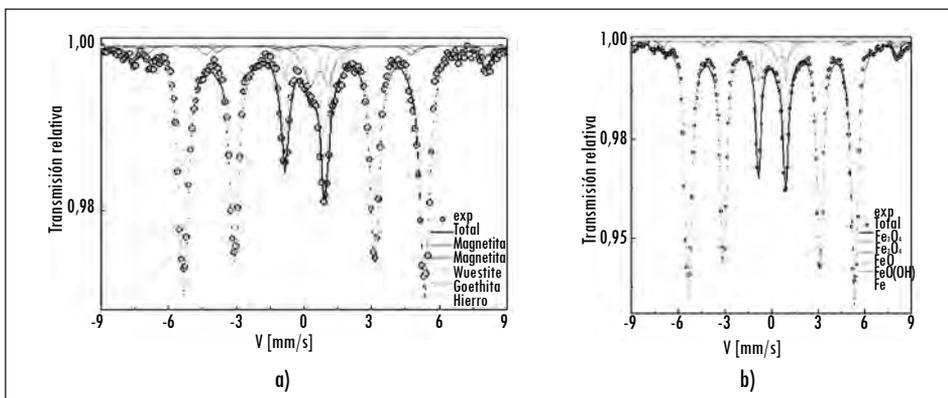


Fuente: presentación propia de los autores

### 2.4. Análisis de Mössbauer

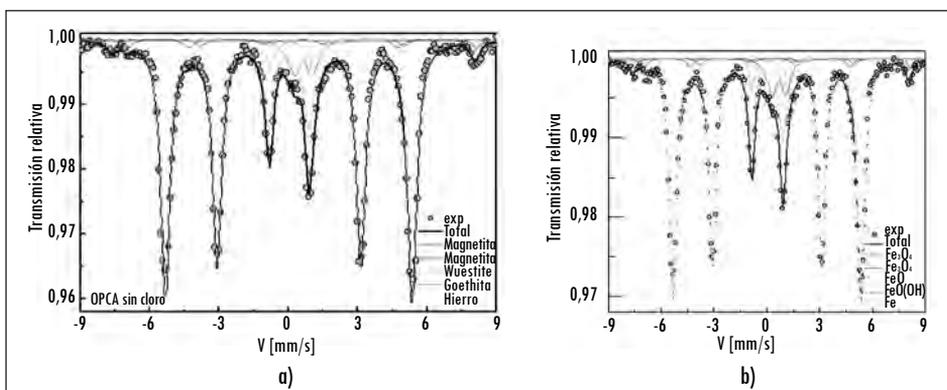
En las figuras 10 y 11 se presentan los espectros de Mössbauer a temperatura ambiente de las diferentes probetas evaluadas. La muestra AAS y la OPC se sometieron a iones cloruro (figuras 10a y 11a); posteriormente, se aplicó protección catódica (figuras 10b y 11b), y para obtener el mejor ajuste de los espectros de Mössbauer se utilizaron tres sextetos y dos dobletes. Dos de los sextetos, ajustados con campos magnéticos hiperfinos (Bhf) 48,3 y 46,8 T; desdoblamiento cuadrupolares ( $\Delta$ ), cero para ambas, y desvíos isoméricos ( $\delta$ ) de 0,17 y 0,57 mm/s, respectivamente, se atribuyen a una fase espinela de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{-xO}_4$ ) o posible combinación de  $\text{Fe}_3\text{-xO}_4$ /maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). El otro sexteto se ajustó con parámetros, Bhf = 32,9 T;  $\Delta$  = -0,015 mm/s y  $\delta$  = 0,00 mm/s, se atribuye a una fase de Fe. Para uno de los dobletes se encontró  $\Delta$  = 1,67 mm/s y  $\delta$  = 0,02 mm/s, correspondiente a la presencia de  $\text{Fe}^{2+}\text{O}$ . En cuanto al otro doblete se encontró  $\Delta$  = 0,78 mm/s y  $\delta$  = 0,84 mm/s, correspondiente a la presencia de  $\text{Fe}^{3+}\text{O (OH)}$ . Para el AAS sin cloruro se tienen los mismos sextetos y dobletes; los campos hiperfinos se ajustaron con los mismos parámetros que el AAS y OPC con cloruro. El sexteto se ajustó con parámetros Bhf = 32,9 T;  $\Delta$  = -0,013 mm/s y  $\delta$  = 0,00 mm/s se atribuye a una fase de Fe. Para uno de los dobletes se encontró  $\Delta$  = 1,54 mm/s y  $\delta$  = 0,02 mm/s, correspondiente a la presencia de  $\text{Fe}^{2+}\text{O}$ . En cuanto al otro doblete se encontró  $\Delta$  = 0,78 mm/s y  $\delta$  = 0,52 mm/s, correspondiente a la presencia de  $\text{Fe}^{3+}\text{O (OH)}$ .

Figura 10. Espectro de Mössbauer correspondiente al AAS: a) con exposición a ión cloruro y b) aplicando protección catódica



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 11. Espectro de Mössbauer correspondiente al OPC: a) con exposición a ión cloruro y b) aplicando protección catódica



Fuente: presentación propia de los autores.

En la tabla 1 se registran los porcentajes de los productos de corrosión de los AAS y los OPC expuestos a soluciones con ión cloruro y posteriormente aplicando protección catódica. Los productos hallados en las dos situaciones son similares; pero con la diferencia en que en cada uno de los productos de corrosión ha aumentado el porcentaje, debido al ingreso del ión cloruro en el material compuesto, que disminuye el porcentaje de Fe en la muestra analizada. En los dos mecanismos analizados (OPC y AAS) se observa que al aplicar la protección catódica, los productos de corrosión han disminuido, esto es debido al efecto protector generado por la corriente suministrada, la cual atenúa el efecto de degradación. Adicionalmente, al contrastar los dos morteros se observa que los que presentan mayor tendencia a generar mayor cantidad de productos de corrosión son los OPC, esto debido a su alta permeabilidad (Caijun y Jueshi, 2000).

Tabla 1. Relación de áreas del espectro de Mössbauer de los productos hallados para las muestras AAS sometidas a exposición de solución con ión cloruro y posterior aplicación de protección catódica

Fase (%)	AAS ion cloruro	AAS + PC	OPC ion cloruro	OPC + PC
Magnetita	5,96	4,40	9,07	5,83
Wüstite	6,85	5,10	5,01	3,18
Goethita	9,45	9,28	14,02	13,01
Hierro	77,44	81,23	71,90	77,98

Fuente: presentación propia de los autores.

La información arrojada por la técnica de Mössbauer muestra que sobre la superficie del acero de refuerzo embebido en el concreto AAS se encontraron óxidos e hidróxidos de hierro en todas las muestras analizadas; además se estableció la formación de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), wüstite ( $\text{Fe}^{2+}\text{O}$ ) y goethita ( $\text{Fe}^{3+}\text{O}[\text{OH}]$ ) como principales productos de corrosión. Otros productos como lepidocrocite y hematita son hallados con menor intensidad, esto posiblemente por el bajo porcentaje de estos hidróxidos presentes en la muestras analizadas; también debido a la mezcla con el hierro, debido a que poseen parámetros similares (Rodríguez et ál., 2008; Pérez, 2007).

### 3. Conclusiones

La inclusión de aceros estructurales en la matriz de mortero con alto nivel de alcalinidad (pH mayor a 13) genera una película pasiva de comportamiento similar a los concretos basados en el cemento Portland. Lo anterior significa que matrices de escoria siderúrgica activada alcalinamente presentan un excelente desempeño.

Se determinó la protección que este tipo de matriz brinda al acero estructural, por medio de las medidas electroquímicas, potencial de corrosión, LPR y EIS, las cuales generaron un índice del tiempo de iniciación del proceso corrosivo para las condiciones dadas (medio corrosivo). Luego se estableció el efecto de la protección catódica en ambos sistemas AAS y OPC, que generó una mejor protección en un medio corrosivo con presencia del ion cloruro en el mortero AAS. Este resultado es de gran importancia en la utilización de la ingeniería de protección catódica para disminuir la energía utilizada en estructuras de concreto AAS.

En las superficies de los aceros embebidos en concretos AAS y OPC e inmersos en soluciones con ion cloruro y posterior aplicación de protección catódica se encuentran los mismos tipos de óxidos e hidróxidos de hierro, al igual que los productos de corrosión (magnetita [ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ], Wüstite [ $\text{Fe}^{2+}\text{O}$ ] y goethita [ $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ]). Además, se determinó un aumento considerable en los productos de corrosión cuando los morteros OPC y AAS son sometidos a ataque del ion cloruro, y cuando se aplica PC, se evidencia el efecto protector, debido a la disminución de los productos de corrosión.

## Referencias

- ASTM A706/A706M-09b. *Especificación normalizada para barras de acero de baja aleación lisas y corrugadas para refuerzo de concreto*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2009.
- ASTM C876-09. *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2009.
- BROWNEA, R. D. y BLUNDELL, R. The behavior of concrete in prestressed concrete pressure vessels. *Nuclear Engineering and Design*. 1972, pp. 429-475.
- CAIJUN, S. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, pp. 1789-1799.
- CAIJUN, S. y JUESHI, Q. High performance cementing materials from industrial slags. *A review Resources, Conservation and Recycling*. 2000, vol. 29, pp. 195-207.
- CAIRNS, J.; DUY, Y. y LAW, D. Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interphase. *Construction and Building Materials*. 2007, vol. 22, pp. 190-197.
- GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; GONZÁLEZ, M. N. y FELIU, S. A. On-site determination of corrosion rate in reinforced concrete structures by use of galvanostatic pulses. *Corrosion Science*. 2001, vol. 43, pp. 611-625.
- GONZÁLEZ, J. A. et ál. Some questions on the corrosion of steel in concrete—Part I: when, how and how much steel corrodes. *Materials and Structures*. 1996, vol. 29, núm. 1, pp. 40-46.
- HACKERMAN, N. The theory and practice of corrosion and its control in industry. *Langmuir*. 1987, vol. 3, pp. 922-927.
- HOLLOWAY, M. y SYKES, J. M. Studies of the corrosion of mild steel in alkali-activated slag cement mortars with sodium chloride admixtures by a galvanostatic pulse method. *Corrosion Science*. 2005, vol. 47, pp. 3097-3110.
- KOLEVA, D. A. et ál. Quantitative characterisation of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack. *Corrosion Science*. 2006, vol. 48, pp. 4001-4019.
- NACE Standard RP0290-90. 1990. Item No. 53072.
- NEWTON, J. G. y SYKES, J. M. A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete. *Corrosion Science*. 1989, vol. 28, pp. 1051-1057.
- PÉREZ F. et ál. Caracterización de herrumbres en procesos de corrosión de aceros en inmersión total. *Revista Colombiana de Física*. 2007, vol. 39, pp. 83-86.
- PUERTAS, F. Cementos de escoria activados alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro. *Materiales de Construcción*. 1995, vol. 45, pp. 53-64.
- RODRÍGUEZ, R. R.; PÉREZ-ALCÁRAZ, G. A.; SÁNCHEZ, H. y GRENECHE, J. M. Milling time effects on the magnetic and structural properties of the Fe<sub>70</sub>Si<sub>30</sub> system. *Microelectron Journal*. 2008, vol. 39, pp. 1311-1313.

TORRES-GÓMEZ, R. et ál. Estudio de la corrosión del acero embebido en concreto AAS sometido a cloruros. *Dyna*. 2010, vol. 164, pp. 5259.

WENGER, F.; GALLAND, J. y LEMOINE, L. Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment. *EUROCOR 87*, Karlsruhe, Germany. 1987, pp. 245-252.