



**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS REGISTROS DE RUIDO ELECTROQUÍMICO
OBTENIDOS DEL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO
EMBEBIDO EN CONCRETO**

**STATISTICAL ANALYSIS OF ELECTROCHEMICAL NOISE RECORDS OBTAINED
FROM THE PROCESS OF CORROSION OF REINFORCED STEEL EMBEDDED IN
CONCRETE**

C.A. Balan-Ortiz¹, M. Luna Brito¹, T. Pérez López^{2*}, R.J. Camacho-Chab³

¹Facultad de Ciencias Químico Biológicas, ²Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche, Av. Agustín Melgar s/n, C.P. 24030, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

³ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Campeche. Carretera Campeche-Escárcega Km 9, C.P. 24500, Lerma, Campeche.

Recibido 3 de julio de 2014; Aceptado 18 de octubre de 2016

Resumen

Existen diversas maneras de analizar las señales de ruido electroquímico (RE) para observar la actividad en la interfase metal-electrolito. Debido a que los registros se obtienen en períodos de tiempo discretos, la manera más común de examinar los datos es a través de la aplicación de métodos estadísticos en el dominio temporal. Estos métodos pueden ser clasificados con base en su utilidad en aquellos que pretenden cuantificar la magnitud del proceso de corrosión (desviaciones estándar) destacando el uso de la resistencia en ruido y los que tratan de extraer información sobre el mecanismo del proceso corrosivo en sí mismo, basados en la suposición de que la forma de los registros temporales son un reflejo del comportamiento de la interfase metal-electrolito. Entre estos últimos se puede destacar el valor medio, el sesgo, la kurtosis y el índice de localización, los cuales pueden reflejar cambios en el mecanismo de corrosión. Este trabajo presenta el tratamiento estadístico de los datos de RE obtenidos de probetas con acero embebido en concreto fabricado con NaCl (Cl), NaCl+NaNO₂ (I) y sin adición de NaCl (S) en el agua de amasado y expuesto a un medio marino natural.

Palabras clave: ruido electroquímico, resistencia en ruido, análisis de series temporales, parámetros estadísticos, corrosión.

Abstract

There are several ways to analyze electrochemical noise signals (RE) to observe the activity at the metal - electrolyte interface. Due that records are available at discrete time periods, the most common way to examine the data is through the application of statistical methods in the time domain. These methods can be classified based on their usefulness in those which seek to quantify the magnitude of the corrosion process (standard deviations), highlighting the use of noise and resistance in trying to extract information about the mechanism of the corrosion process itself, based on the assumption that the shape of the temporary registers are a reflection of the behavior of the metal - electrolyte interface. Among these is possible to mention the average value, the bias, the kurtosis, and pitting index, which may reflect changes in the corrosion mechanism. This paper presents the statistical treatment of the data obtained from specimens with RE steel embedded in concrete made with NaCl (Cl), NaCl + NaNO₂ (I) without addition of NaCl (S) in the mixing water and exposed to an average natural marine.

Keywords: electrochemical noise, noise resistance, temporary series analysis, statistical parameters, corrosion.

* Autor para la correspondencia. E-mail: tezperez@uacam.mx

1 Introducción

La corrosión del acero es sin lugar a dudas la principal responsable del deterioro de las estructuras de concreto armado. Esta problemática genera un sinnúmero de efectos negativos que implican no sólo la integridad estructural sino el incremento de gastos aplicados en la reparación y mantenimiento, sin contar los efectos adversos al medio ambiente. Por consiguiente, la importancia del control de la corrosión debe concertarse no sólo en el aspecto económico sino también al carácter social, enmarcado en la calidad y regularidad del servicio que una estructura en condiciones reales debe prestar.

Debido a la complejidad del fenómeno corrosivo, se han propuesto diversos procedimientos de estudio y análisis, los cuales han estado especialmente enfocados al estudio de las causas y mecanismos de deterioro; al desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control, tanto en laboratorio como *in situ*, Nieves-Mendoza y col. (2008); al empleo de métodos de protección así como al empleo y sustitución de materiales (Rosas y col., 2014). Recientemente se planteó la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras en servicio, no deterioradas o estimar la futura en el caso de nuevas desde la fase de proyecto (Castro, 1998; Troconis, O, y col., 1997; Roberge, 2000; Hartt, 2014). Esto hace que sea importante evaluar anticipadamente los riesgos de corrosión mediante procedimientos que permitan hacer uso de los métodos recomendados para su control. Por consiguiente, el empleo de técnicas estadísticas se ha convertido en una herramienta útil ya que permite determinar qué variables son las de mayor incidencia en la determinación de los procesos electroquímicos de interfase (Mendoza-Castillo y col.), la corrosividad, el tipo de interacción que poseen, de tal manera que con la medición de un número mínimo de variables puedan evaluarse los riesgos de corrosión con un nivel aceptable de confiabilidad (Raquel, 2006; Veleva, y col. 2013).

Uno de los procedimientos para la obtención de registros que puedan ser utilizados en la estimación de un comportamiento corrosivo se obtiene mediante la aplicación de la técnica de ruido electroquímico (RE), la cual trata las oscilaciones en potencial y corriente electroquímicas en el transcurso del tiempo (Cheng y Bogaerts, 1995). La información proporcionada en períodos de tiempo discretos permite analizar las series de tiempo en potencial y corriente como Análisis de Series Temporales (AST) para obtener información relacionada con el sistema así como también su caracterización con respecto a la corrosión (Malo y col., 2002; Cottis, 2001).

El presente trabajo se centró en evaluar la respuesta del refuerzo metálico embebido en concreto expuesto en un medio marino tropical y fabricado con adición de NaCl 3.5 % en peso y NaCl 3.5 % en peso más un inhibidor (NaNO₂) adicionado en el agua de amasado durante el proceso de colado, mediante la aplicación de la estadística como herramienta que permita aportar información sobre las variables que influyen en la tendencia activa o no activa del acero de refuerzo con respecto al proceso de corrosión.

Se analizaron los registros de RE de manera directa y mediante parámetros estadísticos, en los cuales se denotan los valores de la media y la mediana seguido de la descripción de la desviación estándar de los registros temporales de potencial e intensidad de corriente, así como también del parámetro resistencia en ruido y otros parámetros estadísticos tales como el sesgo y la kurtosis (Malo y col., 2002; Cottis, 2001).

2 Material y metodología

2.1 Elaboración de probetas

Los especímenes de prueba se fabricaron con los materiales de mayor uso por la industria de la construcción en la Península de Yucatán: cemento Portland Ordinario, de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010, agregado grueso (grava) y agregado fino (polvo de piedra), ambos de origen calizo y varilla corrugada de acero comercial.

TABLA 1. Proporción de materiales utilizados en la elaboración de las probetas¹⁰.

No. de PROB.	CEMENTO (Kg/m ³)	AGREGADO FINO (Kg/m ³)	AGREGADO GRUESO. (Kg/m ³)	AGUA (L)	NaCl (Kg/m ³)	NaNO ₂ (g/l)	ADITIVO FLUIDIZANTE (ml)
3	28	80	120	35	0	0	260
3	36.708	107.88	161.184	48.3	2.600	0	440
3	36.708	107.88	161.184	48.3	2.600	2.5	440

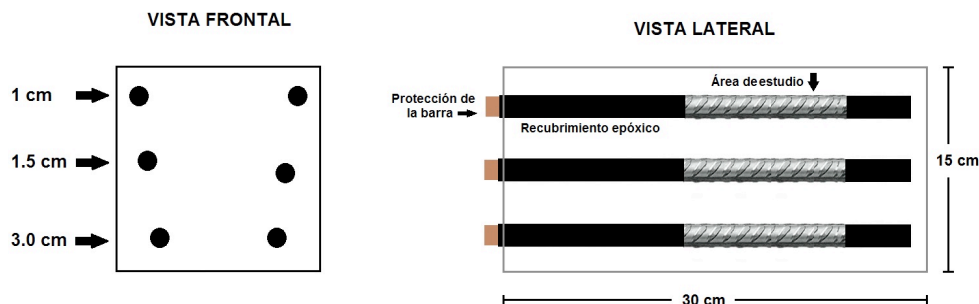


Fig. 1. Representación esquemática de las vigas en estudio.

Para la elaboración de las muestras, se siguieron los lineamientos de fabricación establecidos en (IMCYC, 1993), la dosificación de componentes de las probetas se presenta en la Tabla 1. Se elaboraron tres series de especímenes con una relación agua/cemento de 0.60 utilizando agua purificada comercial para la mezcla: la primera serie como testigo sin adiciones en el agua de amasado (S); la segunda con adición de cloruro de sodio (NaCl) (Cl) y la tercera con NaCl + NaNO₂ (I).

Fueron elaborados especímenes rectangulares de 15 cm por lado en la sección por 30 cm de largo; con la finalidad de evaluar la respuesta del acero a diferentes profundidades se colocaron las varillas con un recubrimiento de 1.0, 1.5 y 3.0 cm de concreto con respecto al acero de refuerzo (Fig. 1).



Fig. 2. Ubicación del sitio de exposición.

2.2 Ubicación del sitio de ensayo

Durante doce meses las probetas bajo estudio fueron colocadas en las instalaciones del Centro Regional del Investigaciones Pesqueras (CRIP), del Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA), ubicado a 10 m de la línea de costa a orillas de la carretera Campeche Lerma km. 5, C.P. 24500, Lerma, Campeche. (Fig. 2).

La Fig. 3 muestra el arreglo experimental para la obtención de los datos de RE, en el cual se puede denotar la utilización de un potenciostato comercial. La celda electroquímica consistió de dos varillas colocadas a la misma profundidad y un electrodo de calomelanos saturado como referencia (Smulko y col., 2006). El registro tanto de potencial como de intensidad de corriente fue programado para un total de 2048 puntos en intervalos de 0.5 segundos (García-Ochoa y Corvo, 2015).

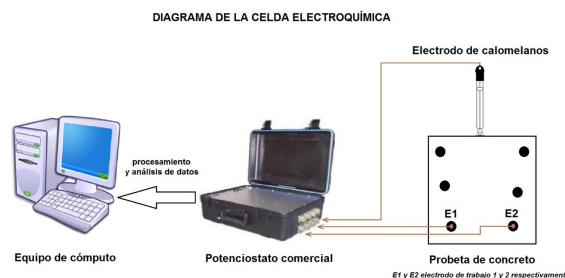


Fig. 3. Arreglo experimental.

2.3 Métodos estadísticos de análisis

El análisis de las series de tiempo es el método más simple y el más directo para la identificación de detalles puntuales y característicos de los tipos de corrosión, sin embargo la observación directa de la representación gráfica imposibilita la obtención de información sobre el proceso corrosivo que lo ha generado (Malo y col., 2002).

Con base en lo anterior, los métodos estadísticos simples tratan a las series de tiempo como una colección de potenciales o corrientes individuales, ignorando la relación entre un valor y el siguiente (muestra de población). Por consiguiente, el análisis de las series de tiempo es importante para encontrar una coherencia entre los datos obtenidos. Para los resultados obtenidos, se aplicaron desviaciones estándar, sesgo y kurtosis como apoyo en el análisis del comportamiento de la interfase concreto-acero.

3 Resultados y discusión

3.1 Series de tiempo de ruido electroquímico

Las figs. (4)-(5) presentan los resultados obtenidos mediante la medición de RE a las probetas sin adición

de cloruros (S); (6)-(7) con adición (Cl); y (8)-(9) con la mezcla de cloruros e inhibidor (I) tomados directamente de la celda electroquímica tanto en corriente como en potencial.

Respecto a los resultados de ruido en potencial se puede denotar que durante el inicio del estudio el registro indicaba la uniformidad en el intervalo de corrosión severa para los tres sistemas bajo estudio (S, Cl, I). Conforme transcurre el tiempo los valores tienden hacia niveles más positivos lo que estaría indicando que las probetas “S” y “Cl” en la etapa final del período de exposición, permanecen en un intervalo de baja probabilidad de corrosión. A su vez, los valores de las probetas “I”, aunque sufren un aumento en los valores del potencial, el intervalo de permanencia se establece en la zona de incertidumbre de corrosión, de acuerdo al criterio proporcionado en la norma ASTM C876-09, Tabla 2.

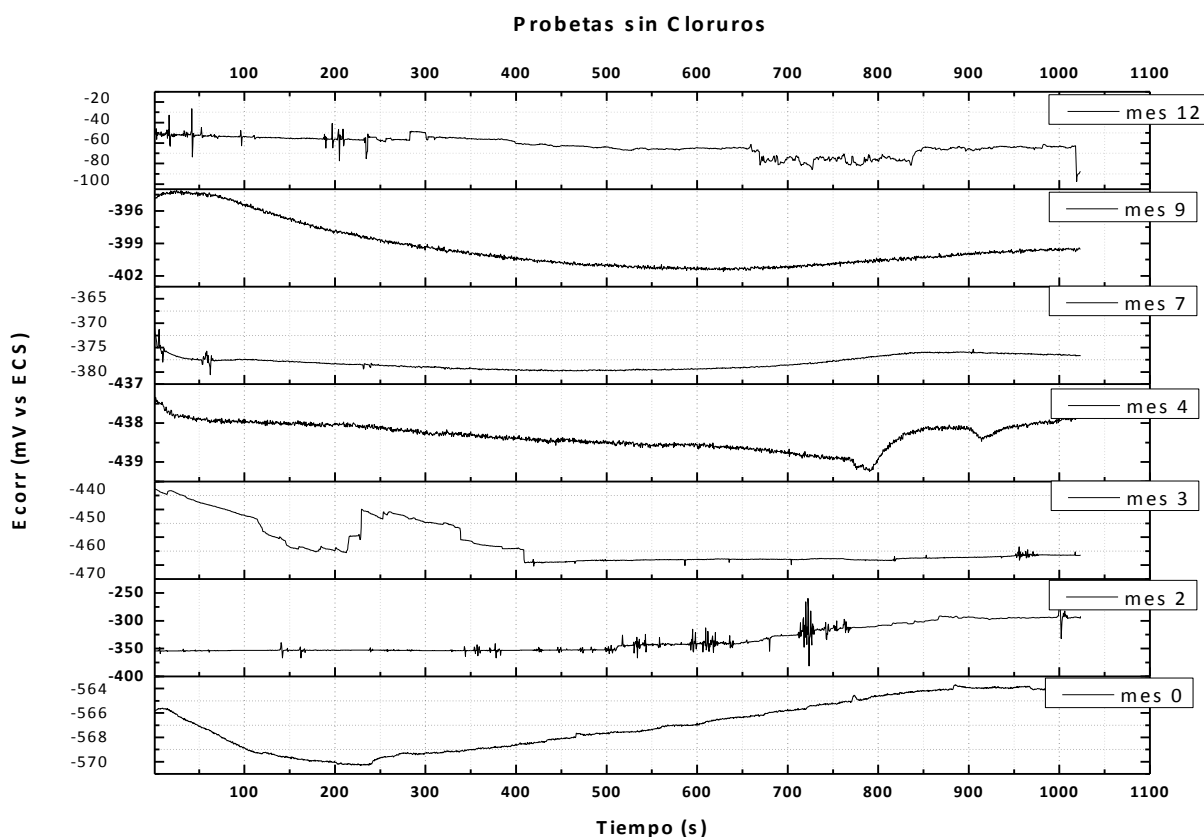


Fig. 4. Gráficos de ruido en potencial vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas sin adición de cloruros.

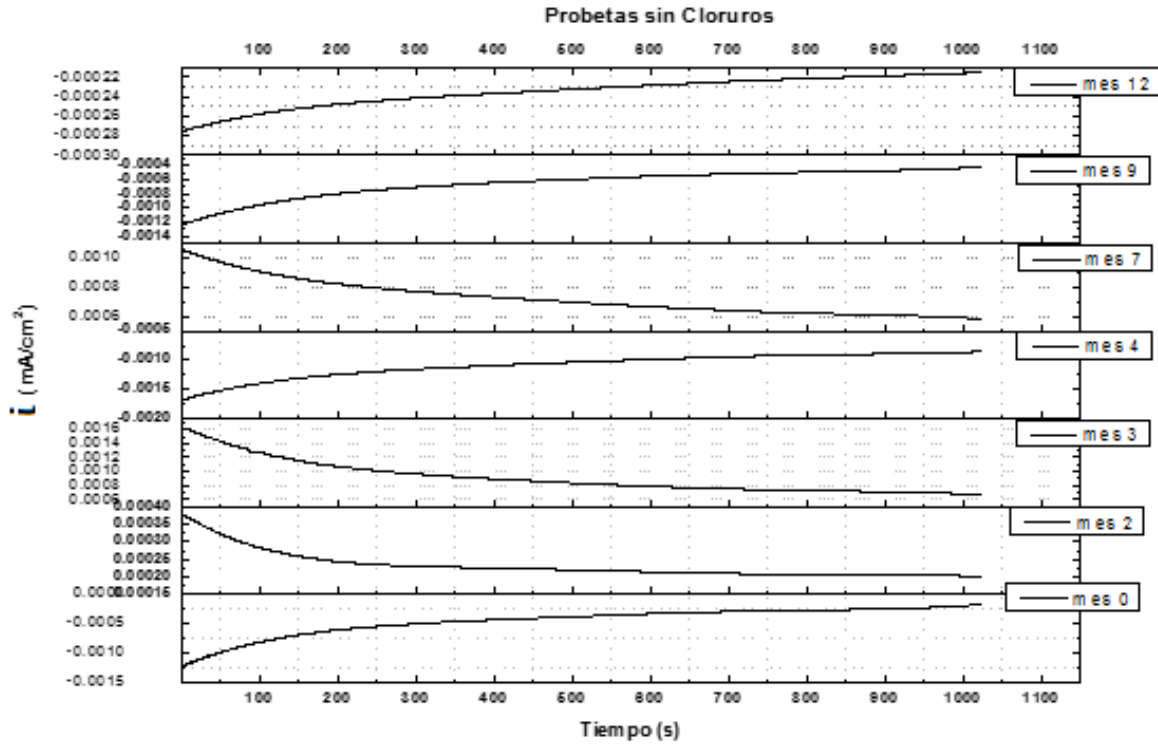


Fig. 5. Gráficos de ruido en corriente vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas sin adición de cloruros.

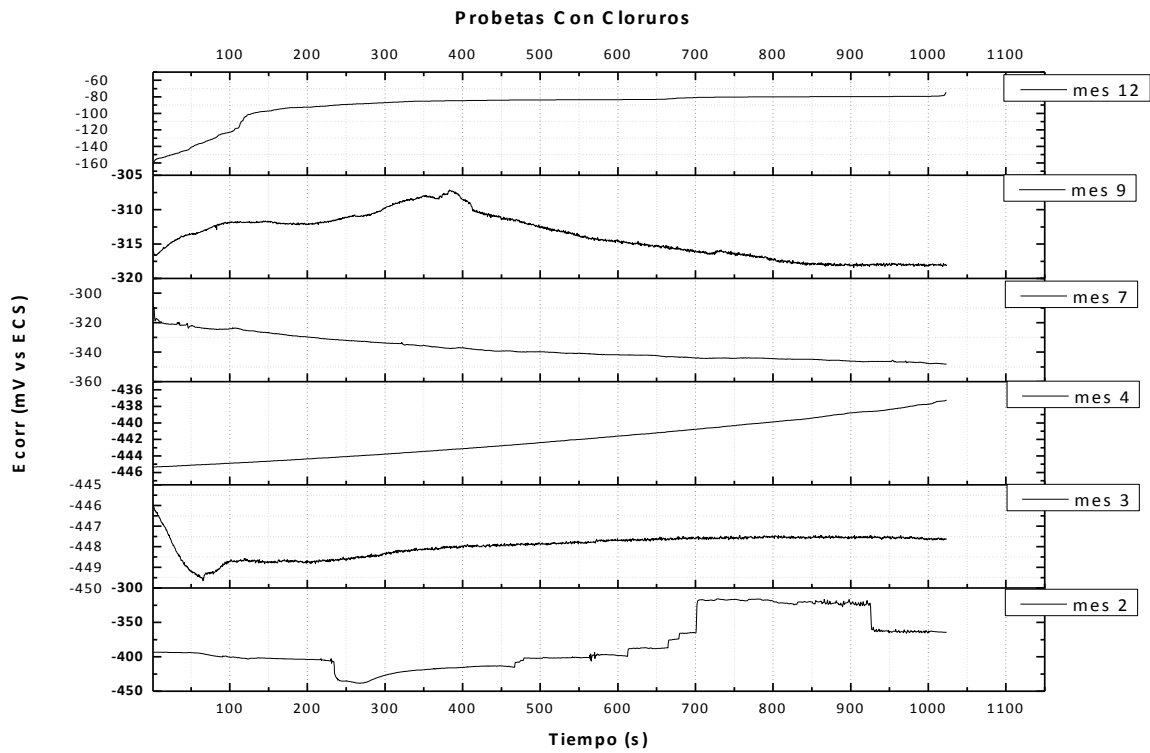


Fig. 6. Gráficos de ruido en potencial vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas con la adición de cloruros.

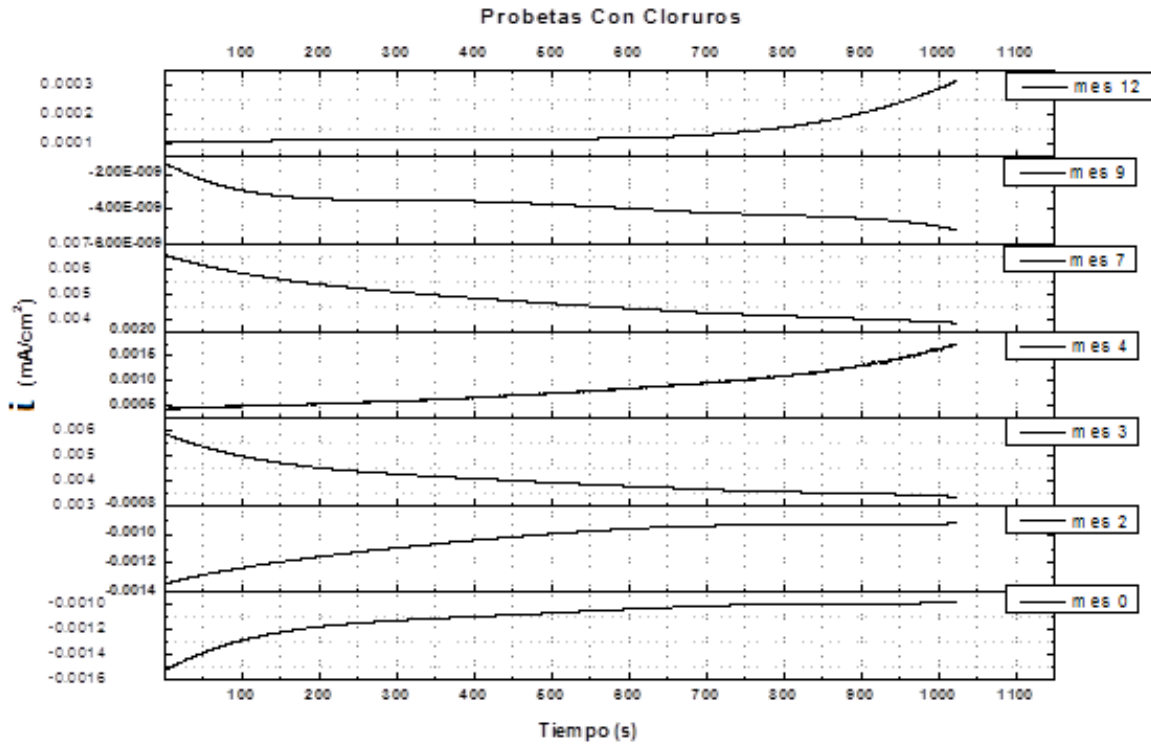


Fig. 7. Gráficos de ruido en corriente vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas con la adición de cloruros.

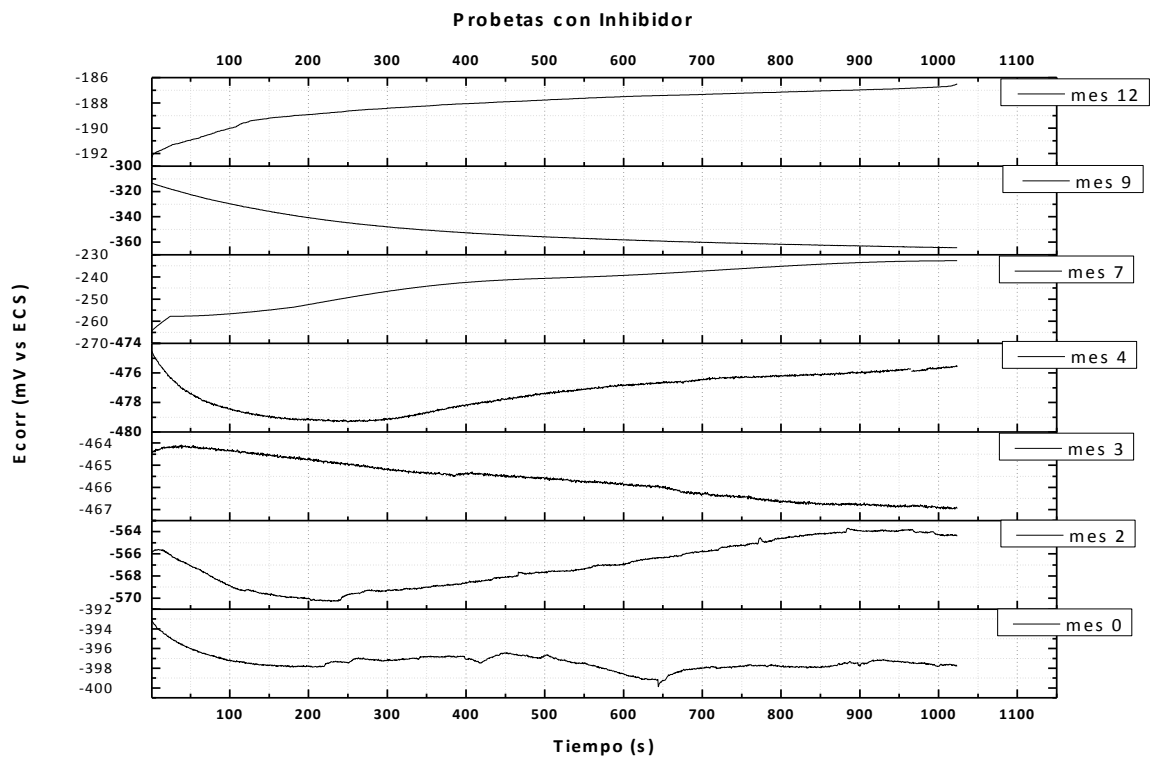


Fig. 8. Gráficos de ruido en potencial vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas con la adición de inhibidor.

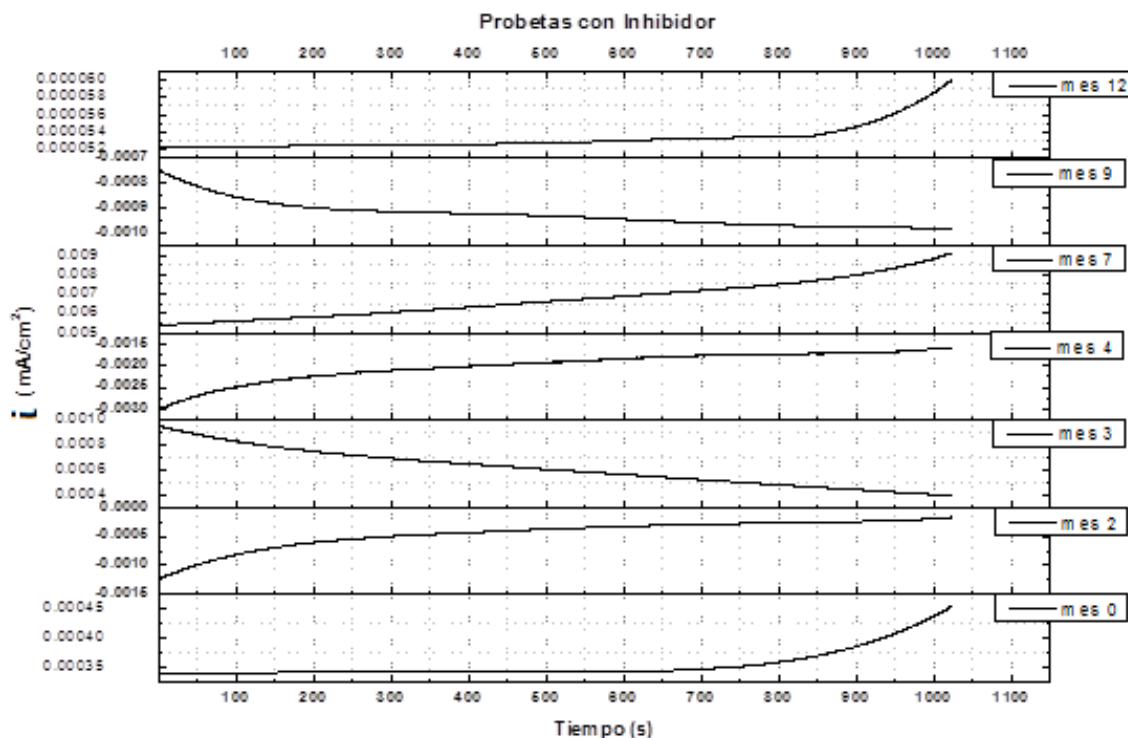


Fig. 9. Gráficos de ruido en corriente vs tiempo para las probetas de concreto fabricadas con la adición de inhibidor.

TABLA 2. Potencial de corrosión de acuerdo a la norma ASTM C876-09

E_{corr}	Criterio
< -0,2 V	10% de probabilidad de corrosión
entre -0,2 a -0,35 V	Cierta incertidumbre
> -0,35 V	90% de probabilidad de corrosión

3.2 Análisis estadístico

La Fig. 10 muestra de manera sintetizada los parámetros descriptivos correspondientes a los valores obtenidos de la serie de tiempo en potencial. Es posible observar en primera instancia que la media tiende hacia valores más positivos lo que indica que los valores de los tres sistemas (S, Cl, I) se desplazan hacia intervalos de baja probabilidad de corrosión, cabe destacar la diferencia de las condiciones de fabricación y como era de esperarse las probetas sin adición son las que presentan valores más positivos.

En los sistemas estudiados no se aprecia diferencia entre los valores de la media y de la mediana, que en el caso de existir corrosión localizada debería ser significativa, puesto que la separación entre la media y la mediana se acentúa al aumentar la asimetría de la

señal (Troconis y col., 2007), situación que esperaba presentarse en los sistemas fabricados con la adición de sales.

Por otra parte, el sesgo de los datos fortalece el comportamiento simétrico con respecto a la media durante la mayor parte del estudio, lo que indica que las señales de potencial en función del tiempo no presentan variaciones producidas por la presencia de datos atípicos. Al segundo mes de exposición se puede observar que la tendencia de los valores de la serie sin cloruros se desplaza hacia un intervalo de incertidumbre de corrosión, posteriormente y en función del tiempo se observa de nueva cuenta la simetría de los valores con la tendencia hacia niveles más positivos lo que indicaría que los sistemas bajo estudio, salvo el correspondiente a los fabricados con inhibidor, se encuentran en intervalos de corrosión

despreciable.

La Fig. 11 representa la conjunción de parámetros estadísticos correspondientes a los valores obtenidos de la serie de tiempo en corriente. Se puede observar en primera instancia que el orden de los valores sólo indica la permanencia en el intervalo de baja actividad de corrosión y por consiguiente los resultados obtenidos de la medición directa de RE no concuerdan con los obtenidos de la serie de tiempo en potencial. En este caso, es conveniente mencionar que el potencial es un parámetro termodinámico e indica tendencias energéticas, mientras que la intensidad de corriente es un parámetro cinético y mide la rapidez

de la reacción.

Por otra parte, el sesgo de los datos representa un comportamiento casi simétrico con respecto a la media, lo que indica que las señales de corriente en función del tiempo no presentan grandes variaciones salvo el último mes en el cual los valores de la serie "CI" presenta un ligero comportamiento asimétrico negativo lo que corrobora la tendencia hacia el intervalo de valores de baja actividad de corrosión, al igual que los valores de la kurtosis que señala la tendencia hacia valores más negativos durante la mayor parte del estudio.

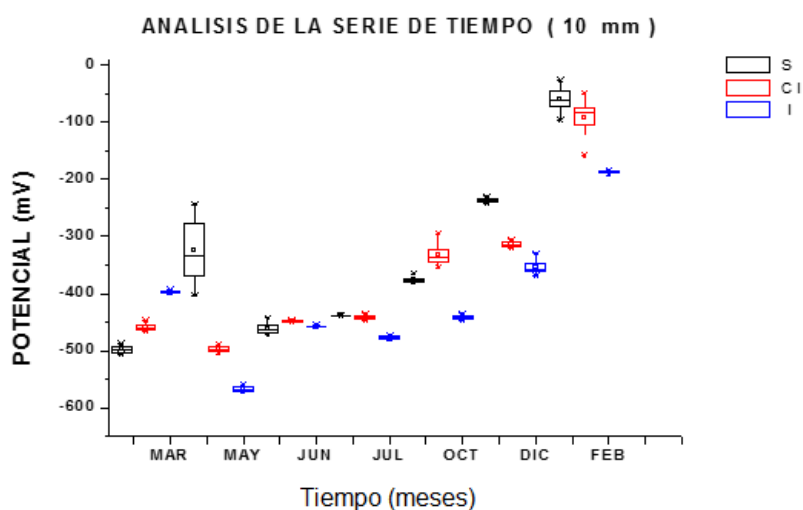


Fig. 10. Análisis de la serie de tiempo en potencial.

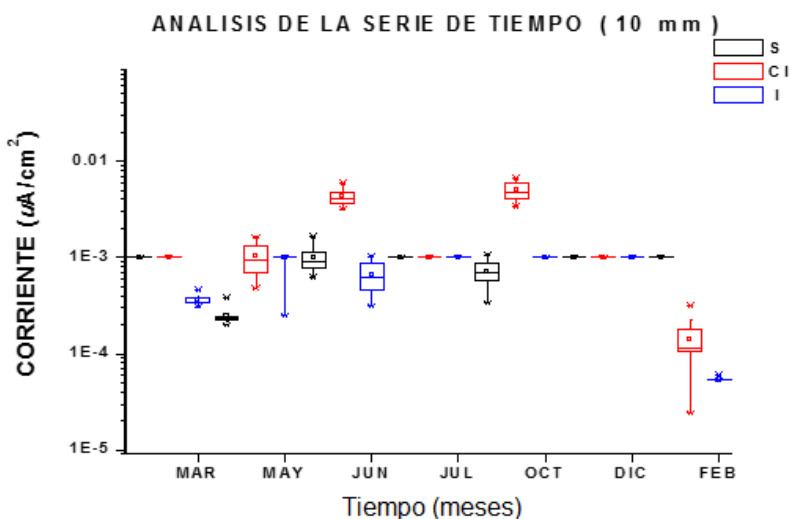


Fig. 11. Análisis de la serie de tiempo en corriente.

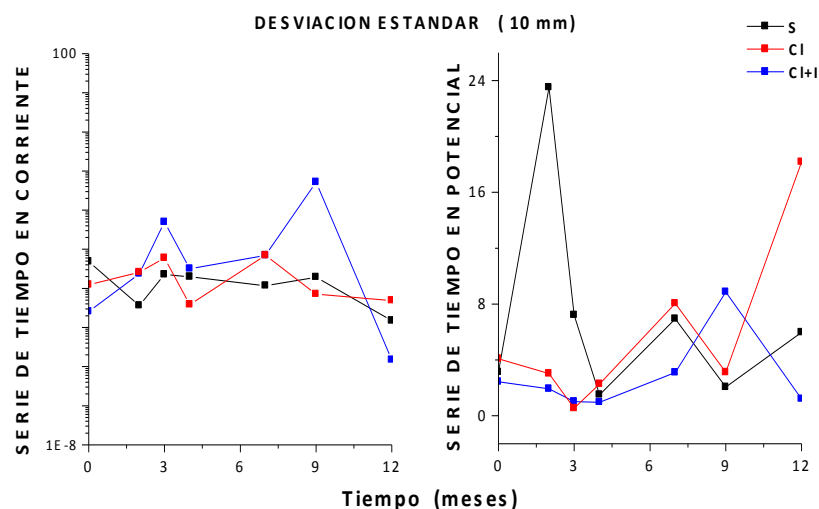


Fig. 12. Desviación estándar en función del tiempo.

La Fig. 12 presenta la desviación estándar para las series de potencial y corriente. Este parámetro permite evaluar la dispersión de los datos con respecto al valor medio, en otras palabras permite cuantificar la amplitud de las fluctuaciones (Goellner, 2001). En el caso de los valores de la serie de tiempo en corriente, al inicio solo se presenta una ligera diferencia en la escala de valores para las probetas con inhibidor manteniéndose sin cambios notables hasta el noveno mes donde los valores indican un incremento en el orden de la desviación lo que estaría representando un aumento en la formación de compuestos de carácter oxidado en la superficie del acero de refuerzo (Cheng y Bogaerts, 1995). Esto puede ser debido a la acción de los iones cloruro sobre la interface concreto-acero para romper la estabilidad de la película pasiva y el efecto del NO_2^- como inhibidor, restableciendo la condición de pasividad (Dong, y col., 2011).

Por otra parte y caso contrario se puede apreciar que los valores de la desviación en potencial y específicamente los correspondientes al segundo y doceavo mes, se distingue una diferencia significativa solo que en el caso de los valores de las probetas sin cloruros y con cloruros respectivamente, lo que representa un aumento correspondiente, de acuerdo a Cheng y Bogaerts (1995), en la producción de compuestos de carácter oxidado, contrario a lo mostrado por los valores del sistema con inhibidor que bajo esta condición de análisis no denotan incrementos considerables de la desviación estándar permaneciendo así en zona incierta de actividad de corrosión.

En la Fig. 13 se puede apreciar la gráfica

correspondiente al coeficiente de variación. Con base en las escalas para ambas figuras, puede observarse que el gráfico correspondiente a los valores de la serie de tiempo en potencial, representa un comportamiento tendiente a lineal durante casi todo el estudio, lo que estaría representando una característica de la estocasticidad del proceso (Cottis, 2001), sólo al final del tiempo de exposición se observa una pendiente negativa para los valores de los sistemas sin cloruros e inhibidor. Por otra parte, se visualiza de manera clara que el comportamiento de los valores de la serie de tiempo en corriente no representa un proceso estocástico.

Por otra parte, la Tabla 3 presenta un resumen de los parámetros estadísticos descritos con anterioridad para el análisis de las series de tiempo en potencial y corriente. En el caso de la desviación estándar, la cual busca cuantificar el proceso de corrosión, se puede observar que existen diferencias significativas entre las series bajo estudio. De manera puntual resalta la serie de tiempo en potencial, el valor de las probetas "S" cuyo valor en desviación estándar es alto en comparación con los demás sistemas lo que indica y refuerza el comportamiento hacia valores más positivos que indican zona de poca probabilidad de corrosión, con base en el criterio establecido en la norma ASTM C876-09. Por otra parte, la permanencia de intervalos de órdenes de magnitud entre 10^{-5} y 10^{-2} en el análisis de la serie de corriente (Tabla 3) indica actividad de corrosión aunque no permite diferenciar un proceso de corrosión uniforme de uno localizado (Bing y col., 2007)

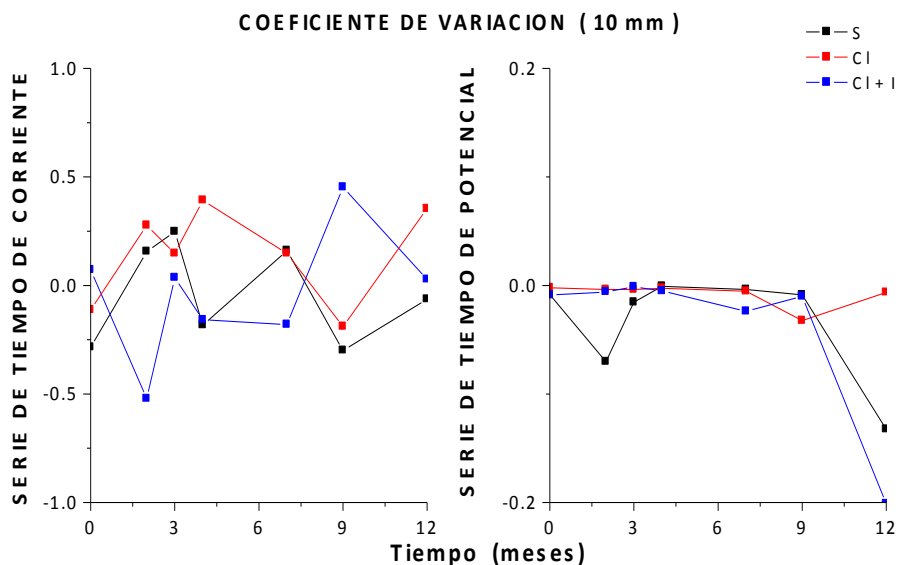


Fig. 13. Coeficiente de variación en función del tiempo.

TABLA 3. Resumen de parámetros estadísticos.				
	parámetros	S	CI	I
Ecorr	σ	7.20	5.60	2.80
	Kurtosis	0.03	0.45	0.04
	Sesgo	0.60	0.08	0.25
Icorr	σ	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-5} - 10^{-2}$
	Kurtosis	1.77	0.83	2.13
	Sesgo	0.37	0.71	0.70

El sesgo y la kurtosis son parámetros que se utilizan para extraer información del mecanismo del proceso corrosivo, los cuales se basan en su mayoría en la suposición de que la forma de los registros temporales son un reflejo del comportamiento de la interfase metal-electrolito, los valores del sesgo para las series de tiempo en potencial y corriente indican mínima asimetría positiva con respecto a la media. Para la kurtosis los valores que se obtienen son positivos y en caso de existir un aumento en la magnitud, representaría un incremento en la dispersión de estos.

La Fig. 14 presenta los valores relativos al índice de localización, el cual permitiría comparar el valor de la corriente media con relación a la magnitud de las fluctuaciones. Con base en la gráfica correspondiente a IL, los valores no se adecuan exactamente a la estadística descriptiva mostrada con anterioridad ya que permanecen en el intervalo de corrosión localizada y no se observa ninguna diferencia con respecto a

las condiciones de fabricación, sólo al término del estudio se observa un cambio en los valores de “CI” e “I” hacia el intervalo de corrosión mixta. Por otra parte, una aportación importante del uso de las desviaciones estándar para la interpretación de los registros de ruido es el cociente obtenido entre los valores de potencial y corriente conocido como la Resistencia en ruido (Rn). En el caso de la gráfica correspondiente a los valores de Rn, los cuales pueden aproximarse con los de la Resistencia a la polarización (Rp) (Smulko y col., 2006; Rivera y Castaño, 2012; Nieves-Mendoza y col., 2008), es factible establecer que no existe un claro intervalo que concuerde con los datos del análisis estadístico ya que los valores señalan corrosión localizada al no alcanzar la Rn el orden de MΩ, que correspondería a la condición de pasividad.

En la Fig. 15 se pueden apreciar los valores correspondientes a la velocidad de corrosión y prácticamente se puede observar que en base a los criterios los valores permanecen en zona de pasividad

salvo al tercer y noveno mes que indican, para el caso de los sistemas con inhibidor y sal, un aparente incremento a la zona de corrosión moderada. Esta condición puede deberse a que el barrido de las señales de ruido en corriente no logran detectar cambios superficiales, sino la presencia de núcleos

activos que indican el desarrollo del proceso de corrosión de manera generalizada más que localizada y por ende se puede observar la correspondiente condición termodinámica en los valores de potencial de corrosión.

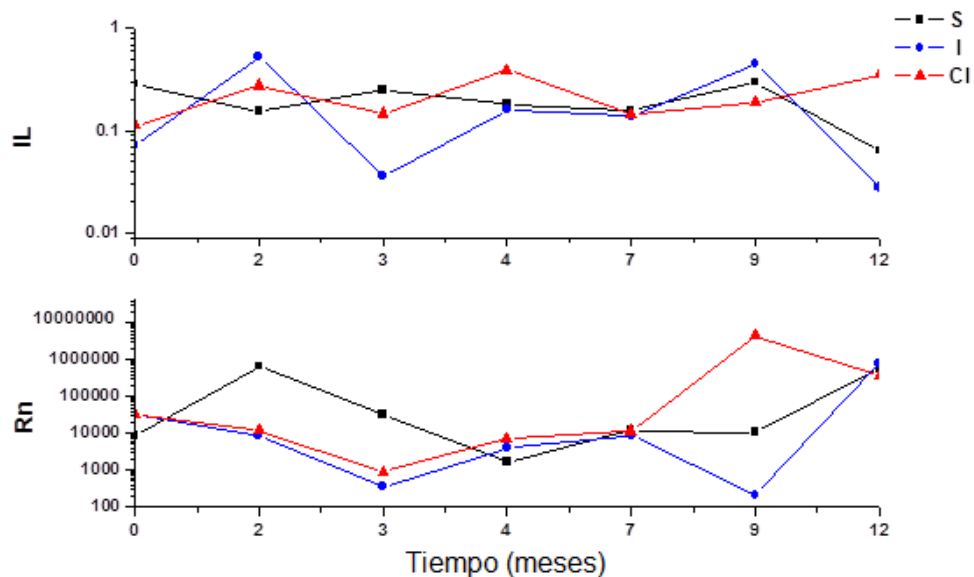


Fig. 14. Desviación estándar en función del tiempo.

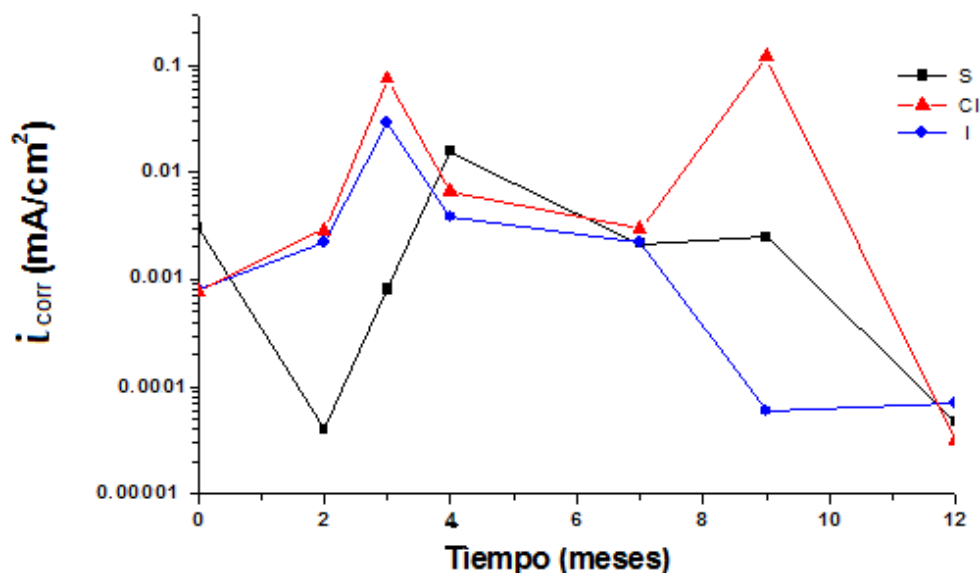


Fig. 15. Velocidad de corrosión en función del tiempo.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos a un año de exposición se puede concluir lo siguiente:

La información obtenida de manera directa mediante la aplicación de la técnica de ruido electroquímico, indica que la condición del acero de refuerzo con respecto a la corrosión se establece en el intervalo de riesgo medio de acuerdo a los criterios establecidos en la literatura.

No se aprecia claramente el efecto de la adición de cloruro de sodio ni de inhibidor en el comportamiento electroquímico de la interfase concreto-acero de refuerzo.

El análisis estadístico realizado a las series temporales aporta datos interesantes que permiten aproximar la condición del acero de refuerzo, en específico los valores de la desviación estándar de la serie de potencial ya que el valor para las probetas fabricadas sin la adición de cloruros justifica su permanencia en el intervalo de baja probabilidad de corrosión; caso contrario se encontró en los sistemas con adición de sales cuyo análisis de la serie temporal de corriente indican actividad de corrosión.

La conjunción de los valores cuantitativos permitiría extraer información relativa del proceso corrosivo mediante la obtención del índice de localización y de la resistencia en ruido; sin embargo, los resultados no permiten diferenciar corrosión localizada de la uniforme lo que muestra la complejidad del sistema.

De acuerdo con la información presentada, por la condición de la interfase no es factible aún reconocer diferencias derivadas de las variables experimentales testigo, adición de NaCl y NaCl + Inhibidor. Se espera que a mayor tiempo de exposición se aprecien los efectos de las variables.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte recibido por el proyecto Conacyt CB-2008-01 101891.

Referencia

ASTM C876-09. (2009). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bing, Z., Jian-Hua L., Rong-Gang H., Rong-Gui D. y Chang-Jian, L. (2007). Study

on the corrosion behavior of reinforcing steel in cement mortar by electrochemical noise measurements. *Electrochimica Acta* 52, 3976-3984.

Castro, P. (1998). *Corrosión en Estructuras de Concreto Armado*, Editorial Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, IMCYC, México.

Cheng, J. F. y Bogaerts, W.F. (1995). The physical meaning of noise resistance. *Corrosion Science* 37, 1839-1842.

Cottis, R. A. (2001). Interpretation of electrochemical noise data. Critical review of corrosion science and engineering. *Corrosion* 57, 265-285.

Dong, Z. H., Shi, W. y Guo X. P. (2011). Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution. *Corrosion Science* 53, 1322-1330.

García-Ochoa E. y Corvo F. (2015). Using recurrence plot to study the dynamics of reinforcement steel corrosion. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* 51, 716-724.

Goellner J., Burkert, A., Heyn, A., Boese, E., Ezerska, O. y Hickling, J. (2001). State-of-the-art of corrosion testing by using electrochemical noise measurements. *Materials Science* 37, 509-519.

Hartt, W. (2014). Analytical evaluation of time-to-corrosion for chloride-exposed reinforced concrete with an admixed corrosion inhibitor: Part 2-consideration of diffusional inhibitor egress. *Corrosion* 70, 156-165.

IMCYC, (1993). *Proporcionamiento de Mezclas. Concreto Normal, Pesado y Masivo. ACI 211.1*, México, 1993.

Malo, J. M. y Uruchurtu, J. (2002). La Técnica de Ruido electroquímico para el Estudio de la Corrosión. En *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión*, Genescá, J. Ed. Pp. 45-65). UNAM, México, D. F.

Mendoza-Castillo, D. I., Bonilla-Petriciolet, A. y Jauregui-Rincon, J. (2010). Análisis estadístico y modelación de la sorción multicomponente de metales pesados en agua empleando carbonizado de hueso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15, 525-542.

- Nieves-Mendoza, D., Almeraya-Calderón, F., Uruchurtu-Chavarrín, J., Martínez-Villafañe A., Chacón-Nava J., Baltazar-Zamora M., Gaona-Tiburcio, C., Laria Menchaca, J. (2008). Evaluation of reinforced concrete structures by means of a novel electrochemical noise corrosion sensor. *Corrosion* 64, 920-928.
- NMX-C-111. ONNCCE-2004. Industria de la construcción -Agregados para concreto hidráulico- Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la construcción -Agua para concreto- Especificaciones.
- NMX-C-414-ONNCCE-2010. Industria de la construcción -Cementantes hidráulicos- Especificaciones y métodos de ensayo.
- Raquel, L. C. (2006). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. *Publicación Técnica del IMT*. No. 292.
- Rivera A. L. y Castaño V. M. (2012). Corrosion analysis by electrochemical noise: A teaching approach. *Journal of Materials Education* 34, 151-160.
- Roberge, P. R. (2000). *Corrosion Maintenance through Inspection and Monitoring. Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill Editorial. United States of America.
- Rosas, O., Maya-Visuet, E. y Castañeda, H. (2014). Effect of chloride ions on the electrochemical performance of LDX 2003 alloy in concrete and simulated concrete-pore solutions. *Journal of Applied Electrochemistry* 44, 631-646.
- Smulko, J. M., Darowicki, K. y Zielinski, A. (2006). Evaluation of reinforcement corrosion rate in concrete structures by electrochemical noise measurements. *Russian Journal of Electrochemistry* 42, 546-550.
- Trocónis, O., Romero de Carruyo, A. y Andrade, C. (1997). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XV.B DURAR, 2a. Ed.
- Trocónis, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C. (2007), *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, 1ª Edición, Venezuela.
- Veleva, L., García-González A. y Pérez G. (2013). Cuantificación fractal de la corrosión de aluminio por picaduras inducida por el clima tropical húmedo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 65-72.