



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



**CORROSIÓN EN HORMIGÓN ARMADO FABRICADO CON ADITIVO BAJO  
INGRESO PREMATURO DE CLORUROS MEDIANTE PULSO GALVANOSTÁTICO  
Y RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL**

H. A. Estupiñán Duran<sup>1</sup>, D. Y. Peña Ballesteros<sup>1</sup>, F. A. Calderón<sup>2</sup>, C. Vásquez Quintero<sup>1</sup>, L. E. Zapata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigaciones en Corrosión; Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander  
<sup>2</sup> CIMAV

**Resumen**

En este trabajo se examinan las propiedades interfaciales y del seno del material en el sistema acero/concreto empleando el método de pulso galvanostático (MPG) y el método de resistencia a la polarización lineal (LPR) ante diversas situaciones físicas: 5 y 10% de aditivo (p/p del cemento), ambientes con y sin cloruros, diferentes relaciones a/c y bajo dos condiciones de contaminación prematura del patógeno. Los valores de los parámetros interfaciales como capacitancia de la doble capa ( $C_{dl}$ ) y resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y del seno del material como resistencia del concreto y del electrolito ( $R_c$ ) son extraídos por medio de circuitos eléctricos equivalentes desde los datos de GPM con el fin de determinar los valores de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) en cada condición de exposición prematura al cloruro. La técnica de LPR fue empleada para comparación.

**Palabras clave:** pulso, RPL, concreto reforzado, capacitancia interfacial

**ABSTRACT**

In this work examines the interfacial properties and the material bulk material in the steel / concrete by using the Galvanostatic Pulse Method (GPM) and the linear polarization resistance method to various physical situations: 5 & 10% additive (w/w cement), with and without chlorides environments, different relationships a/c under two conditions of premature contamination of the pathogen. The values of interfacial parameters such as capacitance of double layer (CDL) and resistance to polarization (RP) and the material bulk as concrete resistance and electrolyte ( $R_c$ ) are extracted by means of equivalent electrical circuits from data GPM in order to determine the values of the corrosion current density ( $i_{corr}$ ) in each exposure condition premature chloride. The LPR technique was used for comparison.

**Key words:** pulse, LPR, reinforced concrete, interfacial capacitance



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



### INTRODUCCIÓN

La confiabilidad operativa de las obras civiles está empezando a ser un factor de considerable interés en los países tercer mundistas<sup>1</sup>. El incremento en el número de edificios y puentes de concreto reforzado que muestran signos de deterioro producto del ambiente al que están expuestos, ha planteado la necesidad de utilizar métodos más precisos para predecir la disminución de resistencia y su confiabilidad operativa<sup>2</sup>. Muchos de los colapsos de estructuras en servicio, reportados en países industrializados como los Estados Unidos, Japón y Europa, se atribuyeron a la degradación de la resistencia de diseño de la estructura como producto de los agentes ambientales<sup>3</sup>. Aunque son diversos los mecanismos de deterioro presentes en las estructuras por ejemplo, ataque por sulfatos, corrosión, reacción álcali-agregado y ciclos de hielo-deshielo<sup>4</sup>. Si bien este panorama es alarmante, las estadísticas que dan muestra de ello sólo se realizan en los países desarrollados<sup>5</sup>, no por el hecho que sean ellos los mayores afectados, sino porque responde a políticas bien formuladas y desarrolladas para mejorar la economía con un fuerte apoyo en aquellos sectores más representativos del rubro nacional, como lo es la construcción civil. Desafortunadamente, esta situación es contraria a las políticas de los países tercer mundistas, y América Latina no es la excepción en tal sentido; debido a ello, no aparecen reportes oficiales de datos que cuantifiquen el daño efectivo o el daño potencial ocasionado por la corrosión del acero en la infraestructura civil.

La corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto es reconocida como uno de los mayores problemas en las obras de construcción civil, convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros de mantenimiento de estructuras de concreto, tales como carreteras, puentes y presas<sup>6</sup>. Es por esto que el deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años ya que en cifras, se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura sólo en los Estados Unidos<sup>7</sup>. Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por año alrededor de 100,000 millones de dólares siempre y cuando se tomen medidas efectivas de prevención contra la corrosión<sup>8</sup>.

El fenómeno de corrosión del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado como lo son, la adherencia, formación de agrietamientos y desprendimientos de secciones de concreto, comprometiéndose no sólo la integridad estructural, sino la vida misma de las personas que las ocupan<sup>9</sup>. En este orden de ideas, este trabajo está enfocado en contribuir al estudio de una técnica de aplicación relativamente nueva en los concretos, conocida como pulso galvanostático corto, que promete constituirse como una herramienta fundamental a la hora de tomar decisiones sobre el estado de la corrosión in situ en las construcciones en forma rápida, sencilla y sobre todo confiable.



## 1. ASPECTOS TEÓRICOS

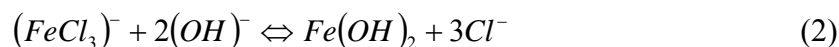
### 1.1 Corrosión en hormigón armado

La corrosión de la armadura de acero en el concreto, es un proceso electroquímico que requiere de una reacción de oxidación, otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito, de esta manera se presentan dos áreas sobre la superficie del metal, una de las cuales actúa como ánodo y la otra como cátodo. El concreto funciona como ion electrolítico dentro de un circuito cerrado, fenómeno que se produce por procesos de carbonatación o, por penetración del ion cloruro. En términos generales, para que se produzca la corrosión en el concreto se necesitan las siguientes condiciones: La presencia de un ánodo que produce los electrones, el cátodo en la superficie donde se efectúa la reducción, la disponibilidad de oxígeno en correspondencia con el cátodo, la disponibilidad de agua (humedad) en la ubicación del cátodo y una conexión eléctrica entre el ánodo y el cátodo que permita la transferencia de electrones<sup>10,11</sup>.

En el caso de la corrosión por cloruros, cabe destacar que el agua de mar contiene sales disueltas, que resultan agresivas para el concreto, entre las cuales se cuentan, el NaCl, el MgCl<sub>2</sub>, el MgSO<sub>4</sub>, el CaSO<sub>4</sub>, el KCl y el K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La composición del agua respecto a cada uno de estos compuestos varía de una zona geográfica a otra, presentándose mayores concentraciones de sulfatos en algunas localidades, o mayores concentraciones de cloruros al comparar con otros lugares del mundo. En el medio marino se aceleran los procesos de corrosión en las estructuras de concreto armado, por la acción directa del mar o la actividad de la brisa y/o la niebla marina. La corrosión por cloruros, típica de los ambientes marinos, se debe al ión cloruro presente en el agua o en la niebla marina, el cual actúa como un catalizador para la oxidación tomando parte activa en la reacción. Al oxidar al acero para formar el ión complejo cloruro férrico, (FeCl<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, se arrastra este ión inestable en la solución, donde reacciona con los iones hidroxilo disponibles para formar hidróxido de hierro, Fe(OH)<sub>2</sub>, el cual libera iones cloro y consume iones hidroxilo como se esquematiza en las siguientes reacciones<sup>12</sup>:



Seguido por,



Los electrones liberados en la reacción de oxidación fluyen a través del acero hasta la superficie catódica. De este proceso resulta una concentración de ión cloruro y una reducción del pH que favorece la ruptura continua de la película de óxido pasivante. En el concreto armado se retarda o impide la corrosión del acero, cuando el revestimiento de concreto es impermeable y de espesor suficiente, factores que debilitan la penetración de agentes externos<sup>13</sup>.

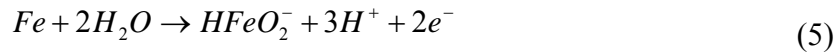
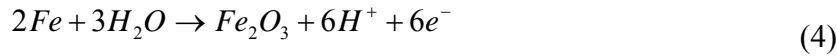
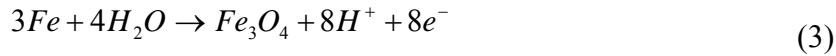
La corrosión del acero en concreto es un proceso electroquímico, lo cual quiere decir que es una reacción que envuelve la transferencia de carga (electrones) desde una especie a otra. Para que una reacción electroquímica ocurra (en ausencia de una fuente electroquímica externa) deben existir dos reacciones de media celda: una reacción capaz de producir electrones (reacción anódica) y otra reacción capaz de consumir electrones (reacción catódica), sin embargo, las



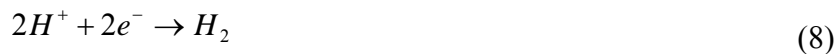
**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



velocidades de producción y consumo deben ser iguales para satisfacer un balance de carga. Para el acero embebido en el concreto, las reacciones anódicas de interés son:



Las posibles reacciones catódicas dependen de la disponibilidad de oxígeno y el pH en los alrededores del acero. Las reacciones más comunes son:



Para un concreto de buena calidad, con un pH del orden de 12,5 a 13,5, estas reacciones son las de mayor interés. En ausencia de otros factores, los óxidos  $Fe_3O_4$  y  $Fe_2O_3$  formarán una capa protectora sobre la superficie del acero<sup>14</sup>.

## 1.2. Estimación de la corrosión en la armadura metálica

La corrosión de la armadura metálica se puede estudiar colocando muestras en diferentes condiciones de temperatura, concentración salina, intemperie, entre otras, y analizar el estado superficial de las varillas o por pérdida de peso. Estos ensayos requieren de períodos prolongados y es indispensable en muchos casos, remover la cubierta de concreto de la varilla, siendo una prueba destructiva.

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema, las cuales tienen como ventaja la rapidez de medición y sensibilidad, además de ser pruebas no destructivas. Cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones de la interfaz acero-concreto y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura. Entre las más utilizadas se encuentran, el método de resistencia a la polarización lineal (LPR) y el método de pulso galvanostático. La primera, es una técnica que proporciona un método simple para determinar la velocidad de corrosión en las estructuras de concreto, basándose en la aplicación de un nivel establecido de corriente, seguido de un monitoreo de potencial o una aplicación de un potencial específico seguido de un monitoreo de corriente. En el método de pulso galvanostático, el potencial de respuesta de un sistema electroquímico es aproximado por un circuito simple tipo Randless (circuito usado para interpretar la respuesta del pulso en los concretos en forma simplificada), el cual, para un paso de corriente  $\Delta I$ , está dado por la ecuación:

$$\eta_T = \Delta I R_\Omega + \Delta I R_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{CR_p}\right)\right) \quad (9)$$



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



Donde  $\eta_t$  es el cambio total en el potencial del electrodo de trabajo,  $\Delta IR_\Omega$  es la caída óhmica en el concreto entre el electrodo de referencia (RE) y el electrodo de trabajo (WE),  $\Delta IR_p$  es la polarización efectiva para un gran tiempo de carga,  $R_p$  es la resistencia a la polarización de las barras de acero,  $C$  es la capacitancia de la doble capa del metal y  $CR_p$  es la constante de tiempo  $\tau$  para el proceso de corrosión<sup>15</sup>.

Una vez la corriente es interrumpida, la carga adquirida por la doble capa es usada gradualmente en la reacción de corrosión. Si no es aplicada una corriente más adelante, entonces el potencial decae exponencialmente con el tiempo

$$\frac{\eta_t}{\eta_{\max}} = \exp\left(-\frac{t}{CR_p}\right) \quad (10)$$

Donde  $\eta_{\max}$  es la polarización máxima para el tiempo cuando la corriente es interrumpida, y  $\eta_t$  es la polarización para un tiempo  $t$  desde la interrupción de la corriente. Un análisis de la ecuación anterior, proporciona un procedimiento para calcular  $R_p$ . Este se basa en las medidas directas de la constante de tiempo para el proceso de corrosión. Derivando de ella que:

$$\frac{\eta_{t1}}{\eta_{t2}} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{CR_p}\right) \quad (11)$$

Y para,

$$\Delta t = CR_p \quad (12)$$

$$\frac{\eta_{t1}}{\eta_{t2}} = \exp(-1) \approx 0.37 \quad (13)$$

Por lo tanto, la constante de tiempo para el proceso de corrosión,  $\tau = CR_p$  puede ser determinada directamente midiendo el intervalo de tiempo necesario que requiere  $\eta_t$  para caer al 37% del valor inicial  $0.37\eta_{t1}$  o para el 63% de haber ocurrido la caída de corriente. La ventaja de esta técnica, es que la estimación de  $\tau$  permite calcular  $R_p$ , contando de antemano con el valor de la capacitancia  $C_{dl}$  obtenida por ajuste de circuitos en datos de pulso por unidad de área. Insertando el valor de  $R_p$  en la ecuación de Stern-Geary, es posible estimar la  $i_{corr}$ . Entonces, si el valor de  $C_{dl}$  por unidad de área es sustituido dentro de  $\tau$ , el valor de  $R_p$ , y de  $i_{corr}$  pueden ser estimados indiferentemente, del número o diámetro de las barras de refuerzo afectadas por la señal eléctrica del pulso<sup>16</sup>.

## **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



Acero estructural de diámetro 3/8" con 36 KSI de módulo de fluencia y con superficie cubierta con calamina fue embebido en una mezcla de material cementicio, Pórtland tipo I, grava, agua y aditivo de humo de sílice comercial tipo SIKA. El inhibidor de corrosión empleado para los sitios activos no deseados en la varilla metálica fue Armatec (SikaTop); el alambre de conducción asociado a cada probeta metálica fue N°12 de cobre, con una conexión hecha por medio de soldadura de bronce en cada probeta de acero. El proceso de preparación de las probetas se llevó a cabo conforme a estándares internacionales (NTC 2289 y ASTM A 706, respectivamente); se adicionó la cantidad de microsílíce a la mezcla de agregados, en cada caso (5% o 10%) y se mezcló durante 1 minuto. Se adicionó el cemento según cada diseño de mezcla y se continuó mezclando durante 3 minutos, finalmente se añadió el agua de amasado con y sin cloruros, dependiendo de la familia a obtener; esto es, las tipo I de contaminación por difusión o las tipo D de contaminación directa, en donde se procedió a mezclar por 2 minutos en cada caso y luego se vació en concreto en cada molde para dejarlo en fraguado durante 24 h en ambiente de laboratorio ( $T \approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\text{H.R} \approx 80 - 98\%$ ). Como agregado grueso se utilizó gravilla de río con tamaño máximo 1" y procedencia de cantera de río local; como agregado fino se utilizó arena de construcción de cantera local con módulo de finura de 1.44.

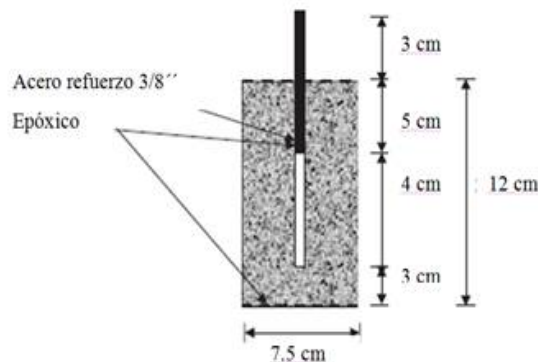
Los especímenes de prueba consistieron en cilindros de concreto reforzado tipo 1:2:3 (agua: cemento: arena) con diámetro de 7.0 cm. y longitud de 14 cm., los cuales fueron fabricados de diversas maneras con el fin de generar los diferentes ambientes de exposición y de trabajo necesarios para aplicar la prueba del pulso.

Con el objeto de diferenciar los diversos especímenes se empleó la siguiente nomenclatura: cada espécimen contaminado fue referenciado por medio de cuatro signos, el primero fue una letra mayúscula (A, B, C), la cual indicó la relación agua/cemento (a/c) de ese espécimen:  $A = 0.4$ ,  $B = 0.5$  y  $C = 0.6$ . Seguido a esto se asignó un dígito desde 1 hasta 4 el cual indicó el número de la réplica, de cada familia se fabricaron 4 réplicas. A continuación se asignaron cualquiera de dos números: 5 o 10, lo cual indicó el porcentaje de aditivo por peso de cemento empleado en la construcción de ese espécimen, solo existieron de dos tipos: 5% y 10% de humo de sílice. Finalmente, se encontraron cualquiera de dos letras mayúsculas: I o D; la primera indica que el modo de contaminación con cloruros fue sólo por medio de difusión a través de la matriz cementicia a las 24 horas de fabricado el espécimen. La letra restante D, indica que el modo de contaminación fue directo, esto es, el espécimen se contaminó durante su fabricación con el agua de amasado (3% en peso) y al igual que el modo indirecto (tipo I), fue sumergido en la solución con cloruros a las 24 horas de fabricado.

Asimismo, los especímenes no contaminados, necesarios para contrastar el comportamiento del pulso ante estructuras sin aditivo y sin cloruros, se referenciaron por medio de tres signos: el primero fue una letra (A, B, C) al igual que en los contaminados, indicando lo siguiente:  $A = 0.4$ ,  $B = 0.5$  y  $C = 0.6$ . Seguido se encontró un dígito desde 1 hasta 4 el cual indicó el número de la réplica y se fabricaron 4 réplicas de cada familia. Finalmente, se siguió con la letra T (testigo), lo cual indicó un espécimen sin ningún tipo de contaminación ni aditivo.

Los concretos cilíndricos fueron fabricados en moldes de polietileno (longitud 150 mm y diámetro 72 mm) y los especímenes de acero fueron embebidos centralmente durante su construcción. El desmolde se llevó a cabo a las 24 horas y todos los especímenes se pasaron al período de curado, con la salvedad que los contaminados (tipo I y tipo D) lo hicieron en agua con cloruros (3% peso) y los testigos lo hicieron en agua sin cloruros. En cada probeta se ubicó un electrodo de trabajo (acero estructural) de longitud 5 cm y diámetro 3/8" el cual, para evitar la corrosión selectiva, se impregnó con inhibidor tipo SIKA (referencia SikaTop-Armatec 108) en la parte final y en la región de contacto eléctrico con el alambre metálico de conducción para las pruebas electroquímicas. El área neta de acero expuesta en cada probeta fue aproximadamente de  $9.42 \text{ cm}^2$ , luego de recubrir con inhibidor los sitios antes especificados.

El montaje para esta investigación fue de tipo externo, este consistió de cuatro contra-electrodos de acero inoxidable (SS) de gran área superficial comparado con el electrodo de trabajo y conectados de tal forma que rodean completamente al espécimen de concreto, con el fin de hacer eficiente la distribución de corriente eléctrica. Las dimensiones de cada electrodo de SS fueron de 15 cm de longitud. El electrodo usado como referencia fue de cobre – sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ). En todas las pruebas el electrolito conductor empleado fue una solución con NaCl analítico de 99% de pureza empleado al 1% de concentración en peso de agua. Este montaje se aprecia en la figura 1.



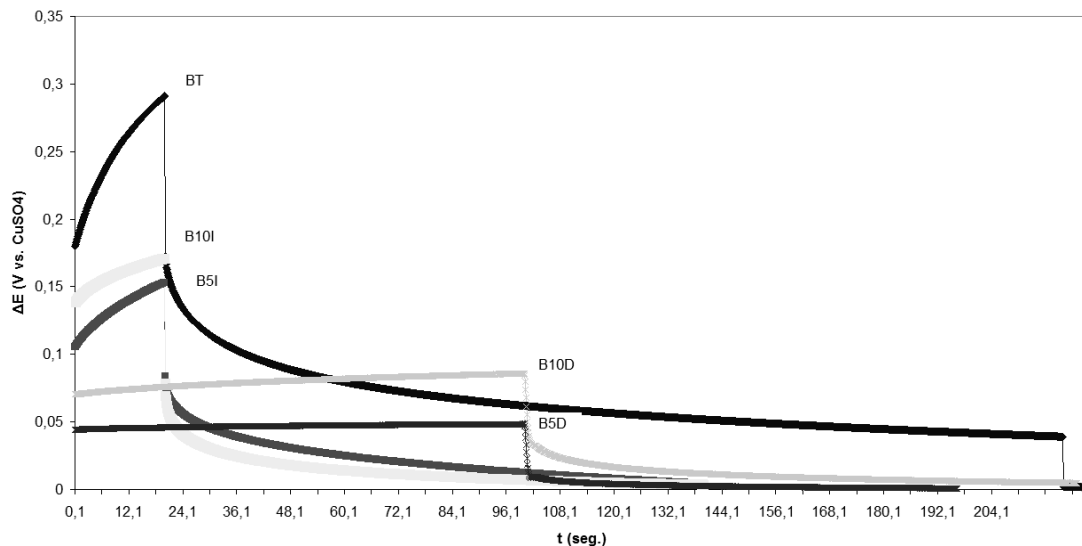
**Figura 1.** Esquema del montaje de las probetas para las pruebas electroquímicas

Las medidas de resistencia a la polarización lineal se obtuvieron siguiendo la norma ASTM G 59 “*Standard Practice for Potentiodynamics Polarization Resistance Measurements*”. Se utilizó una velocidad de barrido de 0.2 mV/s, en un rango de potencial desde -20 mV hasta +20 mV a partir del potencial de corrosión, con el fin de determinar el valor de la pendiente de la curva (potencial vs. densidad de corriente) y hallar la densidad de corriente de corrosión por medio de la ecuación de Stern-Geary. Se utilizó la constante B como 26 mV para acero activo y 52 mV para acero pasivo, situación que es ampliamente aceptada en la literatura internacional. Asimismo, todas las medidas se realizaron en condición de inmersión parcial de 2/3 de la probeta con montaje de celda externo.

Las medidas de pulso galvanostático fueron realizadas con una amplitud del pulso de  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  de intensidad y 10 s de duración. Esta es la amplitud recomendada en la literatura internacional sobre la aplicación de pulsos en concretos, con el fin de garantizar la no perturbación del electrodo de trabajo de manera sustancial y no permitir al sistema electroquímico iniciar el proceso faradáico de transporte de carga. La determinación de la densidad de corriente de corrosión se desarrolló por medio de la ecuación de Stern-Geary con datos de resistencia a la polarización lineal y de capacitancia interfacial provenientes del mejor ajuste del circuito eléctrico equivalente, desarrollado para tal fin al 5% de tolerancia entre iteraciones. Mediciones de resistencia a la polarización fueron realizadas por la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica para su respectiva comparación

### 3. RESULTADOS

La Figura. 2 representa los transientes típicos de la respuesta del potencial del acero embebido en el concreto a un pulso galvanostático aplicado para las diferentes relaciones a/c y condiciones de exposición a los cloruros. Se observan similitudes en el comportamiento alcanzado por los electrodos de acero ante la excitación galvánica; Sin embargo, se presentaron varios patrones relacionados con el grado de polarización y el tiempo de relajación, por ejemplo, se observa que la familia testigo BT alcanzó un grado de polarización de 300 mV; las familias tipo I alcanzaron un grado de polarización de tan solo 150 mV y el valor más crítico se registró en la familia tipo D, en donde los especímenes del tipo 10D fueron los que alcanzaron el más bajo grado de polarización (50 mV).



**Figura 2.** Respuesta a un pulso galvanostático de  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  en especímenes tipo B en estado activo y pasivo

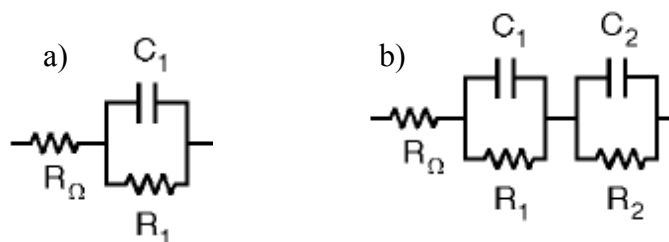
Una tendencia similar fue encontrada en las otras relaciones investigadas, en las cuales los datos son como siguen: en la relación  $a/c=0,4$  los especímenes testigo AT alcanzaron un alto valor de



380 mV, la familia tipo I registró valores del orden de 280 mV y los especímenes tipo D se ubicaron en 150 mV; por otro lado, la familia testigo CT en la relación  $a/c=0.6$  alcanzó un valor de polarización de 250 mV, la tipo I registró valores del orden de 80 mV y finalmente, los valores en los especímenes tipo D fueron de 40 mV, lo que hace ubicar a esta relación  $a/c$  de 0.6 el caso más crítico registrado por pulso galvanostático en el presente estudio.

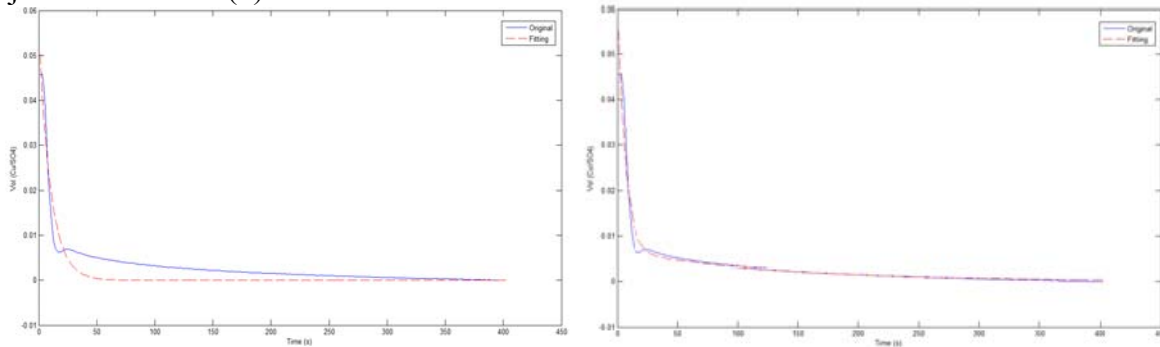
Esta condición de alta relación  $a/c$  representa una situación desventajosa en términos de la durabilidad alcanzada por las probetas en el campo del concreto reforzado, y la técnica de pulso se ajusta perfectamente a los resultados de antemano esperados en cuanto al comportamiento ante la corrosión del acero, al reflejar el avanzado estado de deterioro de estos especímenes (relación  $a/c=0.6$ ) comparado con los tipo B y sobre todo con los tipo A. Esta tendencia decreciente, refleja las pérdidas de resistencia a la polarización soportadas por el refuerzo al sufrir detrimento en las propiedades del material protector como lo es el concreto para el acero. El análisis morfológico de las gráficas solo permite obtener ciertas conclusiones como las antes expuestas sobre el método de pulso galvanostático en cuanto a grado de polarización alcanzado y tiempo de relajación, siendo un método de fácil lectura para determinar de manera preliminar y cualitativa el estado del electrodo. Sin embargo, con el parámetro morfológico no es fácil ni adecuado cuantificar en forma exacta el estado de deterioro en pulso y se hace necesario de ajustes de con circuitos equivalentes para evitar errores de interpretación. No obstante, lo positivo de este análisis preliminar es dejar ver la factibilidad del método y el ajuste conforme a lo esperado en las probetas del presente documento, resultado éste que permite seguir en el análisis numérico más complejo sobre la extracción de los parámetros de corrosión que rigen el fenómeno en cada tipo de probetas.

El análisis gráfico del transiente de respuesta sólo brinda información relativa a la sobrepolarización alcanzada por el sistema electroquímico ante la excitación con pulso galvanostático y del tiempo de relajación de la respuesta, por esto se requiere del ajuste de los datos a un circuito eléctrico equivalente para extraer los parámetros que rigen a la interfaz acero/concreto en cada familia particular. Familias de probetas AT, BT, CT, A5I, B5I y C5I se ajustaron a un circuito de primer orden (Figura 3a), mientras que las familias restantes se ajustaron a un modelo de II orden A10I, B10I, C10I, A5D, B5D, C5D, A10D, B10D y C10D (figura 3b)



**Figura 3.** Circuito equivalente empleado para modelar la respuesta del sistema electroquímico acero/concreto ante la excitación con pulso galvanostático de  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  de intensidad, sostenido durante 10 s, tipo I (a) y tipo II (b).

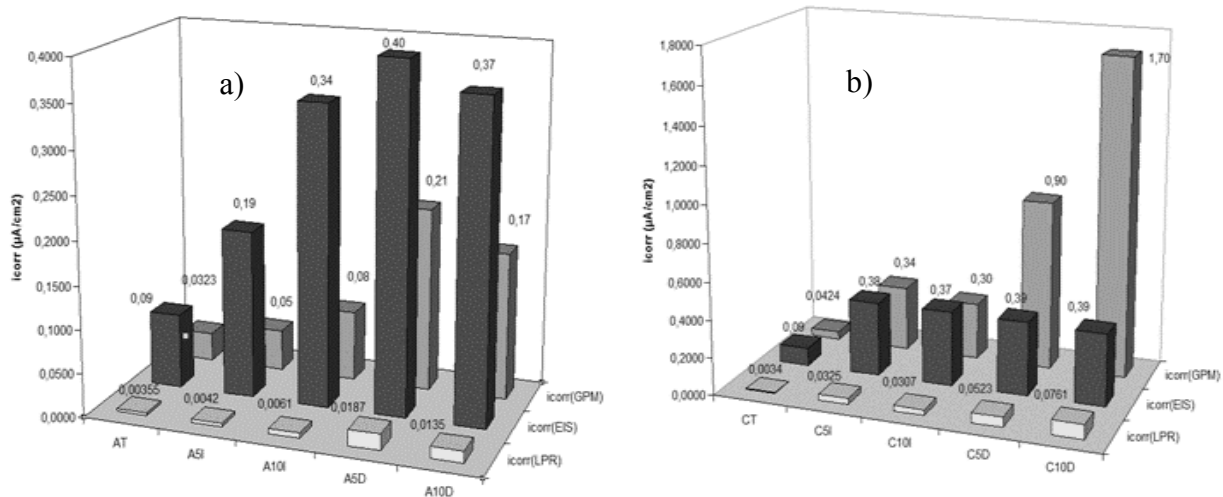
En la figura 4 se muestra un prototipo de ajuste obtenido por las probetas que no respondieron satisfactoriamente a un modelo lineal (a) y se muestra un esquema de la respuesta luego de un ajuste de II orden (b).



**Figura 4.** Representación gráfica de un ajuste de orden I (a) y orden II (b), por circuito equivalente a un pulso galvanostático de  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  de intensidad y  $10 \text{ s}$  de duración

Se observa un mejor ajuste en el circuito equivalente de orden II que en el orden I, destacándose la bondad del ajuste obtenido.

En la figura 5 se presentan se muestran los resultados obtenidos luego de aplicar el procedimiento de Stern-Geary para llevar los valores de  $R_p$  a valores de densidad de corriente de corrosión, utilizando la constante de Stern-Geary igual a  $52 \text{ mV}$  para acero pasivo y  $26 \text{ mV}$  para acero activo y su respectiva comparación con los resultados obtenidos por pulso galvanostático y Espectroscopía de Impedancia Electroquímica. La Figura 5a resume los valores de la velocidad de corrosión para la relación  $a/c = 0.4$  y la Figura 5b muestra la relación  $C = 0.6$ .



**Figura 5.** Resultados de la densidad de corriente comparando, los obtenidos por las técnicas de GPM, EIS y LPR para la relación  $a/c=0,4$  (a) y  $a/c=0,6$  (b).



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



Se observa una velocidad de corrosión mayor en la familia tipo A5D (0.0187 (LPR), 0.40 (EIS) y 0.21 (GPM)) comparada con la familia A10D (0.0135 (LPR), 0.37 (EIS) y 0.17 (GPM)), lo que hace pensar en la verosimilitud de la técnica de pulso para la cuantificación de las velocidades de corrosión en los concretos independiente de la presencia y/o la ausencia de aditivo. En forma global, se presentó el siguiente orden de mayor a menor en las velocidades de corrosión registradas por las tres técnicas electroquímicas cuantitativas: EIS > GPM > LPR.

### 4. CONCLUSIONES

- Se encontró correspondencia electroquímica entre GPM con las técnicas EIS y LPR.
- La presencia de aditivo simultáneamente con la presencia de cloruro mostró un comportamiento negativo, posiblemente asociado a caídas locales y diferenciales del pH.
- Las icorr por GPM no estuvieron afectadas por el aumento de aditivo, solo influyó el estado superficial del electrodo de trabajo.
- Se confirmó la subestimación de las tasas de densidades de corriente de corrosión registradas en la literatura por el método de resistencia a la polarización lineal, comparado con los datos registrados por GPM y EIS.

### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a Colciencias y a la Armada Nacional de Colombia por la financiación de este trabajo, proyecto código 1102-425-20643

### 6. REFERENCIAS

1. VICO, A.; MORRIS, W. & VAZQUEZ, M. Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón. *INTEMA: División Corrosión*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar de Plata. Mar de Plata-Argentina, 2000; 5 p.
2. MORRIS, W. & VAZQUEZ, M. A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides. *Cement and Concrete Research* Vol. 32, 2002; pp. 259-267
3. TORRES ACOSTA, Andres A.; FABELA GALLEGOS, M. J.; HERNANDEZ JIMÉNEZ, José R.; MARTINEZ MADRID, M.; MUÑOZ NOVAL, A. & VAZQUEZ VEGA, D. Cambios en la rigidez y la resistencia a la flexión en vigas de concreto por corrosión del refuerzo. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes instituto mexicano del transporte*. Publicación técnica N° 294. Sanfandila, Mexico. 2002; 71 p.
4. CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. & ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosión Science* Vol. 44, 2002; pp. 2409-2424
5. VAYSBURD, A. M. & EMMONS P. H. How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair. *Construction and Building Materials* Vol. 14, 2000; pp. 189-197



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



6. LIU, YOUPIPING & WEYERS, RICHAD E. Comparison of guarded and unguard linear polarization CCD devives with weight loss measurements. *Cement and Concrete Research* Vol 33, 2003; pp. 1093-1101
7. VALLE MORENO, A.; PÉREZ L. T. & MARTÍNEZ M. M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Secretaria de Comunicaciones y Transportes instituto mexicano del transporte*. Publicación técnica N° 182. Sanfandila, Mexico. 2001. 74
8. RED DURAR: Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales (Maracaibo, Venezuela: CYTED, 1997).
9. HANSSON, C. M.; POURSAEE, A. & JAFFER, S.J. Corrosion of reinforcing bars in concrete. *Portland Cement Association R&D* Serial No. 3013, 2007; 3 p.
10. MINETTI, GRUPO. Guía practica para diseñar y obtener hormigones durables. Buenos aires, Argentina. pp. 24
11. JOLICOEUR, C. & SIMARD, MARC ANDRE. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Research* Vol. 20, 1998; pp. 87-101
12. TOMBÁ CZ, Etelka. Adsorption from electrolytes solutions. Edit. University of Szengend, Szengend, Hungary. 2002. pp. 133-138.
13. MILLARD, S. G.; LAW, D.; BUNGEY, J. H. & CAIRNS J. Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete. *NDT & International* 34, 2001. pp. 409-417.
14. FLITT, Harvey J. & SCHWEINSBRG, D. Paul. Evaluation of corrosion rate from polarisation curves not exhibiting a Tafel region. *Corrosion Science* Vol. 47. 2005. pp.3034-3052.
15. ISMAIL, M. & OHTSU, M. Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. *Construction and Building Materials* Vol. 20. 2006. pp. 458-469.