

## IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE PULSO GALVANOSTÁTICO PARA EVALUAR EL GRADO DE PASIVACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DE LOS CONCRETOS

O. Fernández<sup>1</sup>, W. Aperador<sup>2,3\*</sup>, R. de J. Torres<sup>1</sup>, E. Vera<sup>1</sup>, R. Mejía de Gutiérrez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Superficies Electroquímica y Corrosión, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, <sup>2</sup>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, <sup>3</sup>Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, <sup>4</sup>Grupo de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle, Cali. g.ing.materiales@gmail.com

### RESUMEN

La aplicación de la técnica de Pulso Galvanostático (GP), en el monitoreo de variables electroquímicas del acero de refuerzo de los concretos, presenta una alternativa de evaluación que tiene sustanciales ventajas respecto a la técnica más utilizada como lo es LPR, ya que al tener un control de la corriente aplicada, esto minimiza los problemas de ruido en la medición de potenciales de polarización pequeños, dotando a la técnica de pulso galvanostático de robustez y confiabilidad en los cálculos de la resistencia a la polarización entre otras variables. La técnica de GP induce una corriente controlada y su respuesta es analizada en tres partes,  $R_{\Omega}$  que está relacionada con el electrolito del concreto o con los productos de corrosión; CPE es el elemento de fase constante que corresponde al proceso de carga de la doble capa;  $R_1$  es la resistencia a la polarización. Esta técnica se utilizó para evaluar en un método acelerado de carbonatación mediante la exposición de las probetas en una cámara de carbonatación con 3% de dióxido de carbono al 65% de HR durante diferentes tiempos, hasta alcanzar la completa carbonatación del concreto, con el propósito de evaluar el efecto de la despasivación debido al ingreso del  $\text{CO}_2$ . La técnica permitió establecer con gran exactitud los parámetros electroquímicos presentes en la interfase metal-concreto, además de la resistencia propia del concreto, dando mejor precisión que al utilizar técnicas como LPR o EIS [17, 18].

**Palabras claves:** Celda electroquímica, corrosión, concreto.

### ABSTRACT

The application of galvanostatic pulse technique (GP) in the monitoring of electrochemical variables of the reinforcement steel of the concretes, presents an alternative of assessment that has significant advantages over the most used technique such as the LPR, since having control of the applied current, this minimizes noise problems in the potential measuring of small polarization, giving the galvanostatic pulse technique robustness and reliability in the calculations of the polarization resistance among other variables. The GP technique induces a controlled stream and its response is analyzed in three parts,  $R_{\Omega}$  which is related to the electrolyte of the concrete or with the corrosion products; CPE is the constant phase element corresponding to the charging process of the double layer;  $R_1$  is the resistance to polarization. This technique was used to evaluate in an accelerated method of carbonation by exposing the tests tubes in a carbonation chamber with 3% carbon dioxide to 65% RH during different times until reaching full carbonation of concrete, in order to assess the depassivation effect due to  $\text{CO}_2$  entry. The technique allowed to establish very accurately the electrochemical parameters present in the metal-concrete interface, as well as the resistance of the concrete itself, giving better accuracy than when using techniques such as LPR and EIS [17, 18].

**Keywords:** Electrochemical cell, corrosion, concrete.

## 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las barras de acero es la principal causa de daño y deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado. El acero embebido en un concreto de buena calidad es protegido del ambiente atmosférico por la alta alcalinidad de la solución del poro ( $\text{pH} > 12,5$ ) el cual, en la presencia de oxígeno, pasiva el acero. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros "en ambientes marinos" o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto ( $\text{pH} \approx 8$ ), desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo [1-4].

La prevención y detección del deterioro de infraestructuras de concreto es uno de los mayores retos. Varias técnicas cuantitativas no destructivas basadas en métodos electroquímicos para medir la velocidad de corrosión han sido usadas para detectar la corrosión tempranamente. La técnica de pulso galvanostático se presenta como solución a problemas con la interpretación y cálculo de parámetros electroquímicos, implementada en aplicaciones de campo hacia el año de 1988 en estructuras de concreto reforzado [5-9]. Para el estudio de la interfase concreto-acero, tomando como antecedentes la formación de macro celdas a causa de la coexistencia de áreas pasivas y activas en la misma barra de acero durante el proceso de corrosión, se propone la celda simple de Randles, modelo de circuito eléctrico equivalente a la celda electroquímica de la interface mencionada, como fundamento de la técnica de pulso galvanostático en la toma de los parámetros electroquímicos, implementada en el prototipo potencióstático que a diferencia de equipos convencionales es manipulado por un software desarrollado en instrumentación virtual en el lenguaje LabVIEW 7.1, flexible a cualquier modificación en aquellas situaciones en las que se requiera experimentar o ajustar los parámetros requeridos por la técnica sin estar limitado a

la rigidez del ambiente de trabajo –software– y por la versatilidad y capacidad de una tarjeta potencióstática [10,14].

El objetivo de este 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 (con y sin carbonatación acelerada). Para efectos de comparación se utilizaron las mismas barras de acero pero embebidas en concreto tradicional Portland Tipo I. Las probetas fueron evaluadas mediante la aplicación de la técnica GP.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales y reactivos

Para el estudio de la corrosión de las barras de aceros embebidas se utilizaron dos tipos de concreto, los basados en escoria activada alcalinamente (AAS) y los fabricados con cemento Portland tipo I (OPC), de uso común en construcción. Las mezclas de AAS utilizaron como cementante escoria granulada de alto horno activada con "Silicato de Sodio" ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) a una concentración de 5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  expresado como porcentaje en peso de escoria a incorporar, con una relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de 2.4. Las mezclas OPC utilizaron cemento portland comercial sin ningún aditivo. La fabricación de las mezclas de concreto en ambos casos contenía una dosificación de material cementante de  $300 \text{ kg/m}^3$ . 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). 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 19mm, gravedad específica de  $2,94 \text{ g/cm}^3$ , masa unitaria compacta de  $1,86 \text{ kg/cm}^3$ , masa unitaria suelta de  $1,70 \text{ kg/cm}^3$ , y absorción de 1,3%. Una arena con superficie específica de  $2,47 \text{ g/cm}^3$ , masa unitaria compacta de  $1,67 \text{ kg/cm}^3$ , masa unitaria suelta de  $1,58 \text{ kg/cm}^3$ , absorción de 2,9%. Finalmente, para el fraguado las mezclas con cemento Portland fueron curadas bajo agua, a las de

escoria activada se les acondiciono un ambiente controlado para el curado, con humedad relativa de 90% y una temperatura constante de 20°C [15], el diseño experimental se presenta en la tabla 1. Con el propósito de estudiar bajo diversas condiciones el fenómeno de la corrosión del acero embebido en cada uno de los concretos, se incluyó el factor condiciones de estudio, este corresponde al ambiente en el cual estuvieron inmersas las probetas

durante la totalidad de los análisis. 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% CO<sub>2</sub>, 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% CO<sub>2</sub>.

Tabla 1. Cuadro experimental de la investigación.

Tiempo de carbonatación	TIPO DE CONCRETO			
	OPC (Ordinary portland concrete)		AAS (alkali activated slag)	
	OPC con carbonatación (OPCC)	OPC sin carbonatación (OPCA)	AAS con carbonatación (AASC)	AAS sin carbonatación (AASA)
0 horas	Curva GP	Curva GP	Curva GP	Curva GP
350 horas	Curva GP	Curva GP	Curva GP	Curva GP
700 horas	Curva GP	Curva GP	Curva GP	Curva GP
1050 horas	Curva GP	Curva GP	Curva GP	Curva GP
1700 horas	Curva GP	Curva GP	-	-
2600 horas	Curva GP	Curva GP	-	-

## 2.2. Equipo

Para la caracterización electroquímica se implementó la técnica de Pulso Galvanostático (GP), mediante un potencióstato/galvanostato PG TEKCORR v 4.0, empleando una celda compuesta por un contraelectrodo de grafito, un electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> y como electrodo de trabajo se utilizó el acero estructural ASTM A 706 [16] con un área expuesta de 10 cm<sup>2</sup>. Las medidas electroquímicas se realizaron para los concretos de AAS a 0, 350, 700 y 1050 horas de exposición. Es de anotar que las probetas de AAS a 1050 h se encuentran totalmente carbonatadas, para los concretos OPC se realizaron medidas hasta los 2600 h.

Las mediciones de los concretos expuestos al ambiente natural se realizaron a las mismas edades de exposición. Los niveles de corriente de polarización fueron de 100 µA, los tiempos de exposición de 20 segundos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estudiar el sistema se utiliza un circuito equivalente tipo Randles (figura 1), el cual consiste en una resistencia óhmica que está en serie con un circuito en paralelo que combina un elemento de fase constante (CPE) que modela el comportamiento de la doble capa y un resistor que simula la resistencia a la polarización.

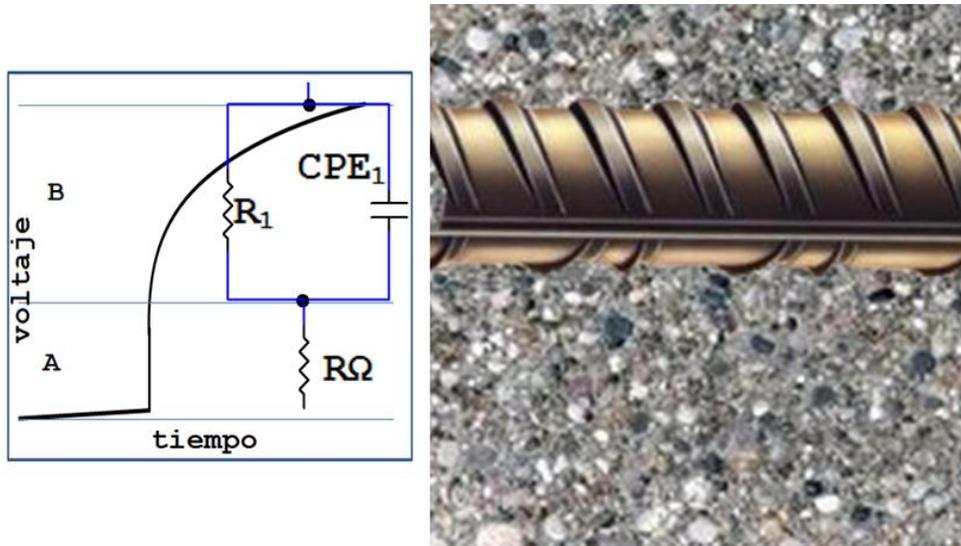


Figura 1. Modelo de la interfase electroquímica.

Esta técnica, aplica un escalón de corriente, el cual induce un potencial y en su respuesta se logran obtener tres parámetros:

- La Resistencia óhmica, relacionada con el electrolito del concreto o con los productos de corrosión, se caracteriza por un cambio instantáneo en el potencial al aplicar la corriente, se calcula por la relación del cambio de potencial respecto al cambio de corriente.
- El elemento de fase constante CPE, corresponde al proceso de carga de la doble capa, en donde se nota un aumento atenuado del potencial en el tiempo, en esta etapa se puede encontrar la información necesaria para hallar las reacciones que generan la corrosión, la inclinación de la gráfica da una indicación cualitativa del grado de pasivación de la interfase.
- Por último se encuentra la Resistencia a la polarización que indica cual es la resistencia que está oponiendo la interfase concreto acero hacia el paso de los iones.

En la figura 2 se muestra la evaluación de la corrosión con la técnica de pulso galvanostático para el concreto AAS, se halla que la tendencia es a disminuir su valor de resistencia a la polarización, a medida que avanza su proceso de carbonatación, esto se debe al efecto del  $\text{CO}_2$  en el sistema

analizado, por ésta razón también el valor de resistencia óhmica correspondiente al electrolito del concreto va disminuyendo, por lo tanto se observa en su valor el efecto de carbonatación en la pérdida de la pasivación del sistema analizado. Cuando se analiza el concreto AAS a exposición natural es posible observar que este material tiende a aumentar sus parámetros electroquímicos, ya que todas las formas de las curvas están por encima del material analizado a las 0 horas denominado AAS; la curva que muestra un buen comportamiento electroquímico es la hallada en el nivel 3 (1050 horas), por lo que su potencial de respuesta se eleva más que las otras. En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros encontrados con la técnica GP para el concreto AAS sin carbonatación (AASA) y carbonatación acelerada (AASC), aquí se puede observar que el valor de la resistencia óhmica correspondiente al electrolito del concreto tiene una variación, ya que registra un valor alto en el inicio de la evaluación (350 horas), luego de las 700 horas de evaluación muestra una disminución que se prolonga hasta el final del análisis, esta fluctuación del sistema se puede deber a que las reacciones del material cementicio generan una variación en el valor de resistencia del electrolito sin un rumbo definido. La resistencia a la polarización muestra un aumento, este incremento se debe a que las reacciones del sistema se siguen generando, lo cual es beneficioso porque aumentan los

parámetros analizados; por otra parte el potencial de corrosión muestra una tendencia hacia potenciales más positivos, siendo esto favorable ya que muestra pasividad en el acero.

Cuando se superponen las curvas de respuesta de la técnica GP para el concreto AAS sometido a carbonatación acelerada y exposición ambiente se puede observar que los sometidos a CO<sub>2</sub> tienen una respuesta de potencial por debajo de material analizado a

las 0 horas, este comportamiento indica que los valores de sus parámetros van a disminuir en comparación al AAS nivel 0 (condiciones iniciales), esto se debe al efecto de la carbonatación acelerada a la que se encuentra expuesto el material, con el concreto AAS expuesto a condición ambiente natural se observa que la respuesta en potencial está por encima del evaluado a las 0 horas, un comportamiento contrario al hallado con el material expuesto a carbonatación.

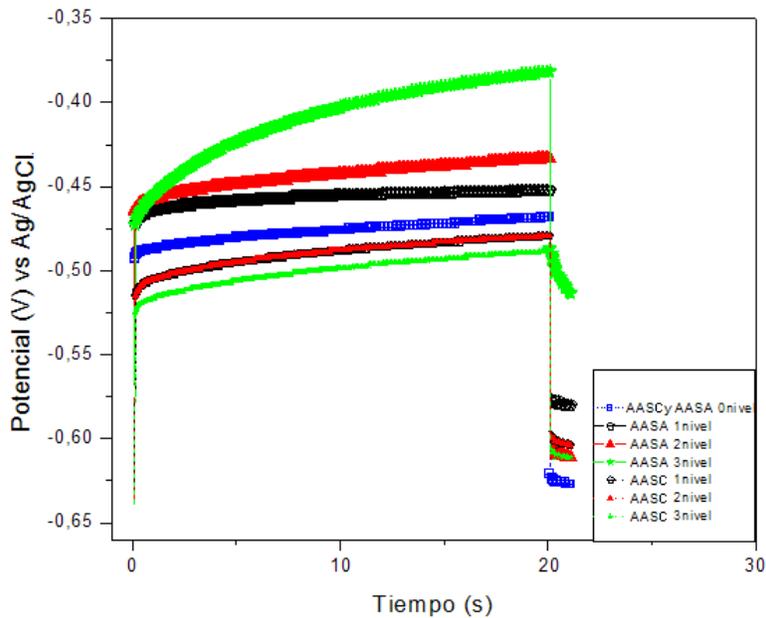


Figura 2. Pulso galvanostático del concreto AAS con y sin exposición a CO<sub>2</sub>

Como se observa en la tabla 2 los valores de resistencia óhmica y la resistencia a la

polarización toman una tendencia a disminuir.

Tabla 2. Resultado del GP utilizado para el concreto AAS con y sin CO<sub>2</sub>.

	R <sub>Ω</sub> (Ω)	R <sub>p</sub> (kΩ*cm <sup>2</sup> )
AAS	247	13,51
AASC		
1 (350 horas)	239	6,74
2 (700 horas)	147	3,65
3 (1050 horas)	162	3,08
AASA		
1	710	43,98
2	637	54,39
3	577	70,23

Quando se evalúa el concreto OPC a ambiente natural mediante la técnica GP, se obtiene que los potenciales de respuesta están por encima del concreto evaluado a 0 horas, este mismo fenómeno es el presentado en el concreto AAS evaluado en las mismas condiciones, el aumento con mayor relevancia es a las 350 horas por lo que su respuesta en potencial es alta, se observa que el potencial aumenta en más de 0,4 V lo que indica que los valores de resistencia están afectados; las otras curvas obtenidas están por encima del OPCA 1 nivel pero su aumento es proporcional y no muy grande. En la tabla 3 se detallan los valores que el valor de resistencia del electrolito del concreto tiene unas variaciones las cuales no generan una tendencia definida, por lo que a las 350 horas de evaluación se observa un aumento alto en este valor, pero a las 700 horas este valor disminuye con valores por debajo del concreto evaluado a las 0 horas, luego a las 1050, este valor empieza a aumentar pero el valor alcanzado está por debajo del hallado a las 350 horas, cuando se hace las medición a las 1700 horas este aumento vuelve a ser alto, pero a las 2600 horas este valor disminuye en comparación a

la última medida. Esta fluctuación en la medida de resistencia del electrolito se puede deber al hecho de que en el tiempo de evaluación las reacciones que ocurren en el concreto están en proceso, lo que implica que sus valores sean oscilantes incluso a tiempos prolongados como se observó a las 2600 horas. En cuanto a la resistencia a la polarización se observa que el aumento significativo fue cuando se realizó su evaluación a las 350 horas, luego de este tiempo el aumento fue pequeño pero con una tendencia bien marcada la cual indicaba que al aumentar el tiempo de la prueba la resistencia a la polarización aumenta.

En la figura 3 se observa la comparación de los concretos OPC sometidos tanto a carbonatación como ambiente se puede observar que el concreto evaluado a condiciones ambientales tiene una mejor curva de respuesta, por lo tanto este material siempre tiene un potencial mayor que el avaluado a las mismas horas, pero expuesto a carbonatación, esto se debe al hecho de que al someterlo a carbonatación acelerada los parámetros disminuyen y con ello disminuya su curva de respuesta.

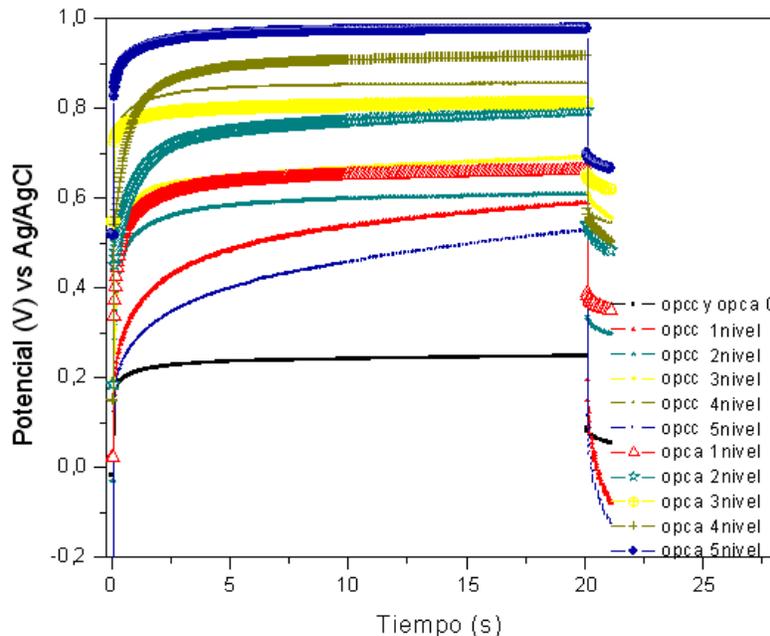


Figura 3. Pulso galvanostático del concreto OPCC y OPCA con y sin exposición a CO<sub>2</sub>.

Tabla 3. Resultado del GP utilizado para el concreto OPC con y sin CO<sub>2</sub>.

Nivel	$R_{\Omega}$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $k\Omega \cdot cm^2$ )
OPC (0 horas)	189	32,4
OPCC		
1 (350 horas)	742	78,6
2 (700 horas)	342	98,4
3 (1050 horas)	324	100,3
4 (1700 horas)	309	112,6
5 (2600 horas)	307	463,2
OPCA		
1 (350 horas)	492	94,5
2 (700 horas)	162	121,1
3 (1050 horas)	372	132,4
4 (1700 horas)	545	147,9
5 (2600 horas)	448	177,8

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio electroquímico del concreto reforzado sometido a los ambientes de carbonatación acelerada y natural y comparar los valores del OPC con los obtenidos en los concretos AAS se aprecia, que en ambos casos, al final del ensayo los aceros se encuentran en estado activo. Los valores de resistencia a la polarización muestran que en condiciones de exposición natural  $R_p$  es creciente en los dos tipos de concreto, aunque es de anotar que el acero embebido en las probetas de OPCA reporta valores de  $R_p$  de hasta 2,5 veces superiores a los correspondientes en el concreto AASA. También se observa una tendencia a la estabilización del valor de  $R_p$  en los concretos OPCA, mientras por el contrario, en los concretos de AASA la tendencia es creciente a lo largo del ensayo, esto indica que a la edad final de ensayo en ambos casos se ha generado la película pasiva y esta es estable.

La ventaja de la técnica GP, radica en el hecho de ser un ensayo rápido, de baja polarización que mantiene poco alterada la interfase, con lo que puede escalarse a ensayos in situ, también es de resaltar la facilidad con la cual es posible separar la resistencia óhmica (propia de la matriz del concreto), de la resistencia a la polarización, obteniendo valores más precisos de los parámetros de la interfase concreto-acero, sin acudir a otros métodos electroquímicos.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Moreno, E., Dominguez, G., Gómez, F. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de carbonatación. Moreno et.al/Ingenieria, Vol. 8-2 (2004), p. 117-130.
- [2] Sathiyarayanan, S., Panjali Natarajan, Saravanan, K., Srinivasan, S., Venkatachari, G., Castro, M. Y. Corrosion monitoring of steel in concrete by galvanostatic pulse technique. Cement and Concrete Composites, Vol. 28 (2006), p. 630-637.
- [3] Frolund, T. Jensen, F. N., Bassler, R. Smart structures: determination of reinforcement Corrosion rate by means of the galvanostatic pulse Technique. First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS (2002), p.1-8.
- [4] Kelly, R. Electrochemical Techniques in corrosion science and engineering. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. ISBN: 0-8247-9917-8.
- [5] Elsener, B. "Corrosion rate of steel in concrete—Measurements beyond the Tafel law" Corrosion Science, Vol 47 (2005), p. 3019-3033.
- [6] Elsener, B., Wojtas, H., Bohni, H. Galvanostatic pulse measurements rapid on-site corrosion monitoring, Proc. Inter. Conf. Corrosion and Corrosion Protecting of Steel in Concrete, Vol 1 (1994), p. 236 - 243.
- [7] Andrade, C., Keddani, C. M., Nóvoa, X. R., Pérez, M. C., Rangel, C. M., Takenouti, H. Electrochemical behavior of steel rebars in concrete: influence of environmental factors

and cement chemistry. *Electrochimical Acta*, Vol 46 (2001), p. 3905–3912.

[8] Andrade, C., Alonso, C., Sarria, J. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. *Cement & Concrete Composites*, Vol 24 (2002), p. 55–64.

[9] John, D., Searson, P. C., Dawson, J. L. Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions, *British Corrosion Journal*, Vol 16 (1981), p. 102-106.

[10] Law, D. W., Millard, S. G., Bungey, J. H. Use of galvanostatic pulse measurements on active reinforcing steel in concrete to assess corrosion rates, *British Corrosion Journal*, Vol 36 (2001), p. 75-80.

[11] Gonzalez, J. A., Cobo, A., Gonzalez, M. N., Feliu, S. On-site determination of corrosion rate in reinforced concrete structures by use of galvanostatic pulses. *Corrosion Science*, Vol 43 (2001), p. 611-625

[12] Newton, J. G., Sykes, J. M. A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete, *Corrosion Science*, Vol 28 (1989), p. 1051-1057.

[13] Miranda, J. M., Fernández Jimenez, A., Gonzalez, J. Palomo, A. "Corrosion resistance in activated fly ash mortars" *Cement and*

*Concrete Research*, Vol. 35 (2005), p. 1210–1217.

[14] Byfors, K., Klingstedt, G., Lehtonen, V., Pyy, H., Romben, L. Durability of concrete made with alkali-activated slag, *Proceedings 3rd CANMET/ACI Inter. Conf.*, Trondheim, Norway, ACI: Detroit, Vol 2 (1989), p. 1429–1466.

[15] Christidis, K., Gow, K., Robertson, P., Pollard, P. Intelligent potentiostat for identification of heavy metals in situ, review of scientific instruments, Vol. 77 (2006), p. 1193-1199.

[16] ASTM A 706 bars are more suitable for seismic applications, bar bending and welding.

[17] Aperador, W., Mejía de Gutiérrez, R., Bastidas, D. M. Corrosion resistance of carbonated alkali-activated slag concrete, *Corrosion Science*, 51, p. 2027–2033, (2009).

[18] Aperador, W., Fernandez, O., Mora, M., Mejía de Gutiérrez, R., Vera, E., Torres, R. Análisis electroquímico de la interfase concreto-acero por medio de las técnicas Modulación de Frecuencia Electroquímica y Pulso Galvanostático, *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009*; S1 (1) p. 107-114.