

Monitoreo mediante EIS del acero embebido en un concreto de escoria activada alcalinamente expuesto a carbonatación

EIS monitoring of embedded steel in alkali activated concrete exposed to carbonation

Willian Aperador*¹, Arnoldo Delgado*, Enrique Vera**

* Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. COLOMBIA

** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja–Boyacá. COLOMBIA

Fecha de recepción: 26/ 06/ 2010
Fecha de aceptación: 30/ 01/ 2011
PAG. 81 - 94

Resumen

En este trabajo se utilizó la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar la acción del dióxido de carbono sobre la corrosión de un acero estructural ASTM A 706 embebido en un concreto de escoria activado alcalinamente (AAS), el concreto AAS es una mezcla de escoria molida granulada, agregados finos y gruesos y solución alcalina (silicato de sodio) en la cantidad requerida para la mezcla de concreto. El estudio se realizó comparativamente con especímenes expuestos a condiciones naturales con una baja concentración de CO₂ (0,03% CO₂). La carbonatación del concreto se obtuvo de forma acelerada bajo condiciones controladas (3% CO₂, 65% de humedad relativa y 20°C de temperatura). Los datos de Impedancia fueron adquiridos en un rango de 1mHz hasta 100kHz. A las frecuencias altas se encontró la respuesta de la interfase medio de exposición-concreto y a frecuencias bajas la respuesta de la interfase correspondiente al concreto – acero. Mediante EIS se estableció la capacidad de lograr la pasivación del acero embebido en concreto AAS, en condiciones ambientales naturales y aceleradas.

Palabras Clave: AAS, carbonatación, EIS

Abstract

In this work the technique of impedance spectroscopy electrochemistry (EIS) was used to evaluate the effects of carbon dioxide on the corrosion of ASTM A 706 structural steel embedded in concrete with alkali activated slag (AAS), AAS concrete is a mixture of ground granulated slag, fine and coarse aggregates and alkaline solution (sodium silicate) in the amount required for the concrete mix. The study was conducted in comparison with specimens exposed to natural conditions with a low concentration of CO₂ (0.03% CO₂). The carbonation of the concrete was obtained through accelerated carbonation under controlled conditions (3% CO₂, 65% of relative humidity and 20°C of temperature). The data of Impedance in the middle frequency region 1mHz - 100KHz. A high frequency response was found using the interface-specific exposure and low frequency response corresponding to the specific interface – steel. EIS was used to established the ability to achieve passivation of steel embedded in AAS concrete in natural and accelerated environmental conditions.

Keywords: AAS, carbonation, EIS

1. Introducción

En los últimos años, debido a la búsqueda fundamentalmente de ahorro energético y de minimización del consumo de recursos naturales, el aprovechamiento de subproductos y desechos industriales (cenizas volantes, humo de sílice, escoria siderúrgica de alto horno, entre otros) ha adquirido importancia, por ello la industria del cemento ha incursionado en el desarrollo y producción de nuevos tipos de cementos alternativos (Shi 1996).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: wiapch@yahoo.es

Entre estos materiales, conocidos como suplementarios o adiciones, la escoria granulada de alto horno (GBFS) se ha empleado con éxito como sustituto parcial y total del cemento Pórtland Ordinario dentro de las mezclas de concreto, dando lugar a materiales con mejores desempeños mecánicos y de durabilidad. La GBFS, utilizada sin cemento Pórtland, experimenta una hidratación rápida cuando es mezclada con un activador adecuado, tal como una solución de silicato del sodio, y si se mezcla con los agregados puede producir un concreto que desarrolla una resistencia mecánica elevada a edades tempranas y genera un concreto que es denso e impermeable (Shi 1996; Fernández-Jimenez, A; Puertas, F 2003; Fernández-Jiménez A., Palomo A 2009). Por otra parte, este nuevo tipo de cementante contribuye con el desarrollo sostenible gracias a la disminución en las emisiones de CO_2 y un menor consumo de recursos naturales (Aperador et al., 2009).

El acero de refuerzo embebido en el concreto producido con cementos Pórtland y escoria activada alcalinamente (AAS), están naturalmente protegido de la corrosión debido a la alta alcalinidad del medio, específicamente en la interfase acero-matriz. Sin embargo, este estado de protección puede ser afectado por la destrucción de la película pasiva debido a la reducción del pH en la zona que cubre la armadura (carbonatación) y con ello puede ocurrir la pérdida de propiedades mecánicas y disminución de la vida útil (Blanco et al., 2006; Song y Saraswanthy 2006; Aperador et al., 2009).

Una técnica de gran importancia para el estudio de la corrosión en concretos es la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), técnica que trabaja en el dominio de la frecuencia. El concepto básico de la técnica EIS es que una interfase electroquímica puede ser vista como una combinación de elementos pasivos de un circuito eléctrico, es el caso de resistencias, capacitores e inductores. Esta técnica es muy bien aceptada para el estudio electroquímico en estructuras debido a la exactitud de los valores de resistencia a la polarización encontrados (R_p). Adicionalmente entrega información fundamental sobre las características del sistema, aunque a veces es difícil de hacer la interpretación y además es una técnica que utiliza bastante tiempo en su ejecución. La técnica EIS se empezó a aplicar en la evaluación de la corrosión de los aceros embebidos en los concretos a principios de la década del 90 y hoy en día se considera de gran utilidad para entender el comportamiento del sistema acero/concreto (Feliu et al., 1998; Moreno et al., 2004; Bastidas et al., 2008a; Bastidas et al., 2008b).

La respuesta de la técnica es un diagrama de los valores absolutos del imaginario contra el componente real de los valores de la impedancia que da lugar a un semicírculo, en el cual el diámetro es la resistencia de la polarización y la intercepción en el eje X (componente real), en el extremo de alta frecuencia, nos da la resistencia del concreto. En el caso del concreto, la resistividad es considerable, en ocasiones del orden de $k\Omega \cdot cm$, por lo que puede interferir en la respuesta de la interfase acero-concreto y proporcionar una lectura incorrecta. Es por esto, que la medición de la resistencia a la polarización debe hacerse con compensación óhmica.

El objetivo de este trabajo es exponer las propiedades electroquímicas de un acero embebido en concretos de activación alcalina cuando es sometido bajo condiciones atmosféricas normales y ambientes con 3% de concentración de CO_2 . Se realizaron mediciones espectroscopia de impedancia electroquímica a diferentes tiempos de exposición hasta 1050 h para los concretos AAS.

2. Procedimiento experimental

2.1 Muestras de concreto y preparación de especímenes

Como 100% de cementante se utilizó una escoria siderúrgica de alto horno Colombiana con una composición química del 33.7 % SiO_2 , 12.8% Al_2O_3 , 45.4% CaO , 0.5% TiO_2 y 1.00 % MgO ; el coeficiente de basicidad ($CaO+MgO/SiO_2+Al_2O_3$) y el de calidad ($CaO+MgO+Al_2O_3/ SiO_2+TiO_2$) son 1.0 y 1.73, respectivamente. Como activador alcalino se utilizó una solución de silicato de sodio a una concentración de 5% de Na_2O expresado como porcentaje en peso de escoria. Los agregados utilizados corresponden a una grava con tamaño máximo de 19 mm, gravedad específica de 2,94, y absorción de 1,3%, y una arena de río con superficie específica de 2470 kg/m^3 y absorción de 2,9%. A partir de estos materiales se elaboraron concretos con 400 kg de cementante por m^3 de concreto, con una relación agua/ cementante de 0,4.

Para las medidas electroquímicas se produjeron cilindros de 76,2 mm de diámetro por 76,2 mm de alto, con una varilla de acero estructural ASTM A 706 colocada en el centro de la probeta; el diámetro del acero de refuerzo es de 6,35mm. El montaje realizado se puede observar en la Figura 1, en donde se aprecia que la longitud del acero expuesta es de 50mm. Los concretos AAS se curaron a una humedad relativa del 90% durante 28 días previo al ensayo.

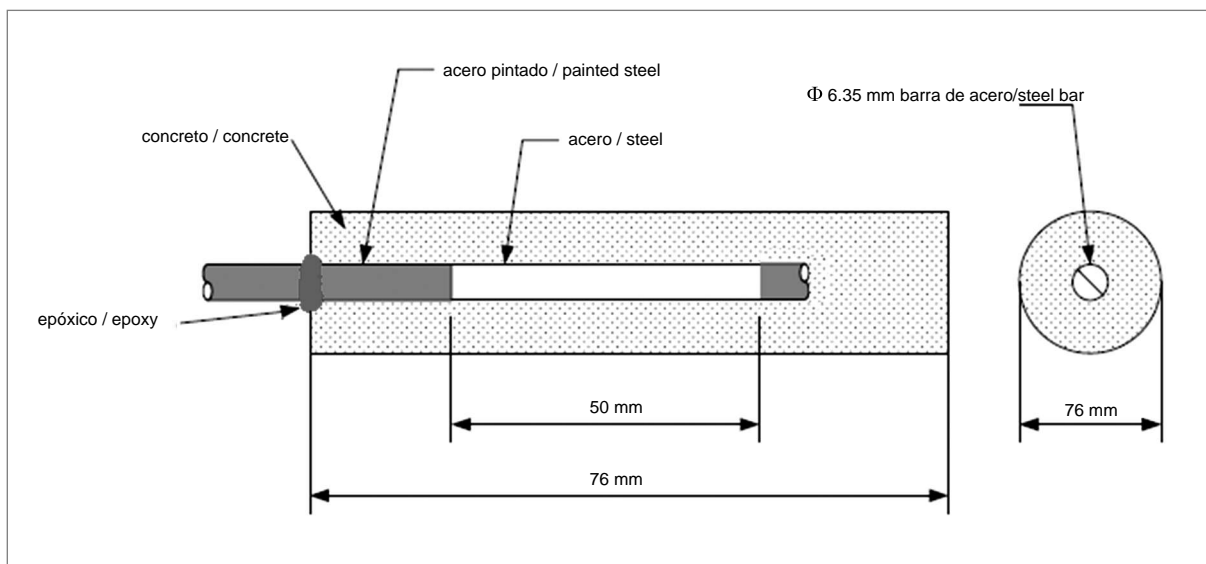


Figura 1. Esquema de la preparación de la muestra de concreto armado
 Figure 1. Arrangement of sample elaboration for reinforced concrete

El proceso para la medición del avance de la corrosión por la inclusión de dióxido de carbono se hizo en una cámara de carbonatación a condiciones controladas (3%CO₂, 65% humedad relativa y una temperatura de 20°C). Para comparar los resultados obtenidos por la carbonatación se realizaron medidas a probetas expuestas al ambiente con las siguientes condiciones 68% humedad relativa, 28°C y 0,03% CO₂. La resistencia a la compresión de las muestras de concreto fue evaluada a la condición inicial (28 días de curado) y una vez que el proceso de carbonatación fue concluido (Puertas et al., 2006; Moreno et al., 2004).

2.2 Ensayo electroquímico

La caracterización electroquímica se realizó en un potencióstato/galvanostato Gamry modelo PCI 4 mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica, empleando una celda compuesta por un contraelectrodo de grafito, un electrodo de referencia de Ag/AgCl y como electrodo de trabajo se utilizó el acero estructural ASTM A 706 con un área expuesta de 10cm².

Las medidas electroquímicas se realizaron para los concretos de AAS a 0 horas = 0 nivel 350 horas = 1 nivel, 700 horas = 2 nivel y 1050 horas = 3 nivel de exposición. Es de anotar que las probetas de AAS a 1050 horas se encuentran totalmente carbonatadas. Las mediciones de los concretos expuestos al ambiente natural se realizaron a las mismas edades de exposición.

Todas las pruebas electroquímicas fueron realizadas bajo inmersión en una solución de agua destilada. La Figura 2 esquematiza el montaje de la prueba. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron realizando barridos de frecuencia en el rango de 100kHz hasta 0,001 Hz, empleando una amplitud de la señal sinusoidal de 10 mV.

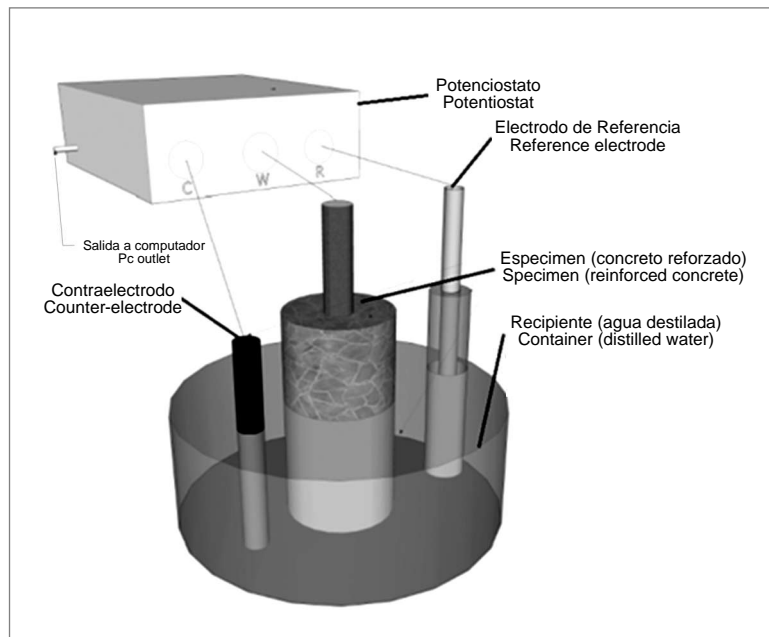


Figura 2. Montaje experimental para la realización de las medidas electroquímicas
Figure 2. Experimental arrangement for electrochemical measurements

3. Resultados y discusiones

3.1 Determinación de la resistencia a la compresión de los concretos AAS

Los resultados de la resistencia a la compresión se presentan en la Figura 3; en esta, los símbolos AASA y AASC representan los especímenes expuestos al medio ambiente natural y cámara de carbonatación acelerada, respectivamente. Se observa que la exposición natural no afecta la resistencia, por el contrario, los concretos evaluados a las 1050 horas y expuestos a carbonatación acelerada muestran una disminución del 30 % en el valor de la resistencia a la compresión con relación al obtenido a los 28 días de curado, esto puede atribuirse al ataque CO_2 al silicato cálcico hidratado, componente responsable de las propiedades mecánicas del material, lo cual concuerda con lo reportado por otros investigadores (Shi 1996; Fernández-Jimenez, A; Puertas, F 2003).

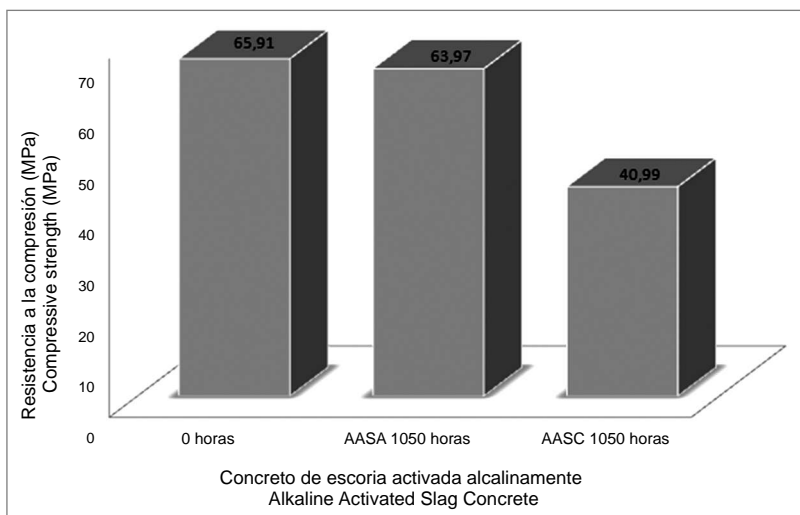


Figura 3. Resistencia mecánica del concreto AAS
 Figure 3. Mechanical Strength of AAS concrete

3.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

3.2.1 Exposición en Cámara de carbonatación

La técnica de espectroscopía de impedancia que se aplicó al concreto AAS arrojó varios modelos físicos, dependiendo del estado de evaluación. Para el caso del concreto expuesto a carbonatación acelerada (Figura 4) podemos observar que en el primer nivel evaluado, es decir a las 0 horas de exposición, se halló, el modelo de Randles modificado debido a que se encuentra el elemento de Warburg, el cual es el primer elemento electroquímico introducido para la descripción de impedancia de difusión lineal semi-infinita, que obedece la segunda ley de Fick.

$$\partial c / \partial t = D(\partial^2 c / \partial x^2) \quad (1)$$

Como se observa en la Figura 5 la introducción de un elemento de Warburg en serie con la resistencia de transferencia de carga es debido a las respuestas de los procesos faradaicos que suceden en la interfase. Éste efecto explica por qué el estado estacionario no puede ser encontrado con las técnicas convencionales como las de corriente directa (DC), resistencia a la polarización lineal y curvas de polarización tafel. También explican las constantes de tiempo observadas en los espectros de la impedancia a frecuencias bajas y la necesidad para sobrepasar los valores de la resistencia de la polarización (Montemor et al., 2003). Montemor demostró que esta constante del tiempo se podría relacionar con la humedad del concreto. La respuesta de alta frecuencia también permite la determinación de la resistividad del concreto.

La presencia de semicírculos dislocados sugiere un comportamiento no ideal del condensador, conduciendo a la introducción del elemento de la fase constante (CPE), lo cual permite aumentar la precisión en la determinación de la resistencia a la polarización. Los valores obtenidos en el procesamiento de los resultados para AAS 0 horas se incluyen en la Tabla 1.

En la Figura 4 se observa los espectros de impedancia electroquímica de los concretos de escoria siderúrgica activada alcalinamente con exposición a carbonatación acelerada, la muestra denominada como AAS se evaluó a los 28 días de curado. En el primer nivel de carbonatación se tiene que el material se ve afectado por el fenómeno de carbonatación, esto se puede evidenciar porque sus propiedades electroquímicas han disminuido en comparación al inicial, este mismo comportamiento lo presentan las probetas carbonatadas en el segundo y tercer nivel. Se observa que el valor de la resistencia del concreto (R_{C+s}) en los cuatro diferentes niveles de carbonatación es muy similar; esto indica que la resistencia de poro del concreto, término con el cual es conocido este parámetro, tiene una tendencia a mantenerse constante, pero este valor ha disminuido con respecto al hallado para el concreto AAS a los 28 días de curado, lo que indica que la calidad de la matriz se ve modificada por el efecto de la carbonatación y por tanto el concreto carbonatado induce con mayor facilidad un proceso corrosivo sobre el acero estructural. El valor de la resistencia R_1 , que se ha relacionado a las reacciones formadas en la interfase cemento/agregados, se reduce en la medida en que se incrementa el espesor del concreto carbonatado. Este mismo comportamiento es observado para la resistencia denominada R_2 , donde se tiene que a mayor tiempo de carbonatación menor es el valor de estos parámetros. El valor de capacitancia CPE_1 disminuye a medida que transcurre el tiempo de carbonatación, esto se debe a la capa que se empezó a generar en la interfase de los agregados; por el contrario CPE_2 muestra una tendencia a aumentar, esto se debe a que la capa pasivante del acero empieza a ser vulnerable a medida que se dan las reacciones de carbonatación en el concreto.

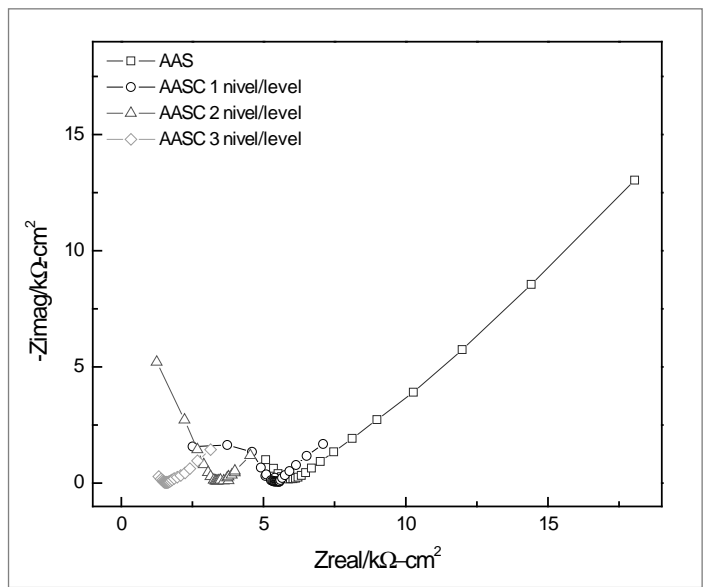


Figura 4. Diagrama de Nyquist correspondiente a los concretos AASC expuestos a carbonatación acelerada
 Figure 4. Nyquist diagram corresponding to AASC concretes exposed to accelerated carbonation

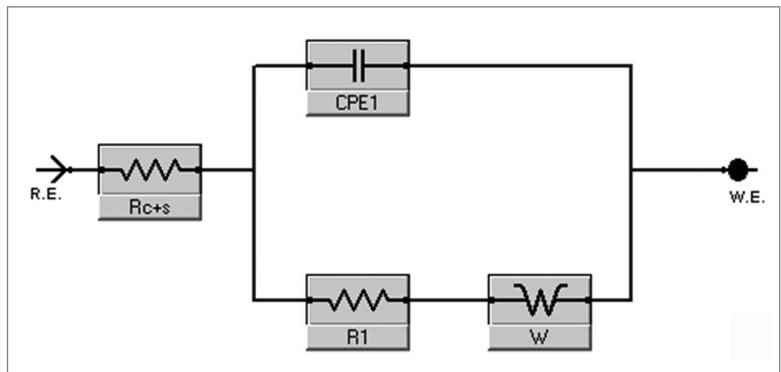


Figura 5. Circuito equivalente del AASC en el nivel 0 de carbonatación
 Figure 5. Equivalent circuit of AASC at carbonation level 0

Tabla 1. Parámetros del concreto AASC en el nivel 0 de carbonatación Rc+s: Resistencia del concreto. R1 y CPE1: Resistencia y capacitancia de la zona interfacial pasta agregados; W (elemento de Warburg): es un elemento electroquímico específico de la difusión. (A. Lasia., 2003;A.A. Sagües; 1987)

Table 1. shows AASC concrete parameters at carbonation 0 level. Rc+s: Concrete resistivity R1 and CPE1: Resistivity and capacitance of aggregate paste interfacial zone. W (Warburg element): specific electrochemical diffusion element (A. Lasia., 2003; A.A. Sagües; 1987)

Parámetros/Parameters	AASC
Rc+s ($\Omega\text{-cm}^2$)	517
CPE 1 ($S*s^a$)	23,1e-9
R1 ($k\Omega\text{-cm}^2$)	10,801
W ($S*s^{(1/2)}$)	211e-3

Para el concreto AAS en estado carbonatado se encontró que el circuito es más complejo debido a las reacciones que se presentaron cuando el material empieza la etapa de carbonatación. La Figura 5 muestra el comportamiento de los concretos sometidos a carbonatación acelerada desde las 350 horas hasta las 1050 horas, tiempo en el cual el material se carbonató al 100%. El circuito de la Figura 7 muestra una primera resistencia (R_{c+s}) asociada a la solución de poro del concreto, esta es hallada a altas frecuencias a 100kHz; luego encontramos un CPE y una resistencia asociada a la primeros elementos que se encuentran en el concreto en su parte externa, estos elementos pueden ser debidos a las reacciones generadas o absorción superficial de algunas de las especies con el ingreso del CO_2 ; luego a frecuencias intermedias podemos encontrar otros elementos tales como un CPE y una resistencia, estos elementos están asociados a la zona de transición interfacial pasta - agregados que constituyen el concreto; en dominio de bajas frecuencias normalmente se encuentra el proceso de transferencia de carga en combinación con el proceso de transferencia de masa, esto corresponde a la última R y al CPE, estos elementos están ubicados en la zona interfacial correspondiente al concreto y el acero. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

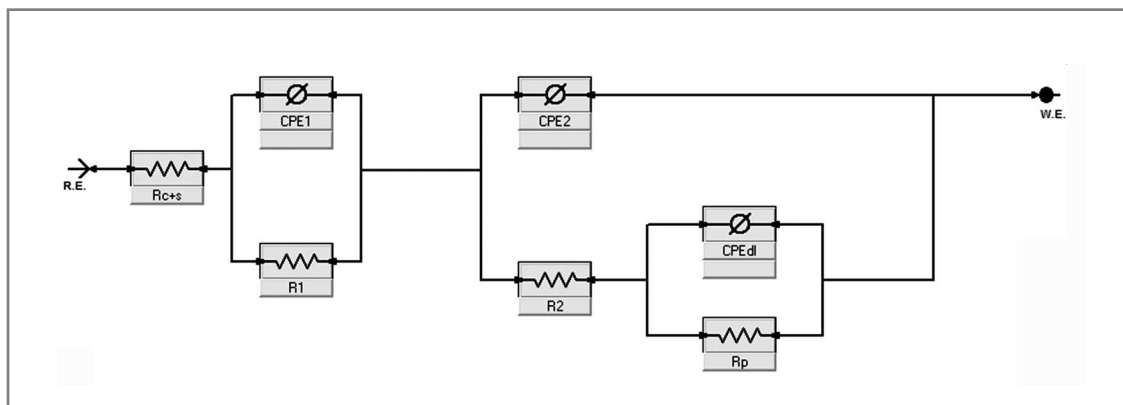


Figura 6. Circuito equivalente para los concretos AASC expuestos después de las 0 horas R_{c+s} : Resistencia del concreto. R_1 y $CPE1$: resistencia y capacitancia de la capa formada por las reacciones; R_2 y $CPE2$: Resistencia y capacitancia de la zona interfacial pasta agregados; R_p y $CPEdl$: resistencia de transferencia de carga y capacitancia de la doble capa. (D. John et al., 1981; F. Wenger et al., 1987)

Figure 6. Equivalent circuits for AASC concretes exposed after 0 hours R_{c+s} : concrete resistivity. R_1 and $CPE1$: resistivity and capacitance of layer formed by reactions. R_2 and $CPE2$: resistivity and capacitance of paste/aggregate interfacial zone. R_p and $CPEdl$: load transfer resistivity and double layer capacitance (D. John et al., 1981; F. Wenger et al., 1987)

Tabla 2. Parámetros del concreto AASC después del nivel 0 de carbonatación
 Table 2. AASC concrete parameters after carbonation level 0

Parámetros/ <i>Parameters</i>	AASC1	AASC2	AASC3
Rc+s ($\Omega \text{ cm}^2$)	133	123	129
CPE1 (S*s^a)	0,1431	0,2532	0,396
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	249	187	141
CPE2 (S*s^a)	51,38e-12	7,8e-4	2,47e-
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	5410	3340	1550
CPEd1 (S*s^a)	71,8e-3	56,15e-3	39,96e-3
Rp ($\text{k}\Omega\text{-cm}^2$)	125,01	63	9

Con respecto a la Tabla 2 se observa que la resistencia del concreto (R_{c+s}) en los diferentes niveles de carbonatación es muy similar; esto indica que la resistencia de poro del concreto, término con el cual es conocido este parámetro, tiene una tendencia a mantenerse constante. Si comparamos éste con el reportado en la Tabla 1 para el concreto AAS a los 28 días de curado y 0 horas de exposición, se aprecia que este último presenta un valor 4 veces superior, lo que indica que la calidad de la matriz se ve modificada por el efecto de la carbonatación y por tanto el concreto carbonatado induce con mayor facilidad un proceso corrosivo sobre el acero estructural. El valor de la resistencia R1 (Tabla 2), que se ha relacionado a las reacciones formadas en la capa externa, se reduce en la medida que se incrementa el espesor del concreto carbonatado. Este mismo comportamiento es observado para las resistencias denominadas R2 y Rp, donde se observa que a mayor tiempo de carbonatación menor es el valor de estos parámetros. El valor de capacitancia CPE1 y CPE2 aumenta a medida que transcurre el tiempo de carbonatación, este último se puede atribuir a la capa que se empezó a generar en la interfase de los agregados; por el contrario CPE1 disminuye, esto es debido a que la capa pasivante del acero empieza a ser vulnerable a medida que se dan las reacciones de carbonatación en el concreto.

3.2.2 Exposición en ambiente natural

Para el caso del concreto expuesto a ambiente natural se obtuvo los gráficos presentados en la Figura 7; se asocian los circuitos incluidos en la Figura 5 para el nivel 0 y en la Figura 8 para el resto de niveles. Los comentarios relacionados con el nivel 0 fueron incluidos en el numeral anterior.

En la Figura 7 se observa que la tendencia presentada por el concreto AASC es contraria a la hallada por el AASA, por lo que la exposición natural permite que los parámetros electroquímicos adquieran un valor mayor y así aumente su resistencia a la polarización la cual generaría un valor menor en la velocidad a la corrosión. Cuando el concreto se deja a exposición en ambiente natural se observa una fluctuación en el valor de la resistencia eléctrica del concreto con respecto al valor registrado de a los 28 días de curado; este efecto puede asociarse a que el material continua su proceso de hidratación normal logrando una mayor compacidad y por tanto el ataque del dióxido de carbono, en los bajos niveles presentes (0.03%), sobre la superficie del concreto se ve reducido notablemente. Aun a tiempos largos de exposición el efecto de reducción en la resistencia eléctrica es mínimo contrario a lo observado en los especímenes expuestos a carbonatación acelerada. El resto de parámetros, R1, CPE1, CPE2 y R2 en términos generales incrementan con respecto al AAS. Específicamente, la resistencia a la polarización (R_p) a 1050 horas de exposición en ambiente natural (AASA 3 nivel) muestra un incremento importante, del orden de 5 veces con relación al nivel 0, esto significa una mayor estabilidad de la capa pasivante sobre la superficie del acero.

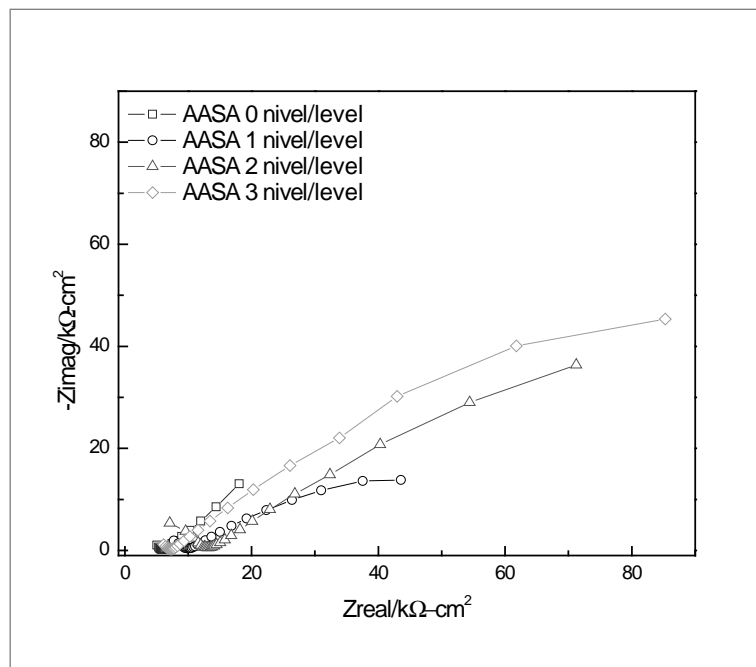


Figura 7. Diagrama de Nyquist correspondiente al concreto AASA expuestos a ambiente natural

Figure 7. Nyquist diagram corresponding to AASA exposed to natural environment

El circuito de la Figura 8 es el más común en el estudio de sistemas que involucran concretos, este modelo se encuentra en varios trabajos, entre ellos el de B. Assouli (Assouli et al., 2005). La resistencia R_{c+s} , corresponde al dominio de alta frecuencia (entre 100KHz y 1KHz) y se relaciona con la resistencia eléctrica del concreto, incluyendo la resistencia del electrólito (la resistencia del electrólito es insignificante comparado a la resistencia del concreto). R_{c+s} puede también incluir las contribuciones de los efectos de la cubierta es decir la interfase entre el electrolito y el concreto. La resistencia R_1 , corresponde al dominio intermedio de la frecuencia (de 1kHz a 50Hz), y se emplea para representar la resistencia en la zona de transición. El CPE1 corresponde a la representación de la capacitancia no-ideal en la zona de transición de interfase cemento/agregados cercanos al poro. El dominio de la frecuencia baja (50Hz a 1mHz) se utiliza para evaluar el proceso de la transferencia de carga conjuntamente con el proceso del transporte de masa y corresponde normalmente a la resistencia R_p ; CPE2 se utiliza para determinar la capacitancia no-ideal de la superficie de acero. Los valores obtenidos para estos parámetros se presentan en la Tabla 3.

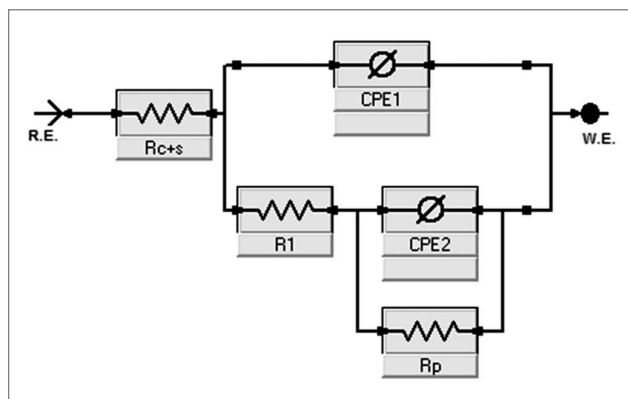


Figura 8. Circuito equivalente correspondiente a los concretos AAS expuestos a ambiente natural evaluados después de las 0 horas
 Figure 8. Equivalent circuit corresponding to AAS concretes exposed to natural environment and evaluated after 0 hours

Tabla 3. Parámetros del concreto AASA después del nivel 0 de carbonatación
 Table 3. AASA concrete parameters after carbonation level 0

Parámetros/ <i>Parameters</i>	AASA1	AASA2	AASA3
R_{c+s} (Ω)	751,8	708	602,7
R_1(KΩ)	10,005	10,301	10,342
CPE1(S*s^a)	0,071e-6	0,0935e-6	0,0405e-6
R_p(KΩ)	40,610	70,133	80,513
CPE2(S*s^a)	0,14	0,18	0,918

Cuando el concreto se deja a exposición en ambiente natural se observa un aumento en la resistencia eléctrica del concreto con respecto al valor registrado de 517Ω a los 28 días de curado (Tabla 1). Este efecto puede asociarse a que el material continúa su proceso de hidratación normal logrando una mayor compacidad y por tanto el ataque del dióxido de carbono, en los bajos niveles presentes (0,3%), sobre la superficie del concreto se ve reducido notablemente. Aún a tiempos largos de exposición el efecto de reducción en la resistencia eléctrica es mínimo contrario a lo observado en los especímenes expuestos a carbonatación acelerada (Tabla 2). El resto de parámetros, R1, CPE1, CPE2 y Rp en términos generales incrementan aunque en grados diferenciados. Específicamente, la resistencia a la polarización Rp a 1050 horas de exposición en ambiente natural (AASA3) muestra un incremento importante, del orden de 8 veces con relación a el nivel 0, esto significa una mayor estabilidad de la capa pasivante sobre la superficie del acero.

4. Conclusiones

- La resistencia mecánica del concreto AAS disminuye cuando es sometido a un proceso de carbonatación acelerada debido a que muestran una disminución en el valor de la resistencia a la compresión con relación al obtenido a los 28 días de curado.
- El efecto de la carbonatación en el concreto AAS se observa desde el comienzo debido a que los parámetros electroquímicos disminuyen considerablemente, en especial el valor de la resistencia a la polarización.
- Los concretos AAS sometidos a condiciones de ambiente natural muestran un aumento en todos los parámetros electroquímicos, debido a la continuación del proceso de hidratación.
- La espectroscopia de impedancia electroquímica es una herramienta apropiada para obtener en detalle la información sobre las características del concreto en especial en la interfase presente en este material, La técnica EIS es conveniente debido a que permite ser usada en medios de baja conductividad, simultáneamente puede determinar los siguientes parámetros: resistencia eléctrica del concreto, resistencia a la polarización, capacitancia de la doble capa, entre otros. Se pueden cuantificar los cambios presentados en cada una de las interfases, a través de la equivalencia del circuito eléctrico.

5. Referencias / References

- Aperador W., Mejía de Gutiérrez R., Bastidas D. M. (2009), "Corrosion resistance of carbonated alkali-activated slag concrete" *Corros Sci*, 51, [4], 2027-2033.
- Assouli, B.F., Simescu, G. Debicki and Idrissi H (2005), "Detection and Identification of concrete cracking during corrosion of reinforcing concrete by acoustic emission coupled to the electrochemical techniques" *NDT&E International*, 38, [2], 682-689.
- ASTM A 706-08 Standard 2008, Standard specification for low-alloy steel deformed and plain bars for concrete reinforcement, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials.
- Blanco G., Bautista A., Takenouti H. (2006), "EIS study of passivation of austenitic and duplex stainless steels reinforcements in simulated pore solutions" *Cement and Concrete Composites*, 28, [3], 212-219.
- Bastidas D.M., Fernández-Jiménez A., Palomo, González J.A. (2008), "A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars" *Corros Sci*, 50, [3], 1058-1065.
- Bastidas D.M., Cobo A., Otero E., González J.A. (2008), "Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures: advantages and pitfalls" *Corros Eng Sci Techn* 43, [1] 248-255.
- Bastidas D.M. (2007), "Interpretation of impedance for pores electrodes and diffusion processes" *Corrosion* 63, [2], 515-521.
- Feliu V., González J.A., Andrade C., Feliu S. (1998), "Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. Experimental Evidence and theoretical predictions" *Corros Sci* 40, [3] 975-993.
- Lasia A., (1999) "Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications", New York, Département de chimie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke Quebec, 32 [2] 134-187.
- Montemor M., Simões A., Ferreira M. (2003), "Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques" *Cement & Concrete Composites*, 25, [1], 1-12.
- Moreno M., Morris W., Alvarez M. G. and Duffó G. S. (2004), "Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content" *Corrosion Science*, 42, [11], 2681-2699
- Moreno M., Morris W., Alvarez M.G., Duff G.S. (2004), "Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions. Effect of carbonation and chloride content" *Corros Sci* 46, [5], 2681-2699.
- Puertas F., Palacios M., Vázquez T. (2006), "Carbonation process of alkali-activated slag mortars" *J Mater Sci*, 41, [5], 3071-3082.
- Sagües A. A. (1987), "Technical note: equivalent circuits representing the impedance of corroding interface". *Corrosion*, 44 [3], 555-559.
- Searson J. D., Dawson J.L. (1981), "Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions", *British Corrosion Journal*, 16 [1], 102-106.
- Shi C. (1996), "Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars" *Cement Concrete Res*, 26 [3], 1789-1799.
- Song H.W., Saraswanthy V. (2006), "Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag. An overview" *J Hazard Mater*, 138, [2], 226-233.
- Wenger F., Galland J., Lemoine L. (1987), "Application of electrochemical impedance measurements to the monitoring of corrosion of reinforced concrete structures in marine environment". *EUROCOR 87*, Karlsruhe, Germany, 245-252.