



**12-14 de Noviembre del 2012**  
**Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa**

## **COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL ACERO DE REFUERZO PROTEGIDO CATÓDICAMENTE**

**M. Rendón-Belmonte<sup>1</sup>, J.T Pérez-Quiroz<sup>1</sup>, B. Valdéz-Salas<sup>2</sup>, A. López-Miguel<sup>1</sup>, M. Martínez-Madrid<sup>1</sup>, A. Torres-Acosta<sup>1</sup>.**

1 Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ingeniería, Calle de la Normal S/N  
Insurgentes Este Mexicali B.C.

2 Instituto Mexicano del Transporte, Carretera Querétaro Galindo Km 12 + 000, Sanfandila, Pedro Escobedo

### **RESUMEN**

En esta investigación se describe el comportamiento del acero de refuerzo embebido en concreto con protección catódica por ánodos galvánicos de zinc (PCAG) e inmerso en agua de mar. El monitoreo electroquímico incluyó mediciones de potencial de corrosión, corriente galvánica, potencial de protección y potenciales de depolarización en especímenes de concreto reforzado de dimensiones 20x15x15 cm. La eficiencia de los sistemas de PC fue determinada de acuerdo a la norma NACE RP 0290.

De acuerdo al monitoreo electroquímico, el sistema de PCAG protegió de manera adecuada durante todo el ensayo. Se observó una disminución de densidad de corriente, situación atribuida a la formación de un óxido protector sobre la superficie del acero.

**Palabras claves:** acero de refuerzo, concreto, protección catódica, corriente galvánica.

### **ABSTRACT**

This research described the behavior reinforcement in concrete and with cathodic protection galvanic (CPAG) in conditions submerged in seawater. The electrochemical monitoring consisted in corrosion potential, galvanic current, protection potential and depolarization potentials. Dimensions of the specimens were 20x15x15 cm. The criteria for the efficiency of CP systems was the 100 mV standard established by NACE RP 0290. In accordance the monitoring, the steel was adequately protected. Galvanic current decrease was observed, associated with the protective oxide formation on the steel surface.

**Key words:** steel reinforcement, concrete, cathodic protection, galvanic current.

## INTRODUCCIÓN

Una de las causas más comunes e importantes para la corrosión de las armaduras es la despasivación localizada de la superficie del acero, debido al ingreso de cloruros o corrosión uniforme, provocada por la acidificación de la solución poro, como resultado del proceso de carbonatación del cemento. La protección catódica (PC) es una de las técnicas más útiles para inhibir la corrosión inducida por cloruros en concreto reforzado [1-2]. Inicialmente cuando se aplica una corriente catódica a una estructura se observa una corriente alta y un potencial eléctrico del metal más negativo que el de corrosión antes de aplicar la PC. Después de un período de tiempo, la corriente disminuye y el potencial se hace más negativo hasta alcanzar un valor estable determinado por la eficiencia del ánodo del sistema de protección [3]. Investigaciones realizadas sobre especímenes de acero sometidos a la aplicación de una corriente catódica, reportan que después de un período de aplicación se produce la formación de depósitos sobre la superficie del acero [1-5]. Los mecanismos fundamentales de la eficacia de la PC están fuertemente relacionados con la morfología y transformaciones de las capas de los productos formados sobre la superficie del acero [1].

A la fecha no se conoce de manera precisa bajo qué condiciones se da la formación de dichos depósitos, después de cuánto tiempo de aplicar la corriente catódica se promueve su formación, o qué efecto tienen sobre la estructura metálica. Esta investigación tiene como objeto estudiar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en concreto y determinar su efecto en la protección del acero.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se fabricaron siete especímenes de concreto reforzado de dimensiones 20x15x15 cm relación a/c 0.45 y con acero estructural de acuerdo a la Norma ASTM A496 [6]. Dos especímenes se utilizaron como testigos (identificados como P1 y P2) y al resto se les aplicó protección catódica (P3-P7). Todos los especímenes fueron objeto de mediciones electroquímicas como potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), potencial de protección ( $E_{protección}$ ), corriente galvánica ( $I_{galv}$ ) y potenciales de depolarización ( $E_{depolarización}$ ). La eficiencia del sistema de protección catódica (PC) fue determinada de acuerdo a la norma NACE RP 0290 [7] y considerando el criterio de desplazamiento de potencial recomendado por Ávila y Genescá [8]. Todas las mediciones de potencial fueron realizadas vs al electrodo saturado de calomel (ESC). En todos los casos (excepto muestra testigo), el sistema de protección catódica por ánodos galvánicos de zinc (PCAG) se mantuvo activo durante 60 días. Después del tiempo de curado (28 días), con la finalidad de ocasionar corrosión del acero todos los especímenes permanecieron 7 días inmersos en agua de mar natural previo a la instalación del sistema de PC. Durante el monitoreo, los especímenes permanecieron sumergidos en agua de mar natural. La Figura 1 muestra la celda experimental utilizada.

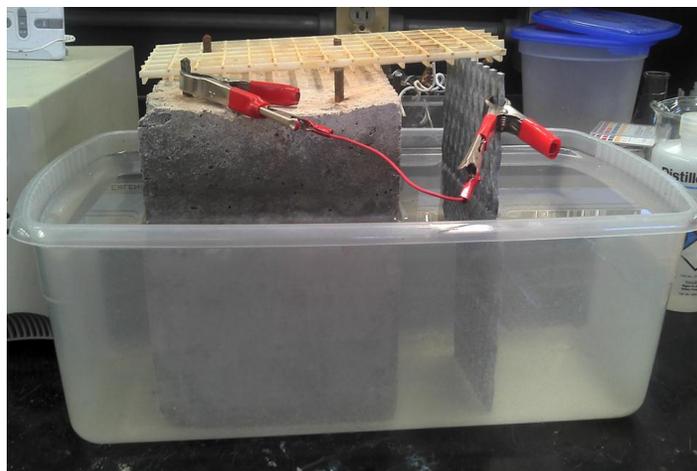


Figura 1.- Celda experimental.

## RESULTADOS

### Potenciales de muestras testigo y con protección catódica.

En la Figura 2 se señalan los valores de potencial de corrosión de las muestras testigo (P1-P2) que después de 20 días de exposición oscilaron alrededor de  $-500$  mV vs ESC ( $-425$  mV vs a  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), valores que de acuerdo a la norma ASTM C 876 indican presencia de corrosión del acero [9]. Por otro lado, en la misma figura se observa que los valores de potencial de protección ( $E_{\text{protección}}$ ) de las probetas con PC (P3-P5) cumplieron con la recomendación de Ávila y Genescá (desplazamiento de  $300$  mV en dirección negativa); logrando una protección adecuada con valores alrededor de  $-1000$  mV vs ESC.

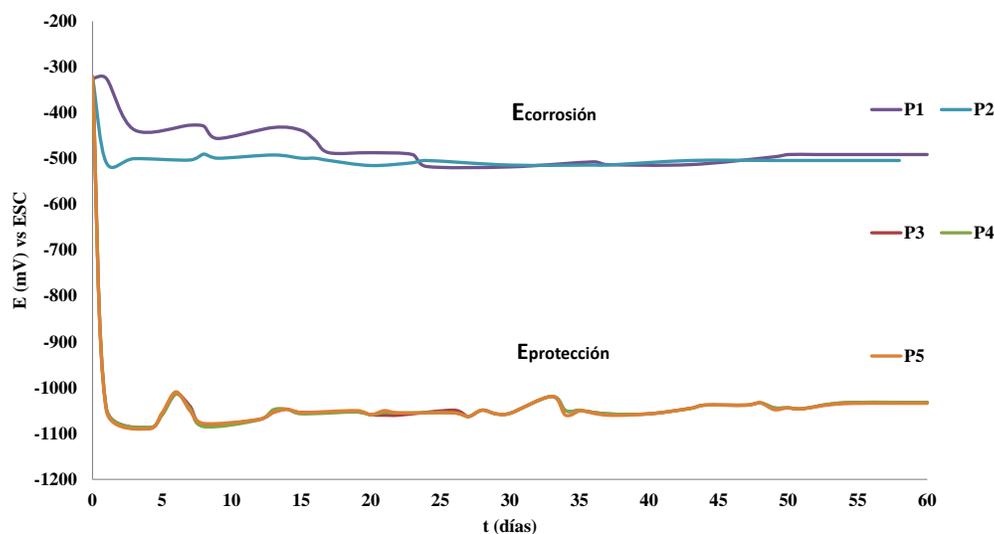


Figura 2.- Potenciales de corrosión y de protección.

## Densidad de corriente

Después de un día de conectar el sistema de PC, en todos los especímenes se observó un decaimiento en los valores de densidad de corriente; disminuyeron en promedio de 1.6 a 0.4 mA/m<sup>2</sup>, valor que posterior al día treinta disminuyó y se mantuvo cerca de 0.3 mA/m<sup>2</sup> durante el resto del monitoreo (Figura 3).

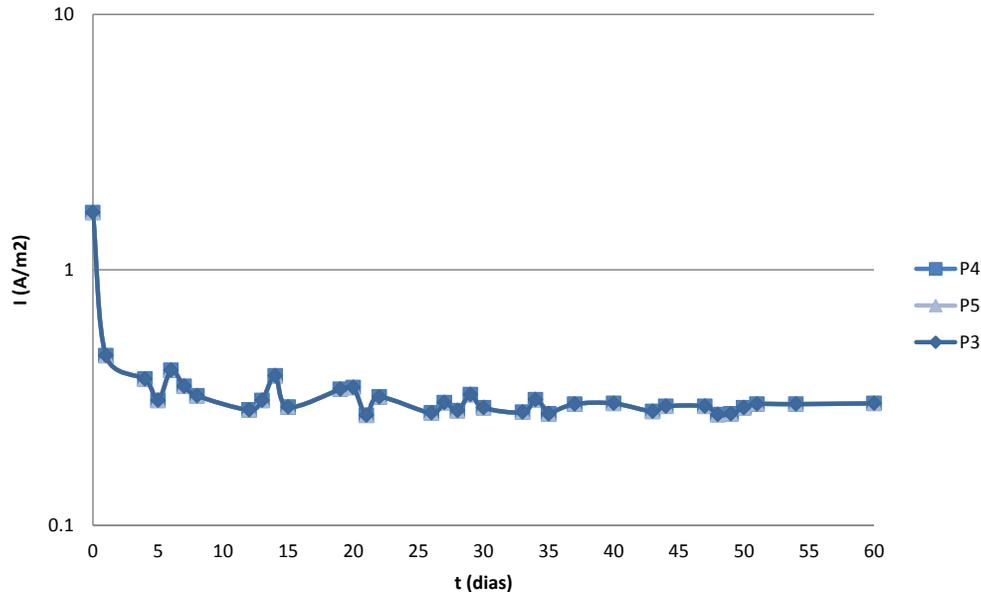


Figura 3.- Densidad de corriente.

Este comportamiento de la densidad de corriente ha sido reportado por otros autores, entre ellos:

Brousseau [10] observó en especímenes expuestos a humedades relativas de 50 y 90% decaimiento de corriente después de un tiempo de aplicar PC, situación que atribuyó a los productos de oxidación formados en la interfase ánodo de sacrificio/concreto. Este mismo autor [11] en otro estudio reportó que la densidad de corriente de sus especímenes disminuyó respecto a la inicial en época de verano, incrementando en otoño y ligeramente en invierno. La justificación de la recuperación de la densidad de corriente la atribuyó al derretimiento de la nieve y la sal salpicada por el paso de vehículos y caída frecuente de lluvias, lo que podría dar lugar a un mayor contenido de humedad en el concreto reduciendo la resistencia total del circuito. Lee et al [12] observaron una disminución en los valores de densidad de corriente respecto al paso del tiempo, situación que atribuyó al porcentaje de la humedad relativa. Sagues y Powers [13] reportan que la ausencia de humedad en la superficie del ánodo (termorociado de zinc), podría dar lugar a largo plazo pérdida de una entrega de corriente adecuada, incluso cuando el concreto esté en contacto con humedad relativa de 85%. También, observaron a humedades relativas de 25, 60 y 85% disminución de densidad de corriente conforme el paso del tiempo, aunque fue más notoria a bajas humedades.

Por la condición de exposición de los especímenes en esta investigación (sumergidos) se descarta que el comportamiento de la densidad de corriente sea por alguno de los argumentos

antes mencionados; asociando este resultado con los cambios que ocurren sobre la superficie del acero al aplicar corriente galvánica y considerando el diagrama de pH-potencial del hierro que muestra a valores de pH altos típicamente presentes en concreto y solución poro (pH 12.5) la presencia de magnetita (óxido protector) [3-14]. Está reportado que la aplicación de una corriente catódica a una estructura ocasiona cambios sobre la superficie del acero y también produce la formación de una capa protectora [3]. Ziomek [4] reporta que en muestras inmersas en solución poro con cloruros y con PC, encontró la presencia de magnetita en la película de óxido formada sobre la superficie del acero, considerada como un óxido protector. Koleva [1, 5] reporta que sobre la superficie del acero en concreto reforzado con PC se forma una capa de productos no homogénea y compuesta de variedad de productos, con cristalinidad y composición diferente. Comprende una capa interna similar a  $Fe_3O_4$  y una capa externa compuesta de (oxi) hidróxidos de hierro y (oxi) hidroxí cloruros de hierro, es decir, una combinación de  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - $FeOOH$ ,  $Fe(O,OH,Cl)$  y  $Fe_2O_3$ . La capa en especímenes corroídos es una combinación de óxidos de baja valencia y oxi hidroxí cloruro de hierro y con una morfología rugosa. Las capas en los especímenes protegidos son mucho más compactas.

Todas estas observaciones, sugieren que el principal responsable de inhibir la densidad de corriente es la formación del óxido protector que se genera por la aplicación de una corriente catódica, aunque cabe señalar que factores como la humedad y resistividad eléctrica de la estructura son importantes para el desempeño del sistema de PC.

### **Potenciales de depolarización**

Se realizaron mediciones de depolarización después de 31, 39 y 60 días de aplicar la PC, reportadas en la Tabla 1. Se observó el cumplimiento del criterio de los 100 mV en todas las mediciones de acuerdo a la norma RP 0290 [7]. Considerando los valores de potencial obtenidos después de 4 y 24 h, se observa que a mayor tiempo de aplicación de PC el potencial de corrosión del acero tiende a valores más positivos. Por otro lado, considerando los valores de corriente galvánica medidas durante la depolarización, a mayor tiempo de aplicación de PC los valores de corriente disminuyen, siendo más evidente en los resultados obtenidos después de 39 y 60 días. Este comportamiento se atribuye a que a mayor tiempo de aplicación del sistema de PC el acero tiende a formar una capa que lo pasiva, reduciendo así el valor de corriente de protección requerida. Se sabe que estructuras que han sido protegidas por períodos prolongados de tiempo pueden permanecer pasivas y protegidas por un cierto período de tiempo después de que el sistema de PC se interrumpe [4].

**Tabla 1. Potenciales de depolarización**

Días con PC	$E_{on}$ (mV vs ESC)	$E_{inst\ off}$ (mV vs ESC)	$E_{4h}$ (mV vs ESC)	$E_{24h}$ (mV vs ESC)
31	-1047	-940	-636	-427
$I_{galv\acute{a}nica}$	mA	1.42	5.3	9
39	-1049	-940	-626	-425
$I_{galv\acute{a}nica}$	mA	1.36	5.2	8
60	-1037	-900	-570	-292
$I_{galv\acute{a}nica}$	mA	1.1	4.1	4.7

## CONCLUSIONES

Durante el tiempo de monitoreo el sistema de protección catódica protegió de manera eficiente al acero de acuerdo al criterio de los 100 mV y recomendación de Ávila y Genescá. El decaimiento de la densidad de corriente se atribuye a la presencia de un óxido protector sobre la superficie del acero protegido.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la UABC (Universidad Autónoma de Baja California) y al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por las facilidades y apoyo brindado para poder realizar esta investigación.

## REFERENCIAS

1. D.A.Koleva, K.van Breugel, J.H.W., A.L.A.Fraaij, N.Boshkov. "Composition and Morphology of Product Layers in the Steel/Cement Paste Interface in Conditions of Corrosion and Cathodic Protection in Reinforced Concrete". ECS Transactions, 2, 9 (2007): pp 127-139.
2. D.A. Koleva, K. Van Breugel. "Some advantages of pulse, compared to conventional cathodic protection in reinforced concrete". JCSE The Journal of Corrosion Science and Engineering Vol. 9, 2006.
3. S.S. Leeds and R.A. Cottis. "The Effect of Surface Films on Cathodic Protection. The Journal of Corrosion Science and Engineering", 9, 3 2004: 1-20.
4. M. Ziomek-Moroz, S.D. Cramer, B.S. Covino, Jr. "corrosion behavior of rebar for intermittent cathodic protection of coastal bridges"

5. D. A. Koleva, J. H. W. de Wit, K. van Breugel, Z. F. Lodhi, and G. Ye. "Investigation of Corrosion and Cathodic Protection in Reinforced Concrete. II. Properties of Steel Surface Layers". *Journal of The Electrochemical Society*, 154, 5 2007:pp C261-C271.
6. ASTM A496/A496M Standard Specification for Steel Wire, Deformed, for Concrete Reinforcement (2007).
7. NACE Standard RP0290. Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures. (2000)
8. J. Ávila y Joan Genescá. Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión. (México 1986).
9. ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. (2009)
10. Brousseau, B. Baldock. "Sacrificial cathodic protection of a concrete overpass using metallized zinc latest update" 1997R
11. R. Brousseau y B. Baldock. "Laboratory study of sacrificial anodes for reinforced concrete". *Corrosion* 54, 3 (1998): pp
12. S.K Lee, Y.M. Sigonney y W.H. Hartt. "Characterization of the Arc Sprayed Zinc Coating-Concrete Interface by Electrochemical Techniques". *Corrosion* 99. Paper 552.
13. A.A Sagües and R.G Powers. "Sprayed-zinc sacrificial anodes for reinforced concrete in marine service". *Corrosion* 1996.
14. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Marcel Pourbaix. national Association of Corrosion Engineers Houston Texas, USA. CEBELCOR Brussels (1974).