

Guard Ring and Electrochemical Noise Employment in the Evaluation of the Steel-Concrete System

D. Nieves Mendoza,^{a,*} F. Almeraya-Calderón,^a J. Rivera Mejía,^b
J. Uruchurtu Chavarín,^c C. Gaona Tiburcio,^a A. Martínez Villafañe^a

^{a)} Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Av. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31109 Chihuahua, Chih., México.

^{b)} Instituto Tecnológico de Chihuahua, Ave. Tecnológico #2909, Chihuahua, Chih., México.

^{c)} Centro de Investig. de Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp, Cuernavaca, Mor. México.

Received 26 February 2004; accepted in revised form 07 May 2004

Abstract

To evaluate the electrochemical parameters of the reinforced concrete specimens at laboratory level there is no problem at all, because one can use any well-known electrochemical technique, but in site monitoring, there are few techniques being able to obtain these parameters. In this work a viable alternative is presented for the electrochemical evaluation of the reinforced concrete specimens in laboratory or in site monitoring. In order to have a reference of the corrosion rate obtained with the electrochemical noise technique and to be able to establish if these are real ones, measurements with commercial equipment were made applying the polarization resistance technique.

Keywords: corrosion, electrochemical noise, polarization resistance, armed concrete, monitoring.

Introducción

En la industria de la construcción, el hormigón armado con barras de acero es el material más empleado en todo el mundo, debido a su facilidad para moldearse y formar cualquier estructura geométrica, la corrosión del acero de refuerzo tiene una elevada frecuencia con que ocurre, por lo que puede decirse que la corrosión del acero del armado es una de las principales causas de que las estructuras de hormigón armado sufran deterioro prematuro.

* Corresponding author. E-mail address: demetrio.nieves@cimav.edu.mx

Descrita en términos sencillos, una celda de corrosión electrolítica consiste en dos metales de diferente potencial eléctrico (designados como ánodo y cátodo) conectados entre sí por un conductor eléctrico e inmersos en una solución (denominada electrolito) de composición adecuada. En tales condiciones, se crea un flujo de electrones del ánodo al cátodo por conducto de la conexión eléctrica, que descompone químicamente el electrolito y genera un movimiento de iones a través de éste, cuya manifestación es la corrosión y desintegración paulatina del ánodo.

La corrosión del acero del armado en el hormigón, no requiere la presencia de dos metales para formar la celda, pues el ánodo y el cátodo son constituidos por zonas con diferente potencial electroquímico sobre la misma barra, el electrolito corresponde a la solución acuosa de sales que de ordinario existen en los poros del concreto, y el conductor eléctrico lo constituye la propia barra de acero, tal como se muestra esquemáticamente en la siguiente Fig. 1 [1].

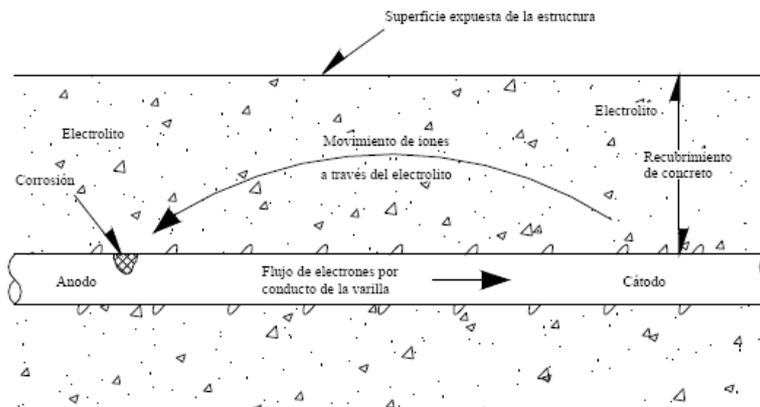


Figura 1. Representación esquemática de una celda de corrosión electrolítica en el concreto reforzado.

Cuando se lleva acabo la inspección de una estructura de concreto en servicio, se enfoca más a parámetros mecánicos y muchas veces no se toman en cuenta los parámetros electroquímicos presentes en dicha estructura, es por ello que en la actualidad son muy pocos los dispositivos o instrumentos con los que se cuentan para evaluar la corrosión en las estructuras de concreto en servicio. En México son pocas las personas que se dedican al estudio de la corrosión en estructuras de

hormigón armado, de hecho a penas se esta difundiendo los conocimientos que se tienen a personas encargadas de llevar acabo la inspección de dichas estructuras. Para obtener los parámetros de corrosión a nivel laboratorio en especimenes de hormigón casi se pueden emplear todas las técnicas electroquímicas, siendo las más empleadas Resistencia a la Polarización, Curvas de Polarización, Extrapolación de Tafel, Impedancia Electroquímica y Ruido Electroquímico. Cada una de estas técnicas tien sus ventajas y desventajas.

En la tabla 1, se hace una comparación entra la técnica de resistencia a la polarización y ruido electroquímico. La primera es empleada por el equipo comercial utilizado y la segunda utilizada en el desarrollo de está investigación, como una alternativa en la obtención de los parámetros de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Tabla 1. Métodos electroquímicos para obtener la velocidad de corrosión.

Técnicas	Ventajas	Desventajas
Resistencia a la Polarización	<ul style="list-style-type: none"> • Aplica pequeñas perturbaciones • Mediciones rápidas 	<ul style="list-style-type: none"> • R_p depende de la velocidad de barrido • Efecto significativo de la caída IR • Requiere la medición separada de las pendientes de Tafel
Ruido Electroquímico	<ul style="list-style-type: none"> • No es perturbativa • Da información si el acero esta activo o pasivo • Morfología del tipo de corrosión • Mecanismo de corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos de medición relativamente largos.

Los dispositivos disponibles para obtener la velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado en servicio actualmente son muy pocos, siendo el más conocido el desarrollado por geocisa, que se basa en la técnica electroquímica de resistencia a la polarización, proporcionando la velocidad de corrosión (i_{corr}), potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistividad del concreto.

Al evaluar una estructura de hormigón armado con la técnica de ruido electroquímico, además de conocer el potencial de corrosión y la velocidad de

corrosión, permitiría establecer si la corrosión esta activa o pasiva, como asimismo conocer que morfología de corrosión se esta dando. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de emplear ruido electroquímico y anillos de guarda, como una alternativa viable para la evaluación electroquímica del acero del armado embebidas en estructuras de hormigón ya sea en laboratorio o “in situ”, a través de la técnica de ruido electroquímico. Se empleó un sistema de tres electrodos el cual consistió en electrodo de trabajo (barra del armado), electrodo de referencia (cobre / sulfato de cobre) y electrodo auxiliar o electrodo de trabajo dos (platino) y anillo de guarda. Para complementar la evaluación electroquímica se realizo un mapeo de potenciales de corrosión y la técnica de resistencia a la paralización (equipo comercial).

Metodología experimental

Se elaboraron 2 vigas de hormigón armado con sección de $15 \times 15 \times 60$ cm y una $f'c = 300$ Kg/cm², las cuales fueron divididas en tres secciones iguales de 20 cm cada una (Fig. 2) a las que se les llamo fases de la viga representadas con la letra F. Después del periodo de curado (28 días), las vigas fueron expuestas en NaCl al 3.5 %, para acelerar el proceso de corrosión. Se realizaron mapeos de potenciales para conocer la distribución y conocer la zona más susceptible a presentar corrosión previo a la medición de ruido electroquímico, se realizaron mediciones de velocidad de corrosión con un equipo comercial que aplica la técnica de resistencia a la polarización, para comparar los resultados obtenidos con ruido electroquímico. Se elaboraron electrodos de referencia de cobre / sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) el cual fue calibrado con otro electrodo comercial, y electrodo de platino para obtener la señal de corriente.

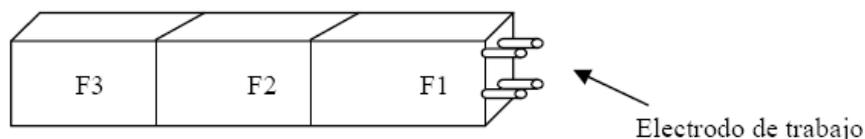


Figura 2. Esquema de las vigas elaboradas.

Tabla 2. Nomenclatura empleada.

P1SF1	P1CF1	P1SF2	P1CF2	P1SF3	P1CF3
P2SF1	P2CF1	P2SF2	P2CF2	P2SF3	P2CF3
P3SF1	P3CF1	P3SF2	P3CF2	P3SF3	P3CF3

La nomenclatura empleada durante la experimentación se describe en la tabla 2:

- el primer par se refiere al número de prueba **P1**, **P2** y **P3**;
- la letra que sigue se refiere ha si se empleo anillo de guarda en las mediciones de ruido electroquímico, **S** cuando no se empleo y **C** cuando si se empleo;
- el siguiente par se refiere a la zona de la viga donde fue realizada la prueba, **F1** parte inicial de la viga donde sobresalen las varillas, **F2** parte central y **F3** la última zona de la viga.

Potenciales de corrosión

Consiste en medir el potencial de corrosión del acero del armado del hormigón mediante electrodos de referencia (ASTM C876-94) [2] como se muestra en la Fig. 3.

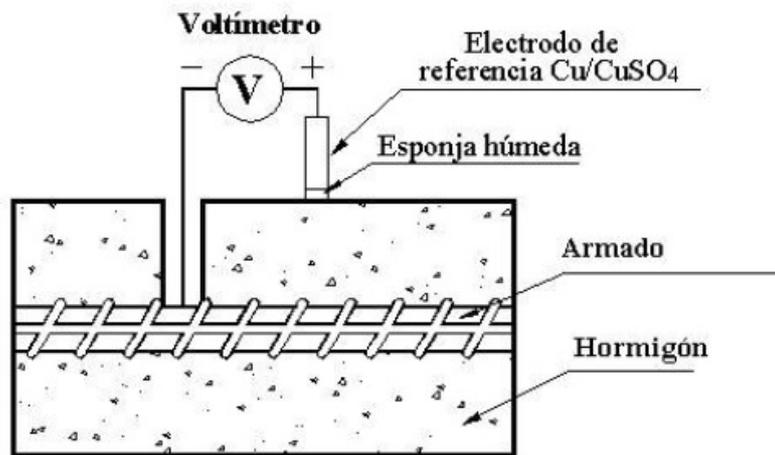


Figura 3. Esquema de la medición de potencial de corrosión en el concreto reforzado.

La medición de potenciales de corrosión dan información sobre la probabilidad de que el acero de una estructura de hormigón se este corroyendo. El material empleado fue cables y conectores, electrodo de referencia de (Cu/CuSO₄) y voltímetro de alta impedancia.

Velocidad de corrosión

Las mediciones de velocidad de corrosión se realizaron con un potencióstato / galvanostato / zra desarrollado en CIMAV conjuntamente con Instituto Tecnológico de Chihuahua, que aplica la técnica de ruido electroquímico, empleando Computadora / Software, Esponjas, cables y electrodos (Fig. 4). Así como también se obtuvieron las velocidades de corrosión con un equipo comercial que emplea la técnica de resistencia a la polarización. Las mediciones de ruido electroquímico se realizaron con y sin anillo de guarda, adquiriendo 1024 lecturas con un intervalo de 1 segundo entre cada lectura. En la Fig. 5 se muestra un esquema de la función que desempeña el anillo de guarda en cuanto a la señal de corriente [3, 4].

Resultados y discusión de resultados

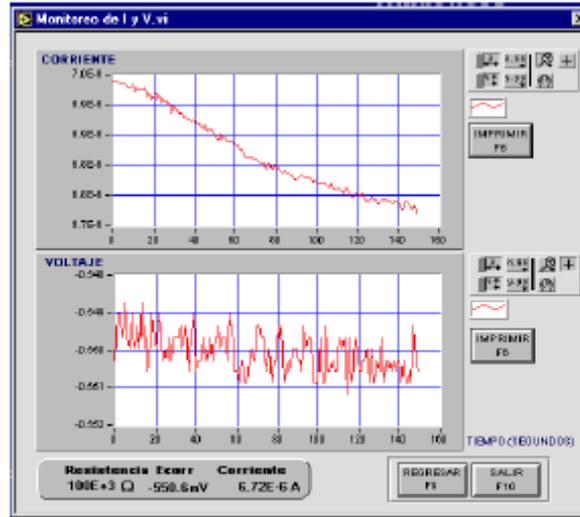
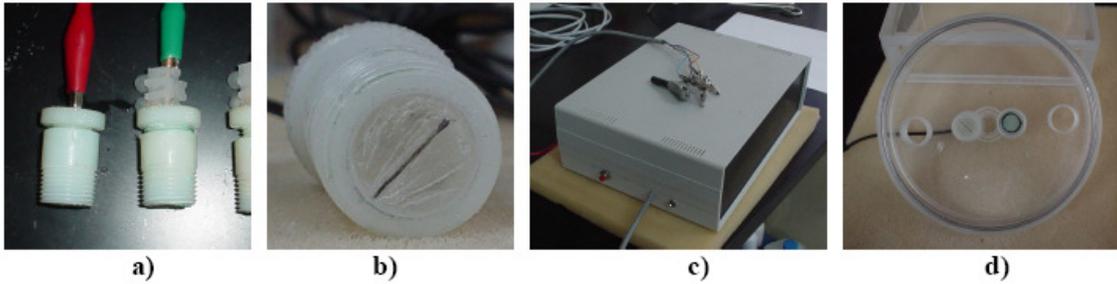
Potenciales de corrosión

El análisis de los potenciales de corrosión, se realizó con base a la norma ASTM C876, donde se establece los intervalos del potencial de corrosión para determinar el grado o riesgo de corrosión (ver tabla 3).

Tabla 3. Potenciales de corrosión con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄, Norma ASTM C 876.

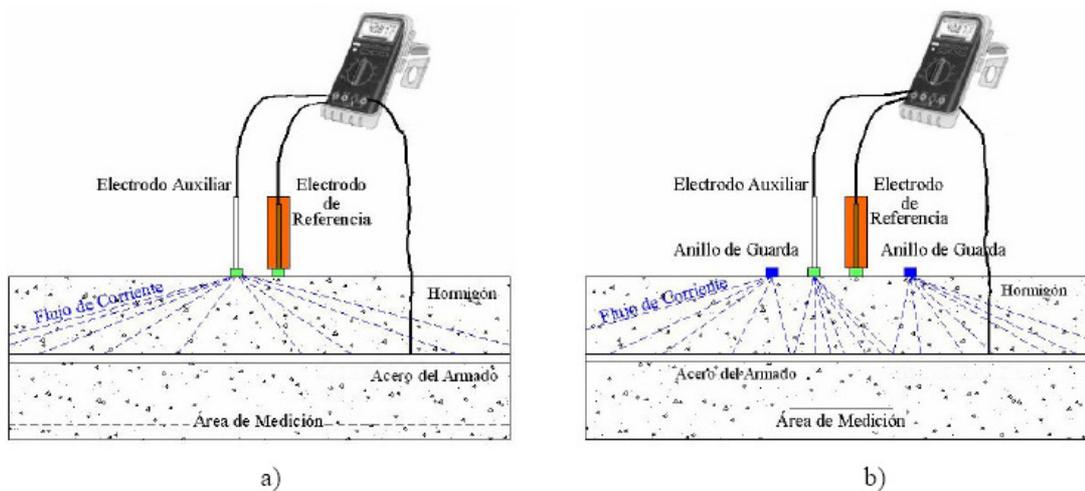
Potenciales más positivos que -200 mV	Riesgo de que ocurra corrosión es del 10%
Si esta entre -200 mV y -350 mV	se tiene una incertidumbre de que exista corrosión
Si son más negativos que -350 mV	se tendrá una probabilidad del 90% de que se esté corroyendo el acero

Los potenciales de corrosión obtenidos y que de acuerdo con la norma ASTM C 876 la viga se encuentra con un 90% de probabilidad de que se este corroyendo el armado del hormigón, como se puede observar en las fig. 6a y 6b. Las partes de color amarillo corresponden a valores de potencial de corrosión que va de -485 mV y las de color rojo a valores a potenciales de hasta -540 mV, cambiando la tonalidad de amarillo a rojo para valores intermedios entre estos.



e)

Figura 4. Electrodo, dispositivo de medición y pantalla de medición de ruido electroquímico: a) electrodos Cu/CuSO₄, b) electrodo de platino, c) dispositivo de adquisición de datos, d) arreglo de electrodos y e) pantalla del software.



a)

b)

Figura 5. Flujo de la corriente al electrodo auxiliar: a) área de medición no confinada y b) área de medición confinada.

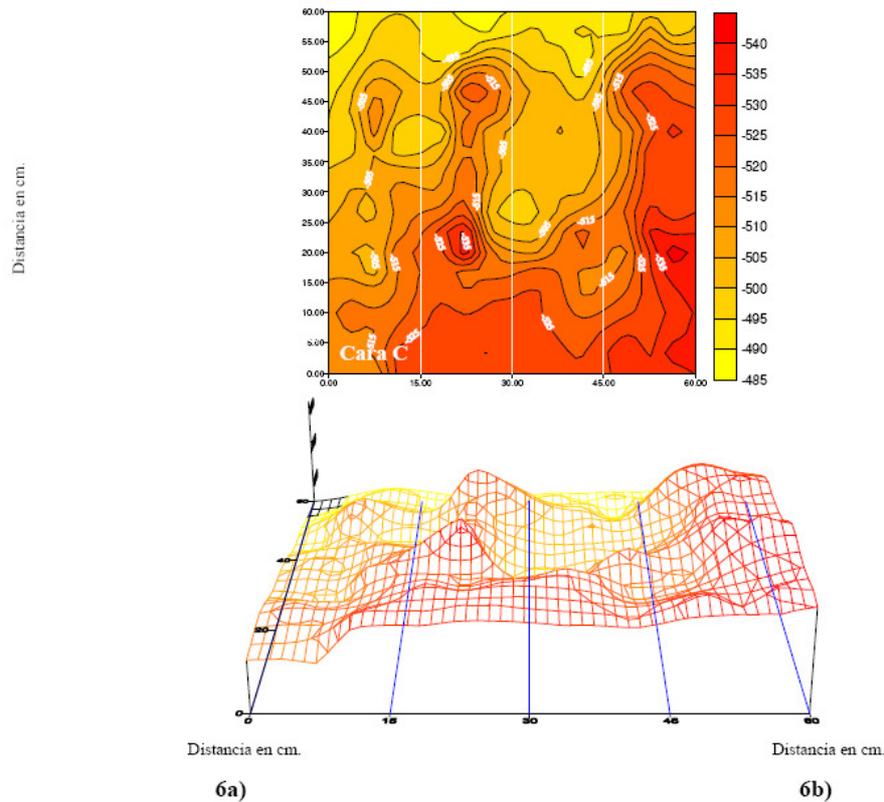


Figura 6. Curvas de isopotenciales de toda la viga. Potenciales de corrosión en mV vs. Cu/CuSO₄.

En la Fig. 6a en el eje de las abscisas la escala esta en centímetros y va de 0 a 60, correspondiendo a la cara D de 0 a 15, de 15 a 30 cara A, 30 a 45 cara B y de 45 a 60 cara C, siendo esta última junto con la cara A la que presentan los valores de potencial más elevados. En el eje de las ordenadas del 0 al 20 corresponde a la fase 1 de la viga, de 20 a 40 corresponde ala fase 2 y de 40 a 60 la fase 3, encontrándose en la F2 los valores de más negativos de potencial. En la Fig. 6b se puede observar claramente los valores más altos de potencial correspondiendo a la cara A y cara C, siendo estas caras paralelas entre sí, dando la pauta para ir estableciendo las zonas a monitorear cinéticamente.

Velocidad de corrosión

El límite entre corrosión activa y pasividad se sitúa entre 0.1 a 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Fig. 7, tabla 3), que en corrosión generalizada suponen 1-2 mm/año. Este límite se aplica cuando el proceso da lugar a la formación de herrumbre (óxidos

expansivos que fisuran el recubrimiento). En el caso de que el óxido sea invisible al ojo humano, velocidades incluso de $0.5 - 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ no dan lugar a fisuración del recubrimiento, al no tener estos óxidos carácter expansivo. Armados que se corroen a $0.1 - 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ produciendo óxidos expansivos provocarán en 10 - 20 años la fisuración del recubrimiento. Valores de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, la producirán en 1 - 2 años [5].

Todos los valores se basan en considerar una corrosión generalizada. Cuando a corrosión es localizada se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicando por 10 el valor medio medido. Así, para un valor de i_{corr} de $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($3 \mu\text{m}/\text{año}$) de penetración homogénea se puede calcular que en caso de ataque localizado, la máxima profundidad de picaduras será de $30 \mu\text{m}/\text{año}$. Una clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil sería la siguiente (tabla 4):

Tabla 4. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil.

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	$i_{\text{corr}} \times 0.0116$ (mm/año)	Grado de corrosión
< 0.1	< 0.00116	Despreciable
0.1-0.5	0.00116-0.0058	Moderado
0.5-1	0.0058-0.0116	Elevado
>1	>0.0116	Muy elevado

Equipo comercial

En la tabla 5 se muestran los valores electroquímicos obtenidos con el equipo comercial, presentándose el mayor valor de velocidad de corrosión en la cara A de la viga. De acuerdo al criterio de evaluación establecido en la tabla 3, los valores obtenidos se encuentran en un grado de corrosión muy elevada, con una máxima intensidad de corrosión. Asimismo los potenciales de corrosión muestran un 90% de probabilidad de que el acero se este corroyendo, ya que estos son más negativos a -350 mV respecto al electrodo de referencia cobre / sulfato de cobre. Con los valores obtenidos se realizo un mapeo de velocidad de

corrosión (i_{corr}). En la Fig. 8b se puede observar el comportamiento de la velocidad de corrosión, alcanzado valores de hasta $173 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

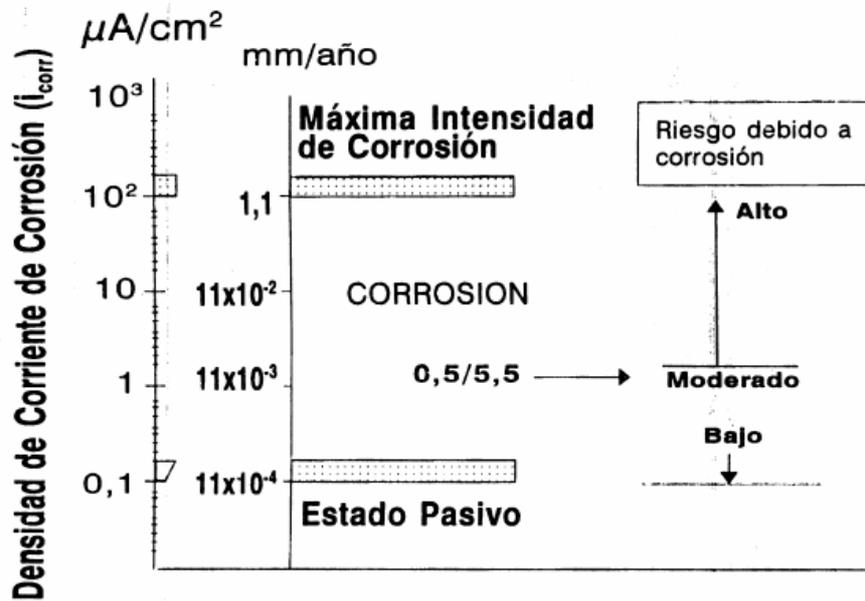


Figura 7. Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión del acero del armado.

Ruido electroquímico

Para calcular la resistencia de ruido electroquímico, R_n (equivalente de la R_p de resistencia a la polarización), es necesario obtener primero las desviaciones estándar de las series de tiempo de ruido en potencial y corriente (Fig. 9a y 9b); una vez calculada la desviación estándar del potencial es dividida entre la desviación estándar de la corriente (Ec. 1) [6], y a través de correlacionar la ecuación de Stern y Geary (Ec. 2) [7] se obtiene la i_{corr} que es directamente proporcional a la velocidad de corrosión.

$$R_n = \frac{\sigma E}{\sigma i} \tag{1}$$

$$R_n = \frac{B}{i_{corr}} ; i_{corr} = \frac{B}{R_n} \tag{2}$$

Donde $B = \text{constante}$ (para ensayos de campo se aconseja el valor de 26 mV, el cual corresponde a armaduras corroyéndose): $26 - 52 \text{ mV}$, $Rn = \Omega - \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = \mu\text{A} / \text{cm}^2$.

En la tabla 5 se observa una clasificación de los valores de i_{corr} en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ que relacionada con el grado de corrosión.

Tabla 5. Valores de potencial y velocidad de corrosión obtenidos con equipo comercial.

Lugar de medición		E_{corr} mV	i_{corr} $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Cara A	F1	-520	130
	F2	-473	173
	F3	-465	91
Cara B	F1	-517	92
	F2	-458	69
	F3	-443	58
Cara C	F1	-505	73
	F2	-455	64
	F3	-463	66
Cara D	F1	-508	93
	F2	-453	48
	F3	-457	85

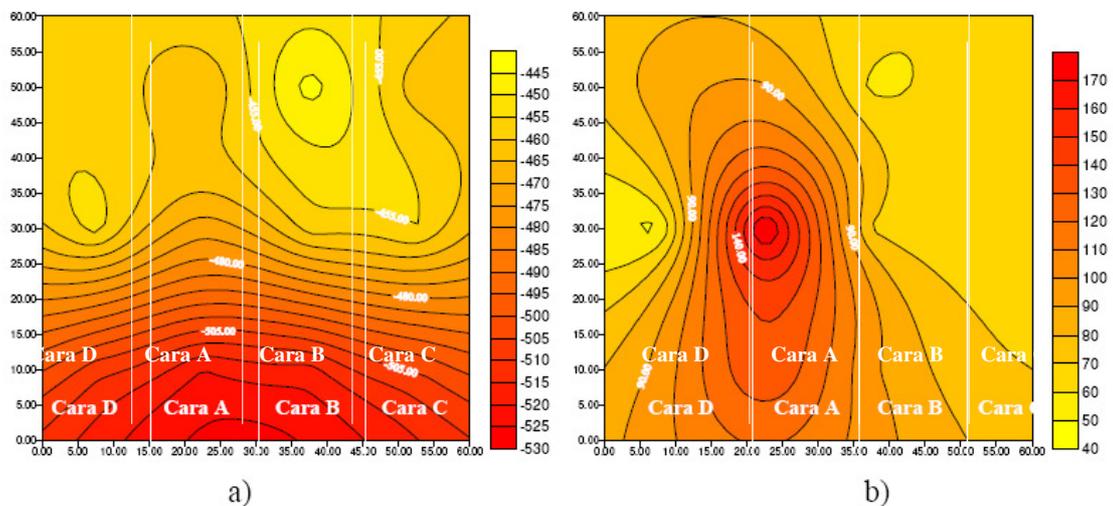


Figura 8. Gráficas obtenidas con el equipo comercial: a) isopotenciales, b) i_{corr} .

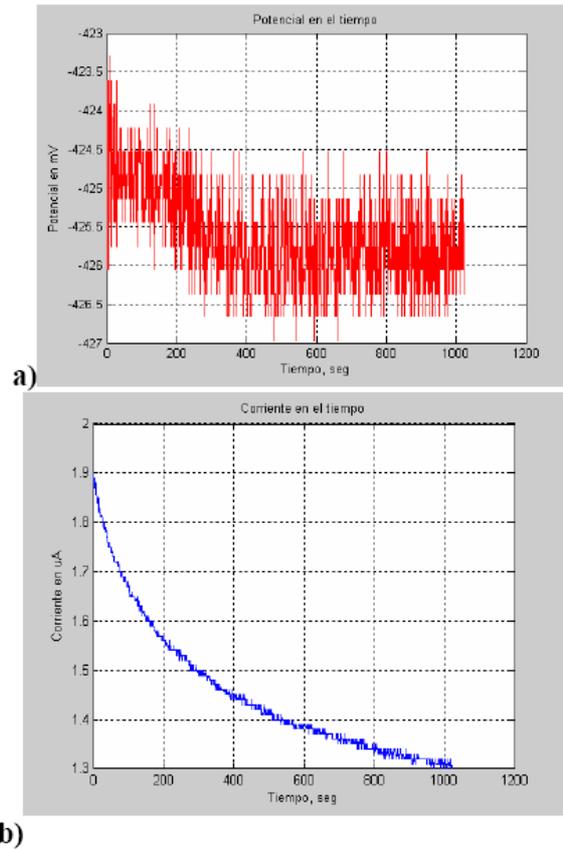


Figura 9. Series de tiempo de ruido electroquímico: a) ruido en potencial, b) ruido en corriente.

A partir de los datos obtenidos con el equipo comercial y en base a las Fig. 6 y 8b, se estableció que ruido electroquímico se emplearía para medir únicamente la cara A de la viga y poder comparar con las antes obtenidas con el equipo comercial.

En las tablas 6 y 7 se pueden observar los valores obtenidos de velocidad de corrosión (i_{corr}) con la técnica de ruido electroquímico con y sin anillo de guarda de las pruebas realizadas, donde los valores de i_{corr} muestran el efecto que causa el anillo de guarda, habiendo un cambio considerable en dichos valores al realizar las pruebas con éste. Como se puede observar claramente en la gráfica de isopotenciales (Fig. 6), la viga está en un 90% de probabilidad de que el acero del armado este activo, lo que generaría una densidad de corriente grande y esta corriente es la que el electrodo de platino esta registrando.

Durante el desarrollo de la experimentación se llevaron acabo cambios en el electrodo de platino, aumentando su área al doble (Fig. 4b), dando como

resultado una disminución en la variación entre las lecturas del equipo comercial. En la tabla 8 se presentan estos resultados.

Tabla 6. Valores de potencial y velocidad de corrosión obtenidos con ruido electroquímico, Prueba 1.

		Prueba sin anillo de guarda			Prueba con anillo de guarda		
		P1SF1	P1SF2	P1SF3	P1CF1	P1CF2	P1CF3
E_{corr}	mV	-428	-393	-359	-405	-353	-355
i_{corr}	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	243	33	202	26	12	1

Tabla 7. Valores de potencial y velocidad de corrosión obtenidos con ruido electroquímico, Prueba 2.

		Prueba sin anillo de guarda			Prueba con anillo de guarda		
		P2SF1	P2SF2	P2SF3	P2CF1	P2CF2	P2CF3
E_{corr}	mV	-436	-387	-352	-434	-390	-356
i_{corr}	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	267	142	100	2	33	68

Tabla 8. Valores de potencial y velocidad de corrosión obtenidos con ruido electroquímico, Prueba 3.

		Prueba sin anillo de guarda			Prueba con anillo de guarda		
		P3SF1	P3SF2	P3SF3	P3CF1	P3CF2	P3CF3
E_{corr}	mV	-438	-387	-355	-436	-386	-357
i_{corr}	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	127	42	65	99	31	134

En la Fig. 10, se puede observar gráficamente el comportamiento que presento la i_{corr} obtenida con las dos técnicas electroquímicas empleadas (resistencia a la polarización y ruido electroquímico). Los mayores valores de i_{corr} se encuentra en la parte central de la viga (F2), mismos que están clasificados en niveles de corrosión muy elevadas.

Los valores mas altos de i_{corr} obtenidos por ruido electroquímico, son aquellos que se presentaron cuando no se empleo el anillo de guarda. Por lo anterior se puede observar en las gráficas (10b-d) que cuando se emplea el anillo de guarda se delimita el área de medición lo que da como resultado tener una menor i_{corr} .

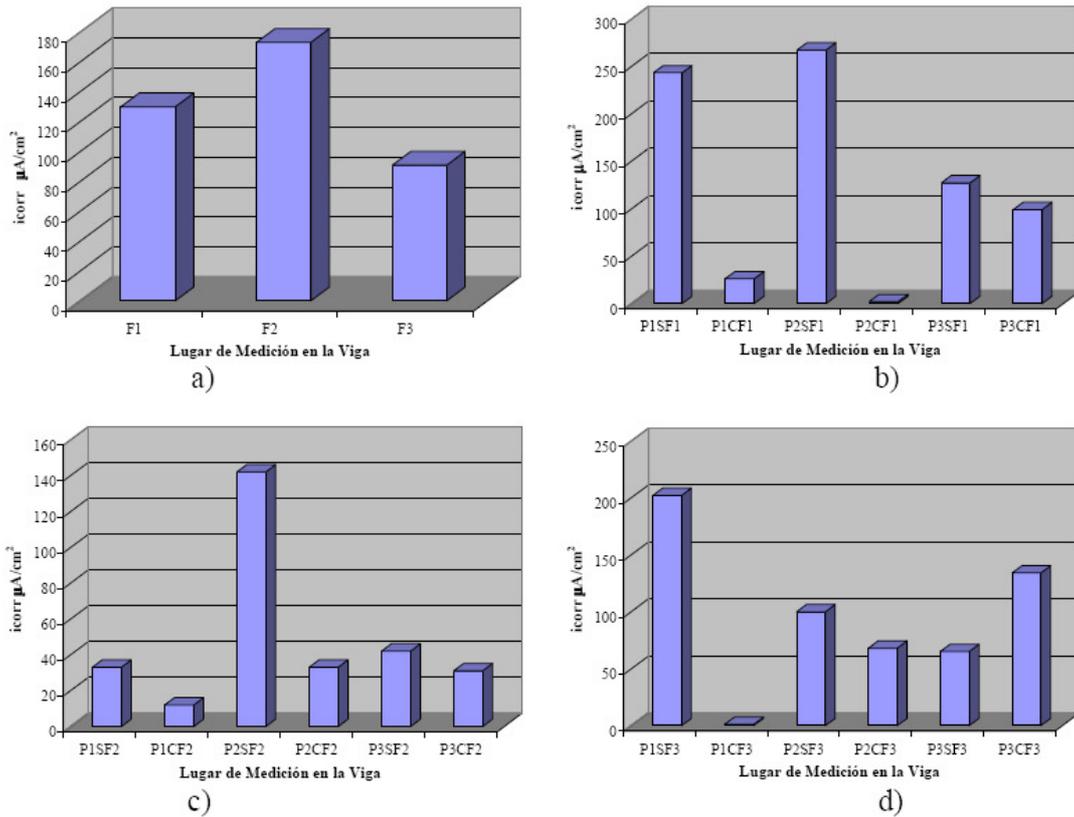


Figura 10. Valores de intensidad de corrosión: a) equipo comercial (resistencia a la polarización); b), c) y d) ruido electroquímico con y sin anillo de guarda.

Conclusiones

- Los valores de velocidad de corrosión obtenidos con ruido electroquímico sin anillo de guarda, presentan valores de corrosión muy altos, del mismo orden de magnitud que los obtenidos con el equipo comercial ($173 \mu A/cm^2$).
- Al emplear el anillo de guarda y la técnica de ruido electroquímico, los valores de velocidad de corrosión disminuyen llegando a encontrar valores de hasta $1 \mu A/cm^2$. Dando como resultado un riesgo debido a corrosión moderado.
- En el anillo de guarda, el área del electrodo de platino juega un papel importante en la adquisición de la señal de corriente, ya que disminuye la variación entre los resultados de las mediciones de ruido electroquímico.
- Ruido electroquímico junto con anillos de guarda se convierten en una técnica aplicable a estructuras reales de hormigón armado, dado que no perturban al sistema.

- Al evaluar una estructura de hormigón armado con la técnica de ruido electroquímico, se puede establecer y priorizar que zonas de dicha estructura requiere una intervención de reparación más pronto, ya que con esta técnica se determina si el sistema está activo o pasivo.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado al CONACYT, al CIMAV y al Instituto Tecnológico de Chihuahua, así como también al personal técnico del Grupo de Corrosión: M.C. Adán Borunda Terrazas y M.C. Víctor Orozco Carmona.

Empleo de Anillos de Guarda y Ruido Electroquímico en la Evaluación del Sistema Acero-Hormigón

Resumen

Evaluar los parámetros electroquímicos del acero del armado en especímenes de hormigón, a nivel laboratorio no se tiene ningún problema, se pueden emplear prácticamente cualquier técnica electroquímica conocida y así poder obtener dichos parámetros, pero *in situ*, son pocas las técnicas disponibles para llevar a cabo dicha evaluación. En este trabajo de investigación se presenta una alternativa viable para la evaluación electroquímica del acero del armado embebido en estructuras de hormigón ya sea en laboratorio o "*in situ*". Para tener una referencia de los valores de intensidad de corrosión obtenidas con la técnica de ruido electroquímico y poder establecer si estos son reales, se realizaron mediciones con un equipo comercial que aplica la técnica de resistencia a la polarización.

Palabras clave: corrosión, ruido electroquímico, resistencia a la polarización, hormigón armado, monitoreo.

Referencias

1. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería UNAM, Manual de Tecnología del Concreto "Sección 3", México D.F. Editorial Limusa, 1994, pp. 258.
2. ASTM C-876-94, American Society of Test and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Philadelphia, USA (1994).
3. S. Feliu, J.A. Gonzalez, F. Feliu Jr, C. Andrade, *ACI Materials Journal* Sep. Oct. (1990) 457-460.

4. J. Newman, *J. Electrochem. Soc.* 113 (1966) 501.
5. Manual de Inspección, “Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, Durar, Red Temática del CYTED, 1997.
6. R.A. Cottis, *Corrosion* 57 (2001) 265-285.
7. M. Stern, A.L.J. Geary, *J. Electrochem. Soc.* 104 (1957) 56-61.