

Aplicabilidad de un concreto de escoria activada alcalinamente como material protector del acero de refuerzo

Applicability of alkaly-activated Slag Concrete, as a Protective Material of the Reinforcing Steel

Robinson de Jesús Torres Gómez*
 William A. Aperador Ch. **
 Enrique Vera López***
 Rubi Mejía de Gutiérrez****

Resumen

Se presentan los resultados del análisis electroquímico de las barras de acero embebidas en un concreto no convencional usado internacionalmente para reparación de estructuras. Este concreto utiliza materiales de desecho de otros procesos; en este caso específico se empleó escoria siderúrgica de la empresa Acerías Paz del Río S.A. Se estudio el comportamiento frente a la corrosión generada por los iones cloruro, con el uso de la técnica de resistencia lineal a la polarización LPR y pulso galvanostático GPT. Simultáneamente, se compararon los resultados con otras probetas fabricadas con cemento Portland tipo I. Se realizaron mediciones con intervalos de veinte días durante nueve meses y finalmente se establecieron las características protectoras del concreto.

Palabras clave: Corrosión, Concreto, Acero de refuerzo.

Abstract

It shows the electrochemical analysis' results of the embedded steel bars in an unconventional concrete internationally used for structures' reparation. These concretes use other processes' waste materials, in this case was used the siderurgical slag from Acerías Paz del Río S.A. Company. The steel corrosion behavior generated by chloride ions was studied using the linear resistance polarization technique LPR, and the galvanostatic pulse technique GPT. Simultaneously all test were compared with similar samples fabricated with Portland type I concrete. The measurements were carried out every twenty days during nine months and finally the concrete protective characteristics were established.

Key words: Corrosion, Concrete, Steel of reinforcement.

Ingeniero Metalúrgico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales UPTC. Correo: metalurgico@colombia.com

Físico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales UPTC, Doctorado en Ingeniería, Universidad del Valle, docente Universidad Militar Nueva Granada. Correo: g.ing.materiales@gmail.com

Físico, Universidad Industrial de Santander, Maestría en física, UIS, Doctorado en física de materiales, Universitat Heidelberg (Ruprecht-Karls), docente Escuela de Metalurgia Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo: enrique.vera@uptc.edu.co

Química, Universidad del Valle, Maestría en Ciencias Químicas, Universidad del Valle, Doctorado en Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, docente Escuela de Materiales Universidad del Valle. Correo: rudeguti@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En estructuras sometidas a esfuerzos de tensión y flexión se utilizan concretos reforzados con varillas de acero, las cuales mejoran el comportamiento del sistema frente a esfuerzos de tracción, reduciendo la susceptibilidad de falla a causa de las condiciones a las que puede estar expuesto, tales como vientos, ciclos térmicos y tráfico; sin embargo, cuando el acero sufre fenómenos corrosivos y, consecuentemente, se presenta la formación de óxido, se produce la pérdida de adherencia entre este y el concreto, afectando la integridad de la estructura, particularmente a consecuencia de la reducción del área de sección transversal del acero, que disminuye la capacidad resistente.

El acero en el concreto se encuentra usualmente en condición pasiva (no corroído); sin embargo, en ambientes marinos los cloruros se difunden en el interior del concreto, alcanzan el acero y pueden, según la concentración presente, provocar la ruptura de la capa pasiva de protección del acero, causando que este se oxide. La carbonatación del concreto es otra causa de la corrosión del acero. Cuando el concreto se carbonata hasta el nivel de la barra de acero, el ambiente normalmente alcalino que protege el acero de la corrosión es reemplazado por un ambiente más neutral; bajo estas condiciones el acero pierde su pasividad y se da inicio a la corrosión. El ritmo de la corrosión debida al recubrimiento del concreto carbonatado es más lento que el de la corrosión inducida por cloruros.

Los nuevos materiales de ingeniería buscan satisfacer todos los requerimientos mecánicos, de diseño y costo, generando un menor impacto al ambiente en su producción o durante el servicio. Con el crecimiento de la industria de la construcción a nivel mundial y con el propósito de suministrar materiales cada vez más económicos y que contribuyan con el sostenimiento del medioambiente, ha tenido lugar el desarrollo de materiales alternativos para la producción de cementos y concretos cuyos desempeños mecánicos y de durabilidad se encuentren por encima de los concretos tradicionales.

El estudio de la degradación del acero de refuerzo embebido en el concreto Portland se encuentra limitado al laboratorio, debido al poco desarrollo de equipos y a

la complejidad que presentan algunas técnicas para su aplicación. De igual forma, los procesos de corrosión de aceros recubiertos con matrices de concreto de escoria siderúrgica activada alcalinamente, AASC, materiales bastante novedosos y considerados medioambientalmente amigables, han sido mínimamente estudiados hasta la fecha.

La producción de cemento Portland, que es usado convencionalmente como el cementante primario para la elaboración de concreto a escala mundial, fue, en los últimos años, de cerca de 1.8 billones de toneladas, con un consumo aproximado de 3 billones de toneladas de materia prima (caliza y arcilla), además de un consumo apreciable de energía (3530 kJ/t de cemento) y de combustibles fósiles. La producción de concreto Portland, segundo material más usado a escala mundial después del agua, fue de aproximadamente 8.8 billones de toneladas en el año 2006, con un consumo, adicional al del cemento, de 8 billones de toneladas de agregados y entre 600 y 700 billones de galones de agua [1, 2].

Cabe anotar que en el proceso de manufactura de una tonelada de cemento Portland ordinario se libera alrededor de una tonelada de CO_2 a la atmósfera, además de emisiones de SO_x y NO_x . Se estima que un 50% del CO_2 proviene de la carbonatación de la caliza en el proceso de clinkerización, y lo restante es atribuido a la quema de combustibles fósiles³.

Por lo anterior, la investigación acerca de materiales alternativos para incorporar o sustituir el cemento tipo Portland, que se encuentre dentro del desarrollo sostenible, comprendiendo el crecimiento económico, el balance ecológico y el progreso social, constituye una línea de investigación de gran interés científico y tecnológico a escala mundial. Los concretos de escoria activada alcalinamente, AASC, forman parte de este tipo de materiales, ya que además de cumplir con las propiedades mecánicas exigidas, durante su fabricación usan materias de desecho de otros procesos, como la escoria siderúrgica y el meta-caolín.

II. MATERIALES Y MÉTODO

Para el estudio de la corrosión en estos materiales se utilizaron dos tipos de concreto: los basados en escoria

activada alcalinamente, reforzados con acero estructural colombiano, y otros fabricados (y reforzados) con el uso de cemento Portland tipo I, de uso común en construcción y cuyas propiedades electroquímicas han sido estudiadas con anterioridad.

Para la fabricación de los especímenes de concretos AASC y OPC se seleccionaron los materiales y condiciones de trabajo con base en los resultados de propiedades mecánicas obtenidos en estudios preliminares realizados por el grupo de Investigación de Materiales Compuestos (GMC), de la Universidad del Valle [3, 4, 5].

Las mezclas de AASC utilizaron como cementante 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 por incorporar, con una relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2.4. Las mezclas OPC utilizaron cemento Portland tipo I comercial sin ningún aditivo. La fabricación de las mezclas de concreto en ambos casos contenía una dosificación de material cementante de 300 kg/m^3 . Se asumió que las relaciones agua/cemento y solución agua+activante/escoria son equivalentes; en ambos casos dicha relación fue de 0.5, con el fin de obtener un asentamiento adecuado (70 a 100 mm) [6].

El tipo, composición y tamaño de los agregados finos y gruesos fueron los mismos para ambos tipos de concreto. Correspondían a una grava con tamaño máximo de 19 mm, gravedad específica de 2.94 g/cm^3 , masa unitaria compacta de 1.86 kg/cm^3 , masa unitaria suelta de 1.70 kg/cm^3 , y absorción de 1.3%. Una arena con superficie específica de 2.47 g/cm^3 , masa unitaria compacta de 1.67

kg/cm^3 , masa unitaria suelta de 1.58 kg/cm^3 y absorción de 2.9%. Finalmente, las mezclas con cemento Portland fueron curadas bajo agua (28 días); 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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [6].

Se utilizó acero estructural colombiano comercial de referencia NTC-2289 (ASTM A706), de uso común en construcciones sismorresistentes, con un diámetro de $1/8''$ y sin ningún tratamiento previo; durante los ensayos de corrosión, este actuó como electrodo de trabajo.

Las muestras para el estudio fueron fabricadas utilizando los materiales especificados anteriormente, de acuerdo con el diseño representado en la figura 1. Tanto las probetas de escoria activada como las basadas en concreto Portland poseen este mismo arreglo geométrico y tamaño. Sin embargo, para el estudio específico de cada mecanismo de corrosión se realizaron, antes de su inicio, diversos tratamientos a las muestras.

Carbonatación acelerada. Para estudiar el efecto de la carbonatación en el sistema concreto-acero se le aplicó a una probeta de cada tipo de material un tratamiento previo. Una vez completado el fraguado de ambos tipos de concreto, se introdujeron las muestras secas en una cámara con condiciones controladas. Los especímenes seleccionados para simular ambientes urbanos agresivos fueron carbonatados en una cámara con 65% de humedad relativa y una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, en contacto con una corriente de CO_2 al 3% en volumen; esto con el fin de asegurar una carbonatación total de la masa de concreto. Su referencia en el estudio es CS.

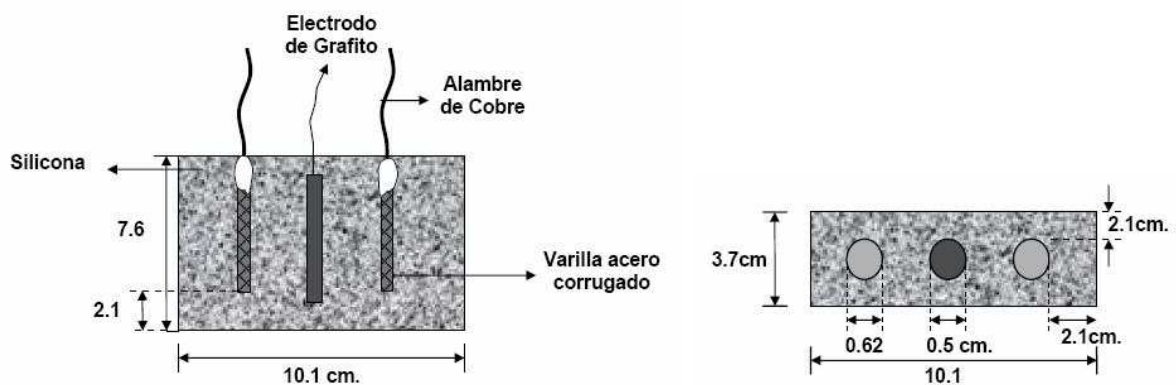


Figura 1. Probetas para el estudio. Fuente: Pedraza P., Alba [6]

Iones cloruro. Otro propósito del estudio consistió en analizar el efecto de los iones cloruro sobre la corrosión del acero de refuerzo. Sobre las probetas se efectuó una sobreexposición a cloruros. Para llevarla a cabo, los especímenes armados se colocaron en inmersión en una solución saturada con 3.5% de cloruro de sodio analítico (Panreac PA131655.1211 NaCl-99.0%) durante el mismo tiempo que las probetas sometidas a carbonatación. Su referencia en el estudio es SCI.

Iones cloruro y carbonatación. Con el fin de simular las condiciones más agresivas posibles, a otra serie de probetas se les efectuó ambos tratamientos. Es decir, se sometieron a ensayo de carbonatación acelerada, con las mismas condiciones ambientales (y de tiempo), y además se les aplicó la misma sobreexposición a cloruros. Su referencia en el estudio es CCl.

El comportamiento del acero fue monitoreado usando técnicas electroquímicas, y los valores de potencial de corrosión y de resistencia a la polarización, así como la respuesta del acero frente a pulsos galvanostáticos y las características de la interface concreto-acero se obtuvieron mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.

Resistencia a la polarización lineal (LPR). Las pruebas fueron realizadas en un potenciostato/galvanostato comercial Gamry modelo PCI-4, aplicando un potencial pequeño ($\pm 20\text{mV}$) alrededor del voltaje del Electrodo de Referencia o Potencial de Reposo, empleando un electrodo de referencia Plata-Cloruro de plata (Ag/AgCl).

Pulso galvanostático (GPT). Los ensayos se ejecutaron en un potenciostato/galvanostato basado en instrumentación virtual (LabVIEW). Este utiliza una tarjeta de adquisición de datos y fue desarrollado por el Grupo de investigación GSEC, con referencia Tekcorr modelo TG-4. La prueba se realizó mediante la aplicación de un pulso transitorio de corriente anódica aplicada de $100\ \mu\text{A}$ durante 10 segundos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. 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 [7, 8].

No obstante, es posible analizar el comportamiento frente a la corrosión de cada sistema basándose únicamente en el criterio de resistencia a la polarización. Esta puede relacionarse, mediante la ecuación de Ohm, con la encontrada en un circuito eléctrico. De esta forma, si el potencial de corrosión permanece constante, significa que bajas resistencias permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Relacionando este hecho con la pérdida de especies metálicas, puede inferirse que bajas resistencias a la polarización (R_p) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa [9, 10].

Ahora bien, si se comparan dos curvas LPR para cada material a diferentes ambientes de ensayo, puede observarse que las condiciones electroquímicas varían considerablemente. Este hecho sustentaría la suposición de que cada sistema posee sus propias características protectoras o de actividad-pasividad; así mismo, puede realizarse una primera explicación aproximada del fenómeno en cada caso. En efecto, la pendiente de cada curva para los sistemas en los cuales el ambiente en contacto consistió en agua destilada es mayor que aquellas con tratamiento previo de carbonatación y en contacto con cloruros (tanto en concretos OPC como AASC).

De esta forma y mediante un gráfico sencillo podría deducirse que la resistencia a la polarización del acero que se encuentra en el sistema AASC-SS es la más

alta de todas; por tanto, ofrece mejor pasividad para el acero, incluso mejor que el embebido en OPC-SS convencional; recordando siempre que pendientes con valores grandes corresponden a resistencias a la polarización (R_p) más altas y, en general, a mejores condiciones protectoras del metal [8].

Sin embargo, este criterio corresponde únicamente a un instante específico de cada sistema, que no es representativo del fenómeno, y si bien lo explica en una condición dada, no se aplica a condiciones más rigurosas de estudio. Además, todos los procesos de corrosión se caracterizan por estados inestables y metaestables. El acero embebido en concreto no se encuentra en equilibrio termodinámico, es decir, siempre existen modificaciones de la capa pasiva, transporte de cargas, movimientos iónicos y de masa, etc., que impiden que un estudio de la corrosión en estos sistemas pueda llevarse a cabo con un solo ensayo [11, 12].

De esta forma, es posible efectuar una aproximación al proceso de corrosión real si se introduce otro criterio al estudio: el tiempo. Así, puede realizarse un análisis más interesante 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. Este método asegura que el fenómeno corrosivo puede seguir un libre albedrío y no se incurre en estimaciones o conclusiones erróneas, que serían diferentes en cada caso, sino en afirmaciones basadas en tendencias generales de la totalidad del proceso electroquímico.

Con base en lo expuesto, 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 en ese momento del estudio. Para determinar las propiedades protectoras de los concretos basados en escoria activada alcalinamente (AASC) se toman como referencia (*nivel máximo de criticidad*) los concretos Portland (OPC), pues son de uso convencional en construcción, además, sus propiedades ya han sido suficientemente estudiadas [9-12]. En ambientes no agresivos (figura 2), en los cuales no se aplicó ningún tipo de tratamiento previo ni posterior al estudio, puede observarse un comportamiento singular para concretos Portland ordinarios.

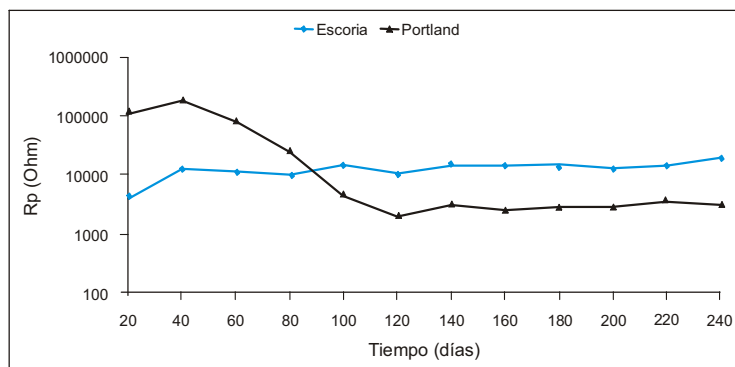


Figura 2. Variación de R_p para ambientes sin tratamiento (SS)

Durante los primeros meses de estudio, la resistencia R_p mostrada por el acero embebido en OPC es muy superior a la observada en los de tipo AASC; no obstante ambas 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. 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, y, una vez alcanzado un estado metaestable, la resistencia a la polarización adquiere valores más bajos que en los concretos activados alcalinamente [13].

Por el contrario, el acero que se encontraba dentro del concreto AASC presentó desde el inicio del estudio buenas condiciones protectoras, que vistas aisladamente son aceptables para construcciones ordinarias, pero que al compararlas con las obtenidas en sistemas OPC son, aparentemente, son mucho más bajas. 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 [8-11]. 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.

Aquellos concretos sometidos a carbonatación sufren una “despasivación” general, a causa de la acidificación de la interface metal-recubrimiento. El proceso de carbonatación produce caídas en los pH de las soluciones de poro del concreto, desde trece hasta valores cercanos a ocho. Bajo estas condiciones la capa protectora del acero no es termodinámicamente estable y, por consiguiente, puede iniciarse un proceso de corrosión [14, 15]. Este hecho se evidencia al comparar la R_p del acero sometido en ambientes carbonatados (figura 3), pues la disminución de esta corresponde a varios órdenes de magnitud en ambos casos. Los concretos OPC presentan una caída drástica de la resistencia a la polarización desde valores cercanos a 3000 para ambientes normales (SS) hasta 1200 en condiciones carbonatadas (CS). Es decir, el concreto Portland es susceptible a la carbonatación y reduce su capacidad protectora frente a la corrosión hasta casi la mitad del carácter que inicialmente poseía.

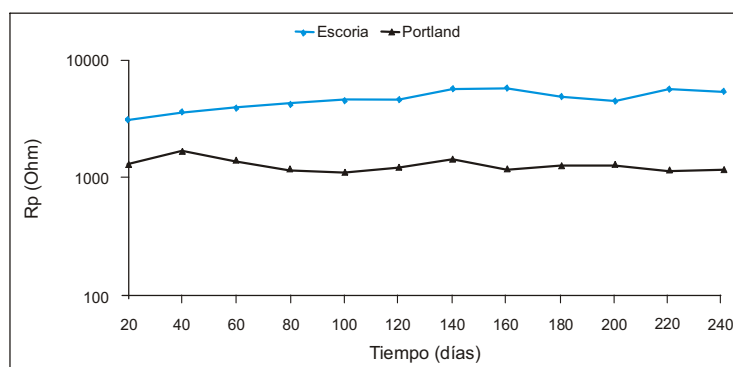


Figura 3. Variación de R_p para concretos carbonatados (CS)

De igual forma, los concretos AASC presentan una tendencia marcada a la carbonatación, sus valores

de R_p pasan de aproximadamente 14000 hasta unos 4800 en ambiente agresivo. En otras palabras, el

concreto de escoria pierde casi un tercio de su capacidad protectora del acero cuando se somete a la acción de agentes agresivos gaseosos (en este caso CO_2). Lo anterior a causa de los componentes que se encuentran en mayor grado en los cementos basados en escoria activada; estos son ricos en calcio y presentan gran reactividad química, especialmente con el CO_2 [6, 16, 17]. Por lo tanto, las reacciones de carbonatación se ven favorecidas en estos materiales.

Es claro que el fenómeno de carbonatación en concretos de escoria es más acentuado que en los similares fabricados con cemento Portland; no obstante, dicho efecto no es lo suficientemente efectivo sobre las características electroquímicas del metal, y por tal razón no se refleja en los valores experimentales de resistencia a la polarización del acero. Es así como los concretos AASC presentan mejores propiedades protectoras de la corrosión del acero que las ofrecidas por los OPC en ambientes agresivos de carbonatación.

La carbonatación no es el único fenómeno perjudicial sobre las armaduras que refuerzan el concreto. Los iones cloruro producen otro resultado diferente, pero más perjudicial para el metal: el rompimiento en sitios localizados de la capa protectora. Observando la contribución del ion cloruro sobre la disminución de la resistencia a la polarización (figura 4) puede establecerse que esta se torna crítica para aceros embebidos en concretos OPC; los valores de R_p bajan desde 3000 Ω , para ambientes normales (SS), hasta 650 Ω , en condiciones agresivas (SCI). 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 elementos nocivos a través de su canal de poros [9, 11]. 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 “repassivación”, ya que los elementos nocivos pueden seguir entrando (y atacando) al sistema fácilmente.

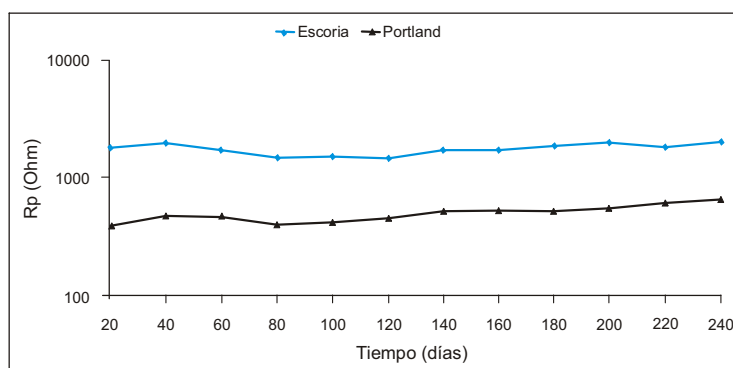


Figura 4. Variación de R_p para ambientes con cloruros (SCI)

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 una porosidad final menor, mediante bloqueo y refinamiento de poros, en un concreto AASC que la presentada por uno OPC. 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 [10, 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 4), los valores de R_p presentados por los sistemas activados alcalinamente (aprox. 1800 Ω) son casi el triple que los Portland (aprox. 650 Ω), reafirmando la avanzada capacidad protectora frente a la corrosión del acero en estos nuevos materiales.

En el peor de los casos puede ocurrir una situación extremadamente agresiva (figura 5) en la cual están presentes los dos principales factores desencadenantes del deterioro del metal embebido en cualquier concreto: los iones cloruro y la

carbonatación. Aunque en la realidad industrialmente es difícil encontrar un panorama tan nocivo para una estructura armada, es importante conocer el desempeño de cada material como recubrimiento del acero frente a la corrosión.

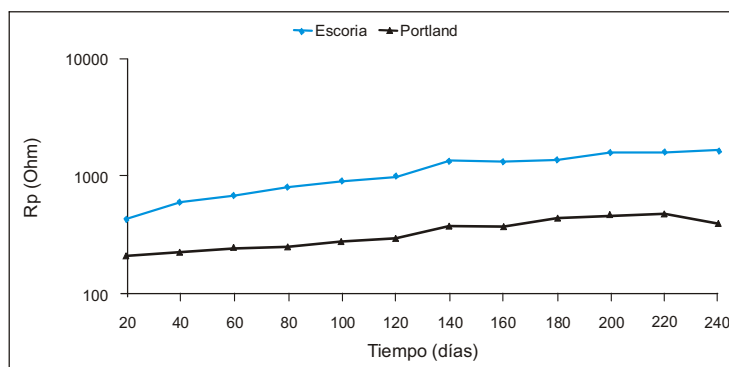


Figura 5. Variación de Rp para ambientes muy agresivos (CCI)

Cuando los dos efectos más nocivos actúan simultáneamente en el sistema, los resultados obtenidos son fácilmente perceptibles. En concretos OPC la resistencia a la polarización del acero disminuye aproximadamente ocho veces en relación con la presentada en condiciones no agresivas (figura 5), es decir, pasa desde 3000 Ω , para ambientes normales (SS), hasta 340 Ω , en los ambientes agresivos (CCI). En estas condiciones la transferencia de carga iónica a través de la solución de poros del concreto no ofrece “ninguna” resistencia, por lo tanto, los iones agresivos externos que ingresan, así como los metálicos que pierde el acero, pueden abandonar fácilmente el sistema. Luego con cantidades suficientes de oxígeno y suficiente humedad, el proceso corrosivo puede iniciar y propagarse rápidamente por la superficie del metal.

Pese a lo anterior, de nuevo el concreto de escoria presenta un comportamiento más que interesante. La resistencia a la polarización del acero también ha sufrido el resultado de la “despasivación” general que produce la carbonatación y el ataque selectivo de los iones cloruro, sin embargo, este último fenómeno se ve reducido con el paso del tiempo y finalmente el concreto muestra una “recuperación” de su carácter protector. Al inicio del estudio los valores de Rp oscilaban entre 450 y 500 Ω , pero luego de 240 días la resistencia a la

polarización del acero indica unos aceptables 1600 Ω . La explicación de este hecho se halla nuevamente en la estructura densa del material; pues si bien el concreto producido por activación alcalina es químicamente muy susceptible a la carbonatación (y no la detiene), sí 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 estos.

B. Pulso galvanostático (GPT)

Esta técnica permite estimar separadamente la resistencia a la polarización que presenta el metal y la resistencia óhmica (R_c) propia del concreto. Cada material de recubrimiento presenta unas propiedades bien definidas (porosidad, resistencia mecánica, etc.) que influyen directamente en el comportamiento electroquímico final del acero embebido en él. Pero también es interesante observar el fenómeno de corrosión en estos sistemas simulando una ausencia total de la capa protectora; este ensayo permite realizar este tipo de estudios al eliminar la resistencia R_c del concreto y estudiar el metal “desnudo”.

Mediante el diagrama de una prueba GPT se pueden establecer los criterios electroquímicos iniciales para cada material. En la figura 6 se observa la curva

resultante para cuatro sistemas específicos, los normales sin tratamiento (SS) y los más agresivos (CCI). La primera diferencia que se observa es la ubicación de la curva; este es el criterio termodinámico, pues establece los potenciales de circuito abierto para cada concreto reforzado.

Además, es evidente que la forma de la gráfica permanece constante, pero las dimensiones difieren unas de otras en cada sistema; con ellas pueden obtenerse medidas cualitativas de las propiedades electroquímicas de cada material [18-20]. Por ejemplo, la primera parte de la curva corresponde a la resistencia óhmica del

concreto, y para este caso particular el sistema AASC-SS correspondería al valor más alto de esta propiedad, seguido de AASC-CCI y así sucesivamente. Otra posible interpretación consiste en la forma que presenta la segunda parte de la curva, es decir, la presentada durante la aplicación del pulso. En este caso la horizontalidad de la gráfica está relacionada con la capacitancia de doble capa, y también puede utilizarse para calcular otros parámetros de interface. En este estudio se analiza el comportamiento de la resistencia a la polarización del acero como una función durante el tiempo de exposición, para determinar estados corrosivos de actividad o pasividad.

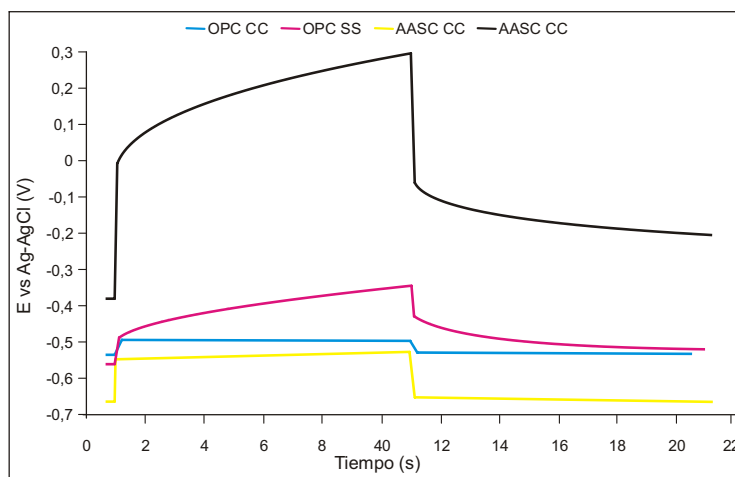


Figura 6. Curvas GPT para algunos sistemas

Puesto que la resistencia a la polarización obtenida por esta técnica no tiene en cuenta la contribución de la resistencia óhmica del material, es claro que los valores de R_p graficados serán en su mayoría más bajos que los obtenidos por la técnica LPR. Gracias a lo anterior se obtiene un diagrama (figura 7) en el que el acero presenta condiciones menos estables con el paso del tiempo. Este comportamiento se presenta porque al comparar las magnitudes de R_p y R esta última es mucho mayor que la resistencia a la polarización, por lo que sus

valores en ausencia de ella serán más pequeños y menos constantes.

El acero embebido tanto en los concretos Portland como en los basados en escoria activada presenta una inestabilidad durante los primeros meses del estudio. No obstante, la resistencia a la polarización se mantiene en rangos aceptables, asumiendo que el metal está sin recubrimiento. Luego de ello la resistencia R_p en ambos casos es similar y tiende a estabilizarse en valores que aseguran capas “pasivantes” más estables.

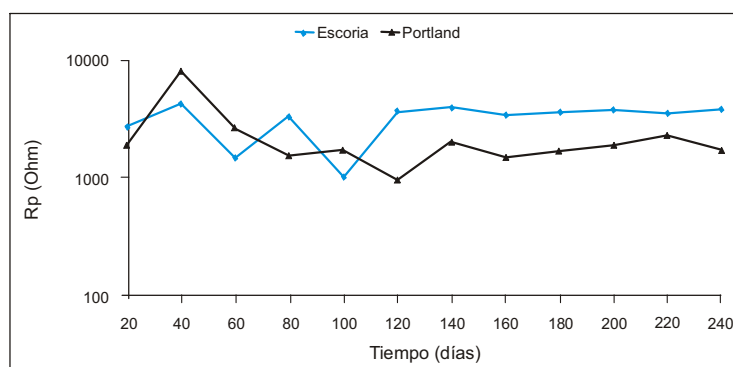


Figura 7. Comportamiento de Rp obtenida por GPT, ambientes sin tratamiento (SS)

El efecto de la carbonatación puede verse reflejado al comparar Rp del acero en cada tipo de concreto (figura 8). La resistencia a la polarización del metal en los concretos Portland disminuye cerca de cinco veces, pasando de 2000 Ω , a condiciones normales, hasta 400 Ω , luego de carbonatados. Por el contrario, en los sistemas de escoria activada la resistencia a

la polarización no cambia drásticamente, pues el valor final de esta corresponde a la mitad de la presentada en ambientes sin tratamiento. Es decir, que la capa pasiva del acero se torna menos estable en aquellos embebidos en concretos OPC que en los AAC cuando se somete a carbonatación el sistema.

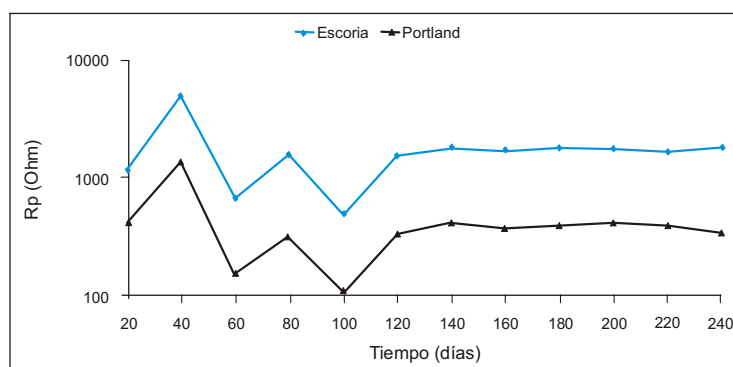


Figura 8. Comportamiento de Rp obtenida por GPT, concretos carbonatados (CS)

Cuando se estudia el efecto de los iones cloruro sobre el acero, omitiendo la capa protectora de concreto, se produce un resultado muy interesante (figura 9): los valores de resistencia a la polarización del acero en ambos materiales son similares en comportamiento y en magnitud. En algunos casos la Rp del metal es casi igual tanto en concretos OPC como en

AASC, con valores muy bajos y peligrosos. La protección contra el ingreso de cloruros en materiales basados en escoria activada alcalinamente está controlada por la densidad y cantidad de poros, pero en ausencia de tal barrera mecánica los agentes agresivos pueden atacar directamente la capa pasiva del acero, generando corrosión.

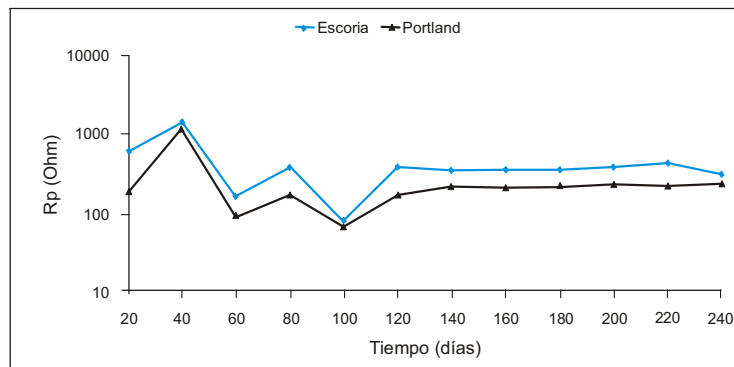


Figura 9. Comportamiento de Rp obtenida por GPT, ambientes con cloruros (SCI)

Cuando el metal se encuentra en un ambiente sumamente agresivo, en el que se produce “despasivación” de la capa protectora por carbonatación y ataque selectivo por cloruros, y además no existe ninguna resistencia óhmica que retarde la difusión de elementos agresivos, se está frente a las peores condiciones posibles para un acero de refuerzo. Las resistencias Rp del metal en ambos materiales disminuyen en varios órdenes de magnitud (figura 10).

En concretos OPC se llega a extremos en los cuales Rp disminuye veinticinco veces su valor inicial, es decir, pasa de 2000 Ω , en condiciones normales, a unos 80 Ω , en condiciones excesivas de contaminación que impiden siquiera pensar en que exista algún rastro de la capa pasiva del acero. Los sistemas AASC también sufren el rigor de las condiciones agresivas extremas y su Rp disminuye alrededor de catorce veces la resistencia presentada en ambientes normales, con valores de 2500 Ω y 200 Ω para condiciones sin y con tratamiento, respectivamente.

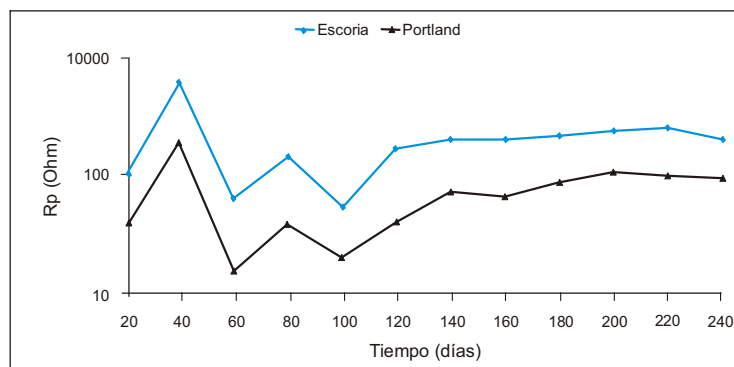


Figura 10. Comportamiento de Rp obtenida por GPT, ambientes muy agresivos (CCI)

C. Resistencia (óhmica) del concreto

Como complemento del análisis electroquímico del metal, es interesante observar el comportamiento resistivo de la capa de concreto. En los sistemas sin tratamiento, la matriz cerámica basada en cemento Portland presenta una inestabilidad durante los primeros meses de estudio. Esta conducta no es tan

perceptible en los concretos basados en escoria activada (figura 11); la razón fundamental para que ello ocurra se debe al mecanismo de activación de ambos materiales. Las reacciones químicas entre el agua y el cemento Portland producen mayores porosidades iniciales que las generadas en la activación de la escoria; este es uno de los principales aportes a las resistencias mecánicas

superiores de los concretos AASC. En los ambientes sin tratamiento, el factor más importante que determina la resistencia óhmica de la capa de concreto es la porosidad. Las especies iónicas generadas en el sistema se desplazan mediante el canal de poros y, a su vez, a través de la solución en

estos. Entonces, si existe una relación directa entre estas dos propiedades, es posible afirmar que, bajo estas condiciones, el concreto de escoria presenta mayores resistencias al paso de corrientes (iónicas) gracias a su menor porosidad, comparada con los similares basados en Portland.

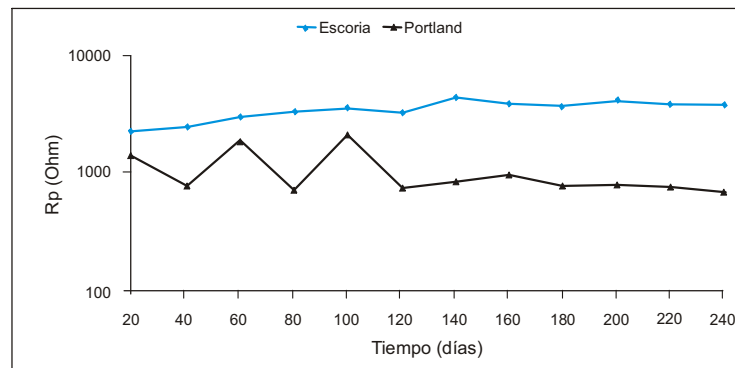


Figura 11. Comportamiento de la resistencia óhmica del concreto (R) obtenida por GPT, ambientes sin tratamiento (SS)

Pese a lo anterior, cuando ambos concretos se someten a condiciones con iones cloruro libres y carbonatación, la resistencia disminuye (figura 12). El efecto de los iones cloruro sobre el material cerámico no es tan perjudicial como en el acero. En este caso, estos iones proveen mejores conductividades (iónicas) a las soluciones de poro

en el interior del material, que disminuyen la resistencia de la matriz cerámica. Por otra parte, la carbonatación genera una modificación directa de las condiciones de la capa de concreto, pues este fenómeno acarrea reacciones químicas de la pasta de cemento que modifican su composición (y propiedades).

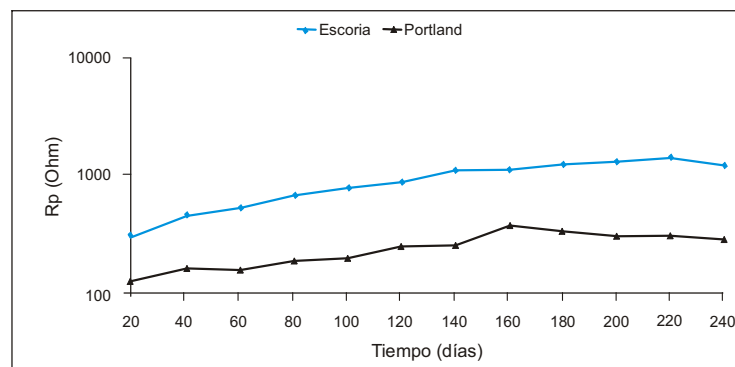


Figura 12. Comportamiento de la resistencia óhmica del concreto (R) obtenida por GPT, ambientes muy agresivos (CCI)

La resistencia óhmica, como aporte a la protección electroquímica de las armaduras, depende de las condiciones a las cuales se encuentre el material. Bajo ambientes no agresivos, la propiedad que determina (en gran parte) la resistencia del concreto es la porosidad. En condiciones agresivas debe considerarse el efecto de la carbonatación y los iones cloruro sobre las matrices de cemento. Puede afirmarse que, debido a sus propiedades mecánicas y químicas, los concretos basados en escoria activada presentan mejor protección al metal por mecanismo óhmico que los similares fabricados con cemento Portland, tanto en ambientes sin tratamiento como en aquellos agresivos.

IV. 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, luego del cual inicia la “despasivación”; por el contrario, los concretos AASC presentan unas condiciones más estables con el tiempo, gracias a los productos de “hidratación” formados durante la activación alcalina de la escoria.

La carbonatación tiene una consecuencia más perceptible en los concretos AASC que en los similares OPC, debido a que la escoria en su composición posee mayor cantidad de compuestos de calcio muy reactivos, con el CO_2 . Y si bien existe una disminución drástica de la resistencia a la polarización por este fenómeno en ambos sistemas, el metal embebido en los concretos basados en escoria presenta mejores condiciones pasivas y de protección electroquímica que el embebido en los concretos Portland.

Los iones cloruro generan una “despasivación” marcada en el acero embebido en concreto Portland, pues este material, al poseer mayor porosidad, permite el paso de altas cantidades de 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.

El efecto combinado de iones cloruro y carbonatación es marcadísimo en el acero del concreto OPC. Bajo estas condiciones, la resistencia a la polarización muestra cómo la capa pasiva del acero desaparece totalmente y el metal se queda sin ninguna protección. En los concretos de escoria activada, el sistema tiende a recuperar las condiciones de “pasivación” del metal luego de algunos meses, y la resistencia a la polarización alcanza valores cercanos al doble que los presentados por sistemas Portland.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Colciencias, con la financiación del proyecto Geoconcret. Además, el trabajo interinstitucional de los grupos de investigación GSEC-Uptc y GMC-Universidad de Valle.

REFERENCIAS

- [1] D. Hardjito and B. V. Rangan, *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Bases Geopolymer Concrete*. Research Report GC1. Curtin University of Technology. Perth Australia. 2005.
- [2] E. Gartner. “Industrially Interesting Approaches to Low CO_2 Cements”. *Cement and Concrete Research* 34, p.1489-1498. 2004.
- [3] E. Rodríguez, S. Bernal, R. Mejía de Gutiérrez y F. Puertas, “Hormigón alternativo basado en escorias activadas alcalinamente”. *Materiales de Construcción*, Vol. 58, p. 53-67, 2008.
- [4] R. Mejía de Gutiérrez et ál, “Durability of Mortars Made with Alkali Activated Slag”. Proc. 11th Int. *Congress on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, 2003.
- [5] D. Angrino, R. Mejía de Gutiérrez, S. Delvasto, “Comportamiento de un cemento adicionado con escoria”. Proc. *VI Congreso Nacional de Corrosión*, Bogotá, 2001.
- [6] A. Pedraza P., *Estudio preliminar del comportamiento frente a la corrosión de*

varillas de acero embebido en concreto de escoria activada alcalinamente. Santiago de Cali, Tesis Universidad del Valle, Grupo Materiales Compuestos, 2007.

- [7] S. Feliu, J. A. González, J. M. Miranda, V. Feliu. "Possibilities and Problems of in Situ Techniques for Measuring Steel Corrosion Rates in Large Reinforced Concrete Structures". *Corrosion Science*, p. 217–238, 2005.
- [8] O. Poupard, V. L'hostis, Catinaud, I. Petre-Lazar. "Corrosion Damage Diagnosis of a Reinforced Concrete Beam After 40 Years Natural Exposure in Marine Environment". *Cement and Concrete Research*, p. 504–520, 2006.
- [9] D. W. Law, J. Cairns, S.G. Millard, J.H. Bungey. "Measurement of Loss of Steel From Reinforcing Bars in Concrete Using Linear Polarisation Resistance Measurements". *NDT&E International*, p. 381–388, 2004.
- [10] M. Moreno, W. Morris, M.G. Álvarez, G. S. Duff. "Corrosion of Reinforcing Steel in Simulated Concrete Pore Solutions Effect of Carbonation and Chloride Content". *Corrosion Science*, p. 2681–2699, 2004.
- [11] G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis. "The Effect of Metakaolin on the Corrosion Behavior of Cement Mortars". *Cement & Concrete Composites*, p. 125–130, 2005.
- [12] Kyong Yun Yeau, Eun Kyum Kim. "An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete With Ground Granulate Blast-Furnace Slag". *Cement and Concrete Research*, p. 1391–1399, 2005.
- [13] T. A. Soylev, R. Francois. "Quality of Steel–Concrete Interface and Corrosion of Reinforcing Steel". *Cement and Concrete Research*, 1407–1415, 2003.
- [14] G. Torres, A. Mendoza. "Evaluación de la corrosión en soldadura de barras corrugadas de acero para concreto reforzado". Tesis Ingeniería en Metalurgia. Uptc, Tunja, 2006.
- [15] R. Montani, "La carbonatación, enemigo olvidado del concreto". *Revista Construcción y Tecnología*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México DF, 2000.
- [16] R. Mejía de Gutiérrez, *Concreto geopolimérico, un nuevo material para el desarrollo sostenible –GEOCONCRET–*. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología-Colciencias, convocatoria 332/2006.
- [17] A. Fernández, J. G. Palomo, F. Puertas, "Alkali-Activated Slag Mortars Mechanical Strength Behavior". *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p.1313-1321, 1999.
- [18] M. Holloway, J. M. Sykes. "Studies of the Corrosion of Mild Steel in Alkali-Activated Slag Cement Mortars with Sodium Chloride Admixtures by a Galvanostatic Pulse Method". *Corrosion Science*, p. 3097–3110, 2005.
- [19] S. Sathiyarayanan, Panjali Natarajan, K. Saravanan, S. Srinivasan, G. Venkatachari. "Corrosion Monitoring of Steel in Concrete by Galvanostatic Pulse Technique". *Cement & Concrete Composites*, p. 630–637, 2006.
- [20] M. F. Montemor, M. P. Simões, G. S. Ferreira. "Chloride-Induced Corrosion on Reinforcing Steel: from the Fundamentals to the Monitoring Techniques". *Cement & Concrete Composites*, p. 491–502, 2003.

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2008
Fecha de aprobación: 10 de abril de 2009