

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO AAS SOMETIDO A CLORUROS

STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS CONCRETE UNDER CHLORIDES

ROBINSON TORRES GÓMEZ

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia metalurgico@colombia.com

WILLIAM APERADOR

Ingeniería Metraconica, Universidad militar nueva granada. william.aperador@escuelaing.edu.co

ENRIQUE VERA

Escuela de Metalurgia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ

Escuela de Materiales, Universidad del Valle

CÉSAR ORTIZ

Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Recibido para revisar Marzo 31 de 2009, aceptado Junio 17 de 2009, versión final Junio 22 de 2009

RESUMEN: Se presenta un estudio sobre el comportamiento frente a la corrosión de barras de acero de refuerzo de un concreto de escoria activado alcalinamente. La escoria de alto horno fue activada mediante el uso de silicato sódico al 5% obteniéndose un material con buenas propiedades cementantes. Las probetas de concreto fueron fabricadas a partir de este cemento, después de mezclar con los agregados fueron reforzadas con barras de acero sismo-resistente ASTM-A706. Las probetas de concreto reforzado estuvieron sometidas en ambientes contaminados con iones cloruro para simular condiciones marinas. La evaluación electroquímica se realizó aplicando las técnicas de resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Se logra determinar el comportamiento de la capa pasiva del acero y electroquímico del metal cuando está inmerso en estos materiales cerámicos novedosos.

PALABRAS CLAVE: Acero sismo-resistente, corrosión, concreto de escoria activada alcalinamente, LPR, EIS.

ABSTRACT: A study about the corrosion behavior of reinforcement steel bars in alkali activated slag concrete is presented. The blast furnace slag was activated with sodium silicate at 5%, obtaining a material with good cementing properties. The concrete specimens were manufactured with this cement, after mixing with the aggregates were reinforced with ASTM A706 resistant-seism steel bars. The reinforced concrete specimens were immersed in chloride ions contaminated environments to simulate marine conditions. The metal electrochemical evaluation was accomplished with linear polarization resistance (LPR) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques. Was determined the steel passive film behavior and the electrochemical metal behavior when are immersed in these ceramic innovative materials.

KEYWORDS: Resistant-seism steel, corrosion, alkali activated slag concrete, LPR, EIS.

1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de la industria de la construcción a nivel mundial y el propósito de suministrar materiales cada vez más económicos, que contribuyan con el sostenimiento del medio ambiente, ha tenido lugar el desarrollo de materiales novedosos para la producción de concretos con mejores desempeños mecánicos y de durabilidad.

Estos concretos alternativos se obtienen por la mezcla de diferentes clases de minerales y/o subproductos industriales, que en ocasiones no cumplen las especificaciones para ser clasificados como materias primas. Un tipo específico de dichos cementos es el obtenido a partir de escorias siderúrgicas de alto horno activadas alcalinamente. Se han estudiado sus propiedades mecánicas y los diferentes productos de hidratación formados durante la fabricación de morteros. [1-5] No obstante el fenómeno de la corrosión del acero en estos materiales todavía no está completamente analizado.

Mediante el ensayo de resistencia lineal a la polarización (LPR) también se han estudiado sistemas de concreto Portland armado. [6] Otras investigaciones incluyen medidas de corrosión por iones cloruros, comparadas por métodos electroquímicos y pérdida de peso. [7,8] Además esta técnica también se ha aplicado para estudiar la corrosión del acero embebido en concretos no convencionales basados en metacaolín, escoria y soluciones que simulan estos materiales. [9,10,11]

Se considera que el acero de refuerzo es una de las causas principales de deterioro de la estructura, la capacidad de que este permanezca en estado pasivo es importante para garantizar la durabilidad de dicha estructura. En los concretos Portland los iones cloruro libre desencadenan corrosión por picado, éstos atacan directamente la capa pasiva del acero e impiden que ésta pueda regenerarse. El estudio de la corrosión de los aceros embebidos en concretos de activación alcalina es novedoso y no se han realizado investigaciones similares. [1,3]

El objetivo de éste artículo es estudiar las propiedades frente a la corrosión de la barra de acero embebida en una matriz cementicia de escoria activada alcalinamente, la cual ha sido colocada en dos medios diferentes (electrolito con y sin contenido de cloro). Para efectos de comparación se utilizaron las mismas barras de acero pero embebidas en concreto tradicional Portland Tipo I. Las probetas fueron evaluadas mediante las técnicas resistencia lineal a la polarización (LPR) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como cementante se utilizó escoria granulada de alto horno activada con “Silicato de Sodio” (Na_2SiO_3) a una concentración de 5% de Na_2O expresado como porcentaje en peso de escoria a incorporar, con una relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,4. Como material de referencia se emplearon mezclas convencionales de cemento Portland tipo I comercial sin ningún aditivo (OPC). La fabricación de las probetas de concreto en ambos casos contenía una dosificación de material cementante de 300kg/m^3 . Se asumió que las relaciones agua/cemento y solución agua-activador/escoria son equivalentes, en ambos casos la relación fue 0,5 con el fin de obtener un asentamiento adecuado (≈ 100 mm).

El tipo, composición, tamaño de los agregados finos y gruesos fue el mismo para ambos tipos de concreto. Correspondían a una grava con tamaño máximo de 19 mm, peso específico 2,94, masa unitaria compacta $1,86\text{ kg/cm}^3$, masa unitaria suelta $1,70\text{ kg/cm}^3$, y absorción de 1,3%. Una arena con superficie específica $2,47\text{ g/cm}^3$, masa unitaria compacta $1,67\text{ kg/cm}^3$, masa unitaria suelta $1,58\text{ kg/cm}^3$ y absorción de 2,9%. Finalmente, para el fraguado las mezclas con cemento Portland fueron curadas bajo agua, a las de escoria activada se les acondicionó un ambiente controlado para el curado, con humedad relativa aproximada de 90% y una temperatura constante de $20\text{ }^\circ\text{C}$. [12].

Los ensayos de Absorción y porosidad de los concretos estudiados se realizaron sobre muestras cilíndricas de 76mm de diámetro y

10mm de espesor siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM C642.[12]. Como electrodo de trabajo se utilizó acero estructural colombiano comercial (ASTM A706) de uso común en construcciones sismo-resistentes, con un diámetro de 1/8" y sin ningún tratamiento previo. Para el desarrollo de las pruebas electroquímicas, se utilizó un electrodo de referencia externo de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) de tipo analítico Electrochemistry BAS (MF-2052 RE-5B). Un electrodo de grafito inmerso en las probetas (durante su fabricación) actuó como contra-electrodo.

Las muestras usadas en el estudio fueron fabricadas utilizando los materiales especificados anteriormente y de acuerdo al diseño representado en la Figura 1. Tanto las probetas de escoria activada como las fabricadas con concreto Portland poseen el mismo tamaño y arreglo geométrico.

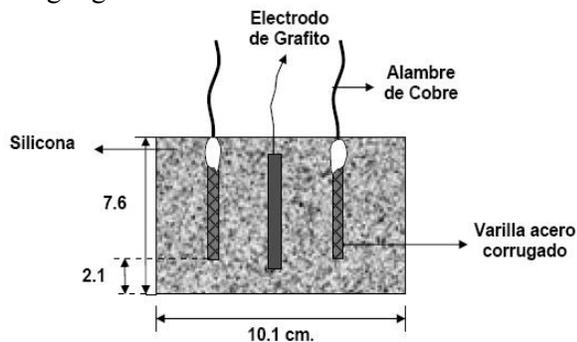


Figura 1. Geometría de las probetas
Figure 1. Specimens geometry

Para analizar el efecto de los iones cloruro sobre la corrosión del acero de refuerzo. Se le aplicó un tratamiento previo a cada tipo de concreto. Una vez completado el fraguado de los materiales, se introdujeron las probetas en dos ambientes. Para simular condiciones estándar los especímenes fueron inmersos en agua destilada la totalidad del tiempo, estos se identifican como **SS**. Por el contrario a fin de reproducir condiciones agresivas, los concretos se colocaron en inmersión en una solución con 3.5% de cloruro de sodio analítico (Panreac PA131655.1211 NaCl-99.0%) durante el mismo tiempo y se identifican como **SCI**.

Puesto que los iones cloruro libres en la solución eran consumidos tras un tiempo de exposición,

partiendo de un estudio preliminar se estableció que las condiciones electroquímicas del sistema retornaban a valores no agresivos después de veinte días. [12] Por lo anterior los ensayos electroquímicos tuvieron este intervalo de tiempo entre sí. Además después de cada prueba se cambiaron ambas soluciones para mantener una concentración de iones cloruro estable.

Las medidas electroquímicas se llevaron a cabo durante nueve meses con intervalos de veinte días. Las pruebas AC/DC fueron hechas con el equipo Gamry PC-4. Las pruebas de resistencia a la polarización lineal (LPR) se realizaron aplicando un pequeño potencial externo ($\pm 20\text{mV}$), alrededor del potencial de circuito abierto. En los estudios de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se utilizó una señal sinusoidal de 10mV efectuando un barrido a diferentes frecuencias desde los 01mHz hasta 10kHz.[13]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos de absorción y porosidad. En general, se puede observar que existe una densificación del material con edades de curado más avanzadas, debido a la disminución de la porosidad y absorción total; la Tabla 1 muestra los valores para cada tipo de concreto. [12]

Tabla 1. Porcentaje de absorción y porosidad
Table 1. Percentage of absorption and porosity

Material	Días curado	Absorción (%)	Porosidad (%)
OPC	28	5,81	13,34
	90	5,07	11,96
AAS	28	5,52	13,30
	90	4,52	10,64

Resistencia a la polarización lineal (LPR). Los resultados de resistencia a la polarización para cada uno de los sistemas permiten establecer comportamientos activos o pasivos del sistema y la velocidad con la cual ocurren. Para poder determinar la velocidad de corrosión es necesario conocer las pendientes Tafel del material en las condiciones de estudio, puesto que la ecuación de Butler-Volmer incluye estas variables electroquímicas.[6,7].

No obstante es posible realizar un análisis del comportamiento a la corrosión de cada sistema, basándose únicamente en el criterio de resistencia a la polarización. Esta puede relacionarse, mediante la ecuación de Ohm, a la encontrada en un circuito eléctrico. De esta forma si el potencial de corrosión permanece constante, podemos inferir que bajas resistencias permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Si relacionamos este hecho con la pérdida de especies metálicas, entonces bajas resistencias a la polarización (R_p) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa. [8,11]

Ahora bien, si se comparan dos curvas LPR para cada material a diferentes ambientes de ensayo (Tabla 2), puede observarse una variación considerable en las condiciones electroquímicas. Este hecho sustentaría la suposición que cada sistema posee sus propias características protectoras o de actividad-pasividad, asimismo puede realizarse una primera explicación aproximada del fenómeno en cada caso. Recordando siempre que pendientes con valores grandes corresponden a resistencias a la polarización (R_p) más altas y en general mejores condiciones protectoras del metal. [7]

Tabla 2. Resistencia a la polarización (R_p) inicial
Table 2. Initial polarisation resistance (R_p)

Material	R_p -SS(Ω)	R_p -SCL(Ω)
OPC	121200	208
AAS	4243	441

Es posible efectuar una aproximación al proceso de corrosión real si se introduce otro criterio al estudio, el tiempo. De esta forma puede realizarse un análisis relevante si además de comparar las características electroquímicas de cada sistema con respecto al tipo de cementante o ambiente, también se tiene en cuenta el comportamiento frente a la corrosión del acero con el paso del tiempo. Se analizó el comportamiento del acero embebido en cada tipo de concreto, bajo las mismas condiciones ambientales. Cada una de las curvas representa la variación de la resistencia a la polarización (R_p) con respecto al tiempo de estudio, cada punto en la curva representa el valor promedio

obtenido de tres medidas. Para determinar las propiedades protectoras de los concretos basados en escoria activada alcalinamente (AAS) se toma como referencia los concretos Portland puesto que son de uso convencional en construcción además sus propiedades ya han sido estudiadas.[8-14]

Para ambientes no agresivos (Figura 2) en los cuales no se aplicó ningún tipo de tratamiento, puede observarse un comportamiento singular para concretos Portland convencionales. Durante los primeros meses de estudio la R_p hallada en el acero embebido en OPC es muy superior a la observada en los de tipo AAS. Ambos materiales proveen una protección suficiente para permitir que la capa pasiva del acero se mantenga. Esta condición se ve favorecida en los tipo OPC puesto que los productos de hidratación generados entre el cemento Portland y el agua generan pH altos en la interface concreto acero, que a su vez proveen de buenas características de estabilidad a la capa pasiva.

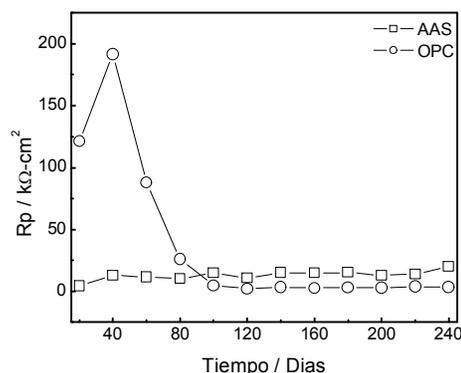


Figura 2. Variación de R_p para ambientes sin tratamiento (SS) técnica LPR

Figure 2. R_p variation for environments without treatment (SS) by LPR technique

Pese a lo anterior las reacciones entre los productos de hidratación y el metal, se detienen paulatinamente hasta llegar a ser nulas entre el tercer y cuarto mes. Este hecho se ve reflejado en la disminución drástica de R_p en estos sistemas (Figura 2) y una vez alcanzado un estado metaestable la resistencia a la polarización adquiere valores más bajos que en los concretos activados alcalinamente. [15]

Por el contrario el acero que se encontraba dentro del concreto AAS presentó desde el inicio

del estudio buenas condiciones protectoras, que vistas aisladamente son aceptables para construcciones ordinarias. Este hecho se debe a que las reacciones de hidratación en los concretos fabricados por activación alcalina presentan una cinética química acelerada, que además de proveer altas resistencias mecánicas a edades tempranas, también ofrecen buenas propiedades electroquímicas a este tipo de materiales no convencionales.[7,8,14] De esta forma el resultado final es un material con buenas propiedades electroquímicas, alta resistencia a la polarización y ligera tendencia a valores más altos que aseguran integridad de las estructuras de refuerzo en ambientes no agresivos.

Los iones cloruro producen otro resultado diferente pero incluso más dañino para el metal, el rompimiento en sitios localizados de la capa protectora.[1] Observando la contribución del ion cloruro sobre la disminución de la resistencia a la polarización (Figura 3), puede establecerse que se torna crítica para aceros embebidos en concretos OPC; los valores de R_p bajan desde 3000 Ω para ambientes normales hasta 300 Ω en condiciones agresivas. Así el concreto Portland pierde cuatro veces la capacidad protectora de las barras al estar en contacto con iones cloruro. La principal causa es que las características del material permiten la difusión de contaminantes a través de su canal de poros.[8,9] Aunque el acero presenta una ligera tendencia a pasivarse con el paso del tiempo, en la práctica el proceso corrosivo ha iniciado y no es posible que ocurra una re-pasivación ya que los elementos nocivos pueden seguir entrando (y atacando) al sistema fácilmente.

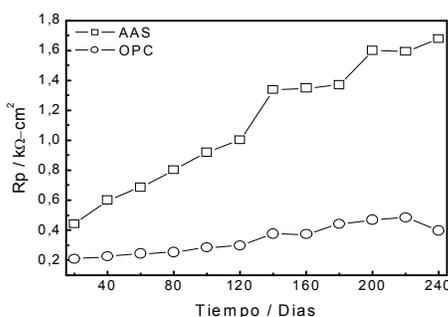


Figura 3. Variación de R_p para ambientes con iones cloruro (SCI) técnica LPR

Figure 3. R_p variation for environments with chloride ions (SCI) by LPR technique

En contraste, la escoria granulada de alto horno es mucho más reactiva químicamente que los compuestos usados en la fabricación de concretos Portland. Además los productos de hidratación del cemento de escoria generan menor porosidad, mediante bloqueo y refinamiento de poros. Por tanto si se cuenta con menor porosidad es más difícil que agentes agresivos penetren el sistema y lleguen a desestabilizar la capa pasiva del acero.[9,11].

De esta forma el efecto de los iones cloruro sobre la corrosión del metal en concretos de escoria no es tan marcado como en los sistemas Portland. Aunque también se presenta una disminución de la resistencia a la polarización (Figura 3), los valores de R_p presentados por los sistemas activados alcalinamente ($\approx 1800 \Omega$) son casi el triple que los Portland ($\approx 650 \Omega$). Reafirmando la avanzada capacidad protectora frente a la corrosión del acero en estos nuevos materiales.

La resistencia a la polarización del acero en el concreto de escoria también ha sufrido el resultado del ataque selectivo por los iones cloruro. Sin embargo éste fenómeno se ve reducido con el paso del tiempo y finalmente el metal muestra una recuperación de su carácter protector. La explicación de este hecho se halla de nuevo en la estructura densa del material. Pues el concreto producido por activación alcalina impide el paso de mayores cantidades de iones cloruro hacia el acero a través de su canal de poros disminuyendo en gran proporción el daño ocasionado por éstos.

Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Es posible realizar un análisis de las propiedades electroquímicas del concreto mediante un ensayo de espectroscopia. Si bien este se considera demasiado robusto para su utilización en campo, en cuanto al software y tiempo se refiere, es muy útil en estudios de caracterización en laboratorio como el aquí desarrollado. [1-5]

Una gran ventaja de esta técnica consiste en determinar detalladamente un mecanismo de corrosión específico para cada condición y material, pudiendo ser modelado

electrónicamente mediante un circuito equivalente del proceso. Los elementos que conforman el conjunto electrónico simulado representan a su vez un proceso físico o químico dependiendo de la función que cumplan en el material. En el caso específico de los sistemas concreto-solución de poro-acero es claro que tanto la celda, los componentes y en general los procesos electroquímicos que sufre el metal son complicados, debido a la irregularidad intrínseca de morfología y composición del concreto. [1-6].

No obstante si el material de ensayo no ha sido estudiado lo suficiente y tampoco se cuenta con modelos que expliquen el comportamiento electroquímico del mismo, es posible realizar algunas simplificaciones. En estos casos la celda electroquímica, sus componentes y por consiguiente el proceso será lo más sencillo posible asegurando confiabilidad en los resultados obtenidos. [16,17]

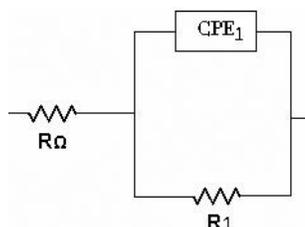


Figura 4. Modelo Randles simple
Figure 4. Simple Randles model

Uno de los circuitos electroquímicos equivalentes de mayor uso es el “Modelo de Randles Simple”. En este, la celda de estudio se limita a la resistencia de la solución, a la polarización del metal y la capacitancia generada por la doble capa electroquímica (Figura 4).

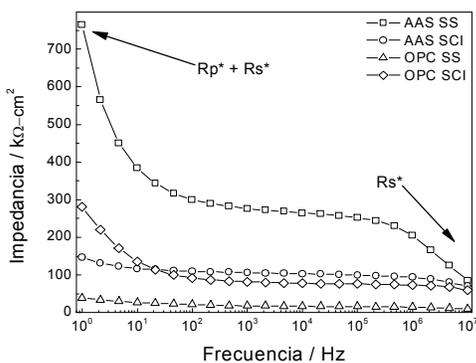


Figura 5. Diagrama de Bode para los sistemas
Figure 5. Bode diagram for systems

En el ensayo EIS se modifica la frecuencia de la señal de estudio y por tanto la impedancia (resistencia) representa diferentes características del sistema (Figura 5). De acuerdo a lo anterior, en un diagrama de Bode señales con frecuencias altas modeladas con el circuito Randles corresponden a la resistencia óhmica de la solución (R_s^*). Por otra parte la impedancia medida a bajas frecuencias con el mismo modelo representa la sumatoria de las resistencias a la polarización del acero y óhmica de la solución ($R_p^* + R_s^*$). Es decir que puede calcularse fácilmente R_p a partir de un diagrama de Bode si se resta la resistencia calculada a bajas y altas frecuencias.

Si se determina la resistencia a la polarización por el método anteriormente descrito y se representa con respecto al tiempo, también puede estudiarse el comportamiento del sistema concreto-acero (Figura 6). En este caso se considera que la mayor contribución a la resistencia óhmica es la que genera la solución de poro del concreto y se elimina el aporte del material cerámico, en otras palabras se estudia al sistema como un electrolito completamente líquido (solución de poro) y acero de refuerzo.

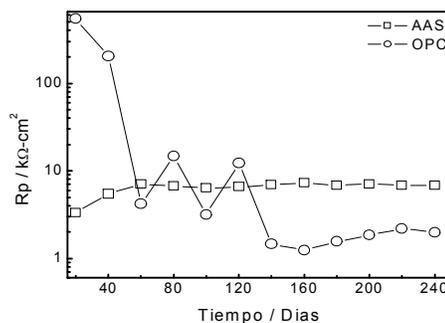


Figura 6. Comportamiento de R_p calculada por EIS, ambientes sin tratamiento (SS)
Figure 6. R_p behavior calculated by EIS, environments without treatment (SS)

En muchos casos la actividad electroquímica del sistema está determinada por las características de la solución electrolítica en contacto con el metal.[3,4,18] En este orden de ideas, puede establecerse que la solución de poro en los sistemas de escoria presenta buena estabilidad química (Figura 6). Puesto que la resistencia a la polarización del metal muestra valores similares a lo largo del estudio, esto puede ser una

indicación que la solución de poro no está interfiriendo con la estabilidad de la capa pasiva del acero. Al contrario el electrolito en los poros del concreto Portland (Figura 6) aporta inestabilidad a la capa pasiva (R_p) del acero durante los primeros meses, debido a la reacción de los productos de hidratación con la solución acuosa. Por tal motivo al inicio del estudio se presenta inestabilidad en los resultados de R_p en concretos OPC, hasta estabilizarse en valores aceptables para condiciones pasivas al inicio del cuarto mes.

El efecto de los iones cloruro en ambos sistemas es apreciable (Figura 7). Este hecho sustentado en la disminución de R_p como una medida de la estabilidad de la capa pasiva. Se obtienen iguales resultados en cuanto a la tendencia si se comparan con los obtenidos por la técnica LPR, lo que indica que las dos técnicas son complementarias para el estudio de sistemas concreto-acero de refuerzo.

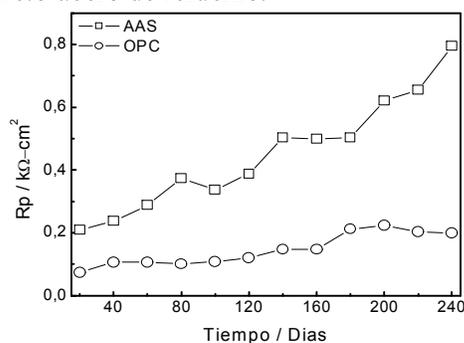


Figura 7. Comportamiento de R_p calculada por EIS, ambientes con iones cloruro (SCI)

Figure 7. R_p behavior calculated by EIS, environments with chloride ions (SCI)

Finalmente al estudiar ambos materiales en ambientes agresivos es decir bajo el efecto y los iones cloruro, se observa que los valores de resistencia a la polarización son más estables durante todos los meses de análisis (Figuras 3,7). En otras palabras si en la celda electroquímica se considera la solución de poro como un electrolito completamente líquido en contacto con el acero, se aumenta el equilibrio de los procesos que ocurren en la celda. Lo anterior no implica que exista pasividad, por el contrario prueba el carácter activo del acero en estas condiciones y la incapacidad para protegerse mediante formación de nuevas capas protectoras.

4. CONCLUSIONES

Bajo ambientes sin tratamiento ambos concretos presentan buenas propiedades protectoras del metal. No obstante en los concretos OPC las características que impiden la corrosión del acero tienden a desaparecer con el tiempo, después del cual inicia la despasivación. Por el contrario los concretos AAS presentan unas condiciones más estables con el tiempo, gracias a los productos de hidratación formados, durante la activación alcalina de la escoria.

Los iones cloruro generan una despasivación marcada en el acero embebido en concreto Portland, pues estos materiales al poseer mayor porosidad permiten el paso de más agentes agresivos. En contraste el metal en los concretos de escoria activada muestra condiciones mucho más estables, gracias a la baja porosidad del material de refuerzo que impide la entrada de otros contaminantes.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del CENIM y Colciencias, proyecto Geoconcret; así como el trabajo inter-institucional de los grupos de investigación GSEC-Uptc y GMC-Universidad de Valle.

REFERENCIAS

- [1] APERADOR W., MEJÍA DE GUTIÉRREZ R., VERA E. Comportamiento electroquímico del acero 1018 en un concreto de activación alcalina parcialmente carbonatado. Work presented in the INTERCORR 2008, Recife/PE, May 2008.
- [2] APERADOR W., TORRES-GÓMEZ R. DE J., MEJÍA DE GUTIÉRREZ R., VERA E., ORTIZ C. Análisis Electroquímico y microestructural de un material compuesto basado en escoria activada alcalinamente (AASC) y acero de refuerzo sometido a carbonatación. Work presented in the NOCMAT 2008. Cali, November 2008.

- [3] TORRES-GÓMEZ R. DE J., APERADOR W., VERA E., MEJÍA DE GUTIÉRREZ R., ORTIZ C. Estudio mediante pulso galvanostático de la corrosión del acero embebido en concreto de escoria activada alcalinamente expuesto al ataque de cloruros. Trabajo presentado en la VIII escuela nacional de física de la materia condensada. Pereira, Septiembre 2008.
- [4] TRABANELLI G., MONTICELLI C., GRASSI V., FRIGNANI A. Electrochemical study on inhibitors of rebar corrosion in carbonated concrete, *Cement and Concrete Research*, p.1804-1813, 2005.
- [5] ASSOULI B., SIMESCU F., DEBICKI G., IDRISSE H. Detection and identification of concrete cracking during corrosion of reinforced concrete by acoustic emission coupled to the electrochemical techniques, *NDT&E International*, p.682-689, 2005.
- [6] FELIU S., GONZALEZ J.A., MIRANDA J.M., FELIU V. Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures, *Corrosion Science*, p.217-238, 2005.
- [7] POUPARD O., L'HOSTIS V., CATINAUD, PETRE-LAZAR I. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment, *Cement and Concrete Research*, p.504-520, 2006.
- [8] LAW D.W., CAIRNS J., MILLARD S.G., BUNGEY J.H. Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarization resistance measurements, *NDT&E International*, p.381-388, 2004.
- [9] BATIS G., PANTAZOPOULOU P., tsivilis s., badogiannis E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Cement & Concrete Composites*, p.125-130, 2005.
- [10] YUN YEAU KYONG, KYUM KIM EUN. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, p.1391-1399, 2005.
- [11] MORENO M., MORRIS W., ALVAREZ M.G., DUFFÓ G.S. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions Effect of carbonation and chloride content, *Corrosion Science*, p.2681-2699, 2004.
- [12] PEDRAZA P. ALBA. Estudio preliminar del comportamiento frente a la corrosión de varillas de acero embebido en concreto de escoria activada alcalinamente [Pregrado]. Tesis, Universidad del Valle, Grupo Materiales Compuestos. 2007
- [13] WENGER F., GALLAND J., LEMOINE L. Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment. *EUROCORR '87*. Karlsruhe, Germany, 1987.
- [14] HUET B., L'HOSTIS V., MISERQUE F., IDRISSE H. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution, *Electrochimica Acta*, p.172-180, 2005.
- [15] SOYLEV T.A., FRANCOIS R. Quality of steel-concrete interface and corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research*, p.1407-1415, 2003.
- [16] SONG GUANGLING. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete, *Cement and Concrete Research*, p.1723-1730, 2000.
- [17] CHOI YOON-SEOK, KIM JUNG-GU, LEE KWANG-MYONG. Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, *Corrosion Science*, p.1733-1745, 2006.
- [18] MACPHEE DONALD E., DEREK C., SINCLAIR S., CORMACK L. development of an equivalent circuit model for cement pastes from microstructural considerations, *Journal of the American Ceramic Society*, p. 2876-2885, 1997.