

Caracterización y comparación de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo determinada por ruido electroquímico y diferencia de espesor bajo la influencia de iones cloruro

Abel Castañeda y Francisco Corvo.*

Grupo de Protección de Materiales, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Apartado Postal 6414, Ciudad de La Habana, Cuba. Correo electrónico: abel.castaneda@cnic.edu.cu *Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de la Habana, Calzada de Zapata esquina a Calle G, El Vedado, Plaza de la Revolución, Código Postal 10400, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 8 de noviembre de 2007. Aceptado: 7 de febrero de 2008.

Palabras clave: velocidad de corrosión, ruido electroquímico, frecuencia, acero de refuerzo.

Key words: velocidad de corrosión, ruido electroquímico, frecuencia, acero de refuerzo.

RESUMEN. En Cuba, la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en presencia de iones cloruro se ha determinado generalmente de forma *in situ*. No se tiene referencia de que la técnica del ruido electroquímico se haya utilizado con anterioridad en la determinación y comparación de la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo. En este trabajo se compara la evaluación de la corrosión determinada por la técnica del ruido electroquímico en el dominio del tiempo y la frecuencia en aceros de refuerzo de probetas de hormigón armado preparado en tres relaciones agua/cemento y en dos condiciones de exposición. La medición directa de la velocidad de corrosión por diferencia de espesor es tomada como referencia. La velocidad de corrosión en el dominio de la frecuencia resultó más significativa en comparación con la determinada en el dominio del tiempo con respecto a la diferencia de espesor. Se confirma la existencia de corrosión localizada bajo la influencia de iones cloruro, en las señales del ruido de la corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia y en el índice de picadura, confirmada con la observación visual en los aceros de refuerzo. La condición de exposición a intemperie incide en que se produzca una mayor corrosión en el acero de refuerzo, en comparación con las condiciones de inmersión, debido a una mayor penetración de los agentes agresivos. Se confirma que al incrementar la relación agua/cemento en la dosificación del hormigón, aumenta la corrosión en el acero de refuerzo.

ABSTRACT. Reinforcement bar corrosion rate in presence of chlorides has been usually determined in Cuba on site. There are no reports about the previous use of this electrochemical noise technique in the determination and comparison of reinforcement bar corrosion rate. Reinforced concrete probes embedded on three ratio water/cement at two exposure conditions were evaluated using electrochemical noise on time and frequency domain. A comparison is made, where the direct measurements corrosion rate by thickness difference is taken a reference. Corrosion rate data on frequency domain is more significant than that one obtained on time domain respecting thickness difference. The existence of localized corrosion under the influence of chloride ions is confirmed on current signals on time and frequency domain and on pitting index, together with the visual observation. Outdoor exposure condition causes a higher corrosion rate on reinforced bar in comparison with immersion conditions due to an easier penetration of aggressive agents. It is confirmed that an increase in water/cement ratio causes an increase in corrosion rate.

INTRODUCCIÓN

La velocidad de corrosión en el acero de refuerzo del hormigón armado, se ha determinado generalmente en el ámbito nacional de forma *in situ*, sobre todo, en condiciones de agresividad corrosiva extrema. El litoral norte de Ciudad de La Habana ha sido un ejemplo de elevada agresividad; donde existe un gran número de estructuras dañadas por el fenómeno de la corrosión, debido a la influencia directa del aerosol marino, fuente principal de iones cloruro.¹ La velocidad de corrosión se ha determinado mediante equipos comerciales que aplican la técnica de resistencia de polarización, la cual emplea corriente directa.²

El tema de la determinación de la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo bajo la influencia de iones cloruro a nivel de laboratorio ha sido tratado haciendo uso de técnicas electroquímicas también de corriente directa y alterna, en probetas de hormigón armado.^{3,4} El hormigón se comporta como un sistema electrolítico a partir de la disolución presente en sus poros que da la posibilidad de medir la velocidad de corrosión.

Estas técnicas dependen de la aplicación de una polarización externa para determinar la velocidad de corrosión, la cual pudiera afectar el propio proceso de corrosión. Lo más esencial e importante que posee el análisis del ruido electroquímico es que a los electro-

dos de trabajo, en este caso, los aceros de refuerzo, no se les aplica dicha polarización para determinar la velocidad de corrosión.^{5,6}

No se tiene referencia alguna de que la técnica del ruido electroquímico se haya tenido en cuenta en la determinación de la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo en Cuba. Solo se conoce, un reporte de su uso en el aluminio anodizado sin haber determinado la velocidad de corrosión, así como otras variables que aporta esta técnica para la caracterización del fenómeno de la corrosión.⁷ Sin embargo, en el ámbito internacional se demuestran las posibilidades que ofrece esta técnica en la caracterización y comparación de la corrosión de diversos materiales metálicos y aleaciones con respecto a su sensibilidad a la corrosión generalizada o localizada, en condiciones ambientales atmosféricas,⁸⁻¹⁰ incluido el acero de refuerzo del hormigón armado bajo la influencia de iones cloruro.¹¹⁻¹⁴

La técnica del ruido electroquímico permite obtener la velocidad de corrosión en el dominio del tiempo y la frecuencia a partir de la resistencia del ruido, por lo que a diferencia de otras, se adquieren dos velocidades de corrosión.^{5,6} La resistencia del ruido obtenida de las fluctuaciones de corriente y potencial entre dos electrodos normalmente idénticos en el seno de una disolución electrolítica, es tomada como la resistencia de polarización. Normalmente la velocidad de corrosión se obtiene a partir de las señales del ruido en el dominio del tiempo.

El análisis espectral del ruido electroquímico en el dominio de la frecuencia es más complicado ya que resulta difícil obtener el ángulo fasorial en el plano complejo. En este caso, la resistencia del ruido que se toma también como resistencia de polarización para la determinación de la velocidad de corrosión, es la resistencia del ruido electroquímico de la impedancia.^{5,6} Las fluctuaciones de corriente y potencial son tomadas como densidades de potencias espectrales entre los dos electrodos normalmente idénticos. Esto hace que la velocidad de corrosión obtenida para ambos sistemas sea diferente.

Un aspecto importante que posee esta técnica a diferencia de otras, es la facilidad de identificar algunos tipos de corrosión de manera cuantitativa a partir de la determinación, por ejemplo, del índice de picadura en el dominio del tiempo y la frecuencia. Esta variable es función de la magnitud de la corriente que se intercambia entre los dos electrodos durante un intervalo de tiempo de un segundo. Si esta corriente intercambiada continúa por más de un segundo, entonces resulta la sumatoria de todas las corrientes del sistema.¹⁵

La confirmación de los resultados por vía electroquímica, utilizando una técnica tradicional de evaluación directa de la corrosión como la diferencia de espesor, es uno de los resultados fundamentales que se presenta. Mediante las técnicas electroquímicas se puede tener un seguimiento del proceso de corrosión en el tiempo y por variación de espesor el resultado total de la corrosión al final de la investigación, ya que se trata de un método directo de medición. Al combinar varias técnicas se tiene una mejor caracterización del fenómeno de la corrosión en el acero refuerzo.¹¹⁻¹⁴

El objetivo fundamental de este trabajo, consistió en determinar cuál de los dos tipos de análisis del ruido resulta más determinante en el comportamiento y medición de la velocidad de corrosión en el tiempo, bajo la influencia de iones cloruro en probetas de hormigón armado. La medición directa de la velocidad de corrosión por diferencia de espesor a partir del diámetro inicial y final de los refuerzos, es tomada como referencia.

Además, se puede identificar el tipo de corrosión que pudiera presentar el acero de refuerzo en el hormigón armado en presencia de iones cloruro. Esto último, a partir del comportamiento de la señal del ruido de la corriente y la determinación del índice de picadura, puede ser confirmado por su observación visual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración de las probetas

Se dosificaron seis probetas de hormigón armado de tres relaciones agua/cemento: 0,4, 0,5 y 0,6 en forma de paralelepípedos (8 cm x 8 cm x 31,5 cm) con dos aceros de refuerzo embebidos de 12 mm de diámetro inicial, colocados a una distancia de 1 cm uno del otro, con un área libre de 78,6 cm². El resto del área fue recubierta con pintura epoxi. El espesor del recubrimiento sobre el refuerzo fue de 2 cm. Se prepararon dos probetas por cada relación agua/cemento. Las probetas tuvieron un tiempo de curado de 28 d.¹⁶ El cemento utilizado fue P-350, además de un agregado grueso de 19 mm. El agregado fino que se empleó fue arena natural de río.

Ambientes a que fueron sometidas las probetas

Tres probetas, una de cada relación agua/cemento (a/c), fueron sometidas a condiciones atmosféricas a la intemperie, en una estación urbana de ensayo de baja contaminación. La estación seleccionada se caracteriza por poseer baja velocidad de deposición de iones cloruro y concentración de SO₂ (Tabla 1) según las especificaciones de la norma ISO 9223.¹⁷

El método utilizado en la determinación de la velocidad de deposición de iones cloruro fue el de la vela húmeda. La concentración de SO₂ se determinó mediante un equipo SO₂ Analyser Model 8850 (Alemania). La temperatura y la humedad se determinaron con un higrómetro Fisher.

Para evaluar el efecto del aerosol marino sobre el acero de refuerzo se aplicó una niebla salina de cloruro de sodio 3 %, durante seis días a la semana en horas de la mañana. Las probetas se colocaron acostadas sobre su lado más largo, durante 32 meses (de octubre de 2000 hasta agosto de 2003). La velocidad de deposición de iones cloruro obtenida del aerosol salino fue de 850 mg/(m² · d), lo que permitió garantizar condiciones de agresividad corrosiva extrema.¹⁸ Además, se registró la lluvia caída mediante un pluviómetro P-2.

Las tres probetas restantes se sumergieron en una misma disolución de cloruro de sodio 3 % a temperatura ambiente, simulando agua de mar, durante el mismo tiempo que las expuestas a la niebla salina.

Determinación de la velocidad de corrosión y el índice de picadura

Para obtener las señales de ruido de la corriente se tomaron 2 048 puntos a una velocidad de lectura de 0,5 s y se determinó la velocidad de corrosión (mA/cm²) a partir de la resistencia de ruido, tomada como la resistencia de polarización, calculada a partir del cociente entre la desviación estándar del ruido de potencial y la corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia; para analizar su comportamiento a tiempos de medición 1, 2, 3, 4, 6, 8, 22, 24, 25, 28, 32 meses para un total de 11 valores.

Las mediciones fueron ejecutadas con un equipo ACM Modelo Autofast DSP (UK) conectado a una computadora. El electrodo de referencia utilizado fue el de calomel saturado [KCl/Hg₂Cl₂(s), Hg]. Los dos aceros de refuerzo constituyeron los electrodos de trabajo.

Las probetas de hormigón armado fueron destruidas antes de realizar las mediciones del diámetro final de los aceros de refuerzo. Posteriormente, se le aplicó a cada refuerzo un tratamiento químico para eliminar los productos de corrosión. En este se aplicó mediante una disolución de H_2SO_4 20 % con 2 mL de formaldehído y 0,5 g de tiourea, a temperatura ambiente.¹⁹

Se realizaron 11 mediciones del diámetro final de los aceros de refuerzo mediante un micrómetro (0,1 μm de precisión) a una distancia de 2 cm a lo largo de los dos aceros de refuerzo, con lo que se obtuvieron 11 pares de valores del diámetro final. La velocidad de corrosión se determinó a partir de la expresión:

$$\Delta E = \frac{\text{Espesor inicial} - \text{Espesor final}}{\text{Tiempo de exposición}} \quad (\text{mm/año})$$

Se obtuvieron 11 valores de velocidad de corrosión por cada probeta de hormigón armado para realizar el análisis estadístico comparativo con los 11 valores de velocidad de corrosión (mm/año), obtenidos de la técnica del ruido electroquímico transformados a partir de la Ley de Faraday en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Para realizar la comparación se utilizó el programa estadístico Origin 6.0 tomando el nivel de significación $P < 0,05$.

Las señales del ruido de la corriente correspondientes al último mes de efectuada las mediciones se tomaron para determinar el índice de picadura, a través del cociente entre la desviación estándar del ruido de la corriente y la raíz media cuadrática de este misma variable:

$$I_p = \frac{Si}{I_{rms}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento y comparación de la velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión en el dominio del tiempo y la frecuencia son diferentes, pero siguen el mismo comportamiento en el tiempo para las dos condiciones de exposición (Figuras 1, 2, 3 y 4). Se confirma que esta diferencia se debe a que la resistencia del ruido en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, la cual es la resistencia del ruido electroquímico de la im-

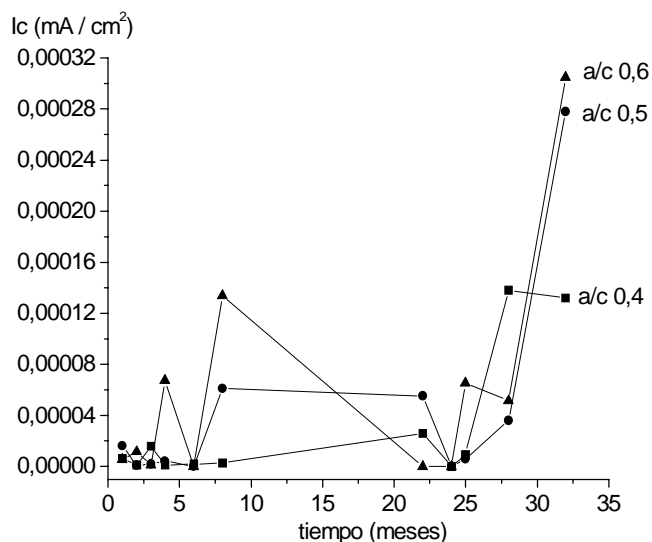


Fig. 1. Comportamiento de la velocidad de corrosión en el dominio del tiempo a la intemperie.

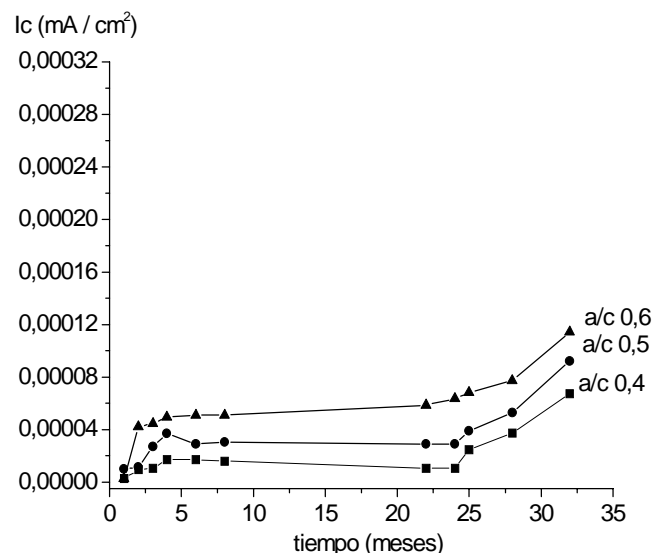


Fig. 2. Comportamiento de la velocidad de corrosión en el dominio del tiempo a inmersión.

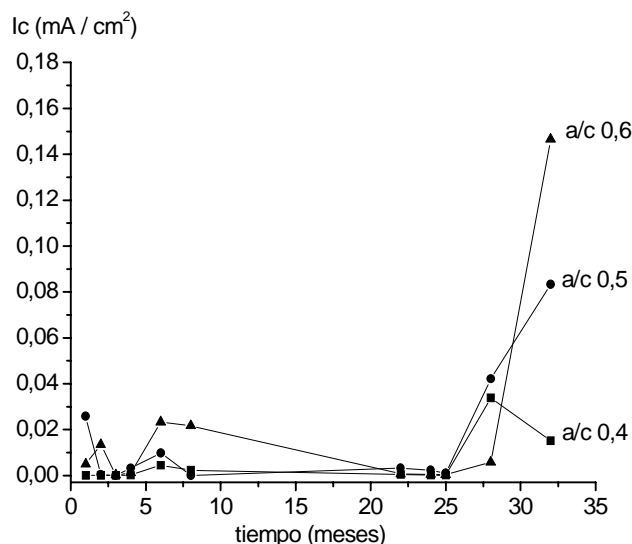


Fig. 3. Comportamiento de la velocidad de corrosión en el dominio de la frecuencia a la intemperie.

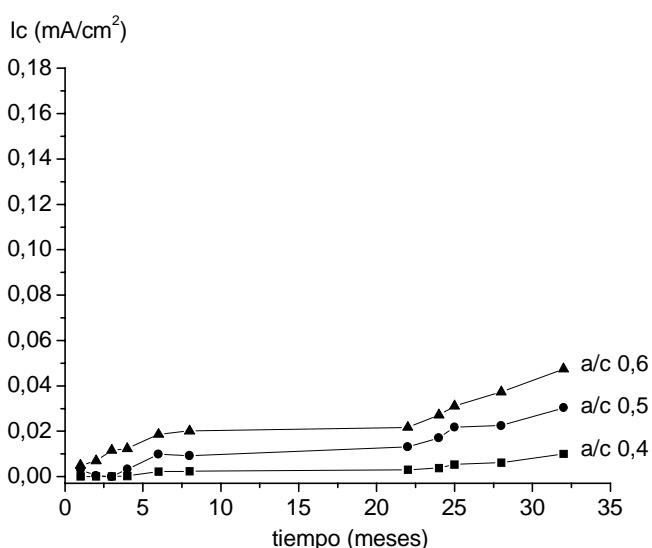


Fig. 4. Comportamiento de la velocidad de corrosión en el dominio de la frecuencia a inmersión.

pedancia, tomadas como la resistencia de polarización para el cálculo de la velocidad de corrosión fueron completamente diferentes.

La velocidad electroquímica de corrosión en el dominio del tiempo y la frecuencia resultan más variables en las probetas sometidas a condiciones de intemperie en comparación con las sometidas a inmersión para las tres relaciones agua/cemento (Figuras 1, 2, 3 y 4). Esto pudiera deberse a que en condiciones de intemperie hay fluctuaciones de temperatura y humedad relativa, períodos de presencia y ausencia de radiación solar que alternan en el tiempo, así como de lluvias y otras precipitaciones como el rocío y la niebla densa. Las probetas en este medio agresivo estuvieron bajo la influencia de un período lluvioso húmedo en el verano y un período seco en el invierno de acuerdo con los registros correspondientes de humedad relativa y temperatura (Tabla 1).

Este comportamiento es típico del clima tropical cubano. Es posible que el promedio de la cantidad de lluvia caída durante el tiempo de exposición de las probetas haya provocado un excesivo lavado de los iones cloruro en el interior del hormigón. De esta manera, disminuye considerablemente la velocidad de corrosión sobre todo, a los 6 y 24 meses en que la cantidad de lluvia promedio registrada fue de 159,5 y 148,6 mm respectivamente.²⁰

El aumento brusco de la velocidad de corrosión después de 25 meses de exposición, para la condición de exposición a la intemperie en las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 0,6; se debió al incremento de los ciclos de humectación y secado que se originan a partir de las fluctuaciones de temperatura y humedad que ocurren en el interior del hormigón. Este proceso da lugar a la formación de cloruros, hecho que facilita la entrada de los agentes agresivos debido a su carácter higroscópico. El oxígeno presente en la humedad penetra en los poros del hormigón hasta llegar a los refuerzos acelerando la corrosión, sobre todo, a elevadas relaciones agua/cemento. Esto es característico también en hormigones sometidos a condiciones de salpicaduras del agua de mar.

Al comparar los valores medios de velocidad de corrosión (Tabla 2), de manera general existe para los tres sistemas de medición la misma tendencia que cuando se aumenta la relación agua/cemento en el hormigón, se incrementa la velocidad de corrosión. El hecho de que la desviación estándar sea menor que el valor medio de la velocidad de corrosión para los dos sistemas electroquímicos de medición, como sucede para la diferencia de espesor; indica que la técnica de análisis del ruido electroquímico, pudiera ser usada en la determinación de la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo bajo la influencia de iones cloruro en el dominio del tiempo y la frecuencia. Además de confirmar que el comportamiento de la velocidad de corrosión aumente en función de la relación agua/cemento como sistema de estudio sea algo normal a una misma condición de exposición; así como que para la condición de exposición a la intemperie, la corrosión sea mayor para las tres relaciones agua/cemento (Tabla 2). En esta condición, los agentes agresivos, los iones cloruro y oxígeno, penetran con una mayor facilidad debido a que los poros presentan suficiente agua sin llegar a saturarse.²¹ Cuando el hormigón tiene los poros completamente saturados en agua como es el caso de las estructuras sumergidas en agua de mar, el oxígeno tiene mayor dificultad para llegar a los aceros de refuerzo, lo que provoca una menor corrosión. A ello se suma que en condiciones de inmersión existe una menor variación de la temperatura.

Al hacer una comparación estadística, a partir de un análisis de varianza entre los valores medios de velocidad de corrosión en una misma condición de medición, tomando como referencia la diferencia de espesor, el nivel de significación (P) obtenido resulta mayor que 0,05 para el ruido electroquímico en el dominio de la frecuencia (Tabla 3). Esto indica que no existen diferencias significativas entre la velocidad de corrosión en el dominio de la frecuencia con la diferencia de espesor. Todo lo contrario sucede para el ruido en el dominio del tiempo en el que al hacer la comparación, el P resulta

Tabla 1. Caracterización de la atmósfera correspondiente a la estación de ensayo.

Período de medición	Condiciones ambientales	Media	Máxima	Mínima
11/10/00-11/06/03	Humedad relativa (%)	73,8	98,1	35,5
	Temperatura (°C)	23,4	33,9	13,9
	Iones cloruro [mg/(m ² · d)]	0,048	0,091	0,026
	Dióxido de azufre [mg/(m ² · d)]	0,02	0,052	0,025

Tabla 2. Valores medios de velocidad de corrosión y desviación estándar.

Dominio en el tiempo						
Relación agua/cemento	Condición de exposición					
	Intemperie			Inmersión		
	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
Valor medio (mm/año)	3,513E-4	4,838E-4	6,750E-4	2,342E-4	4,058E-4	6,545E-4
Desviación estándar	1,778E-4	2,771E-4	3,137E-4	6,150E-5	7,597E-5	9,204E-5
Dominio en la frecuencia						
Valor medio (mm/año)	0,059	0,186	0,229	0,035	0,137	0,161
Desviación estándar	0,035	0,088	0,145	0,011	0,034	0,044
Diferencia de espesor						
Valor medio (mm/año)	0,259	0,449	0,779	0,171	0,218	0,265
Desviación estándar	0,032	0,107	0,265	0,012	0,034	0,191

Tabla 3. Valores de significación correspondientes al análisis de varianza.

Intemperie		
Relación agua/cemento	Ruido en el tiempo	Ruido en la frecuencia
0,4	6,994E-15	0,487
0,5	1,859E-13	0,245
0,6	6,916E-09	0,086
Inmersión		
0,4	2,220E-07	0,128
0,5	5,329E-15	0,550
0,6	2,143E-06	0,823

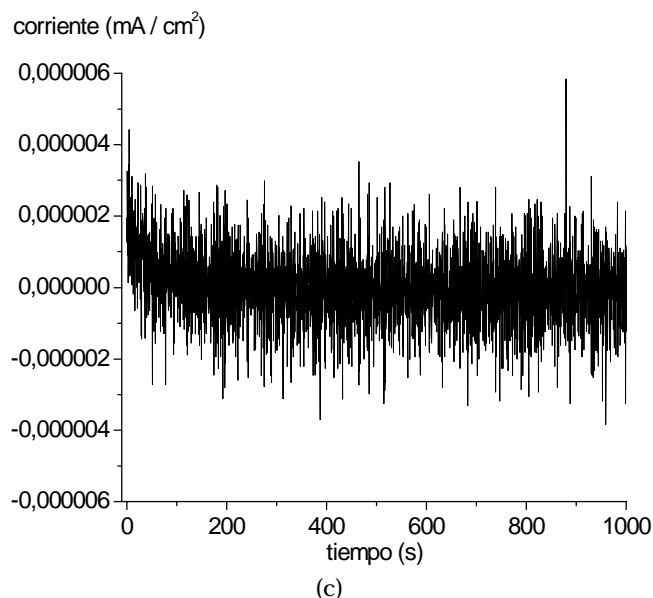
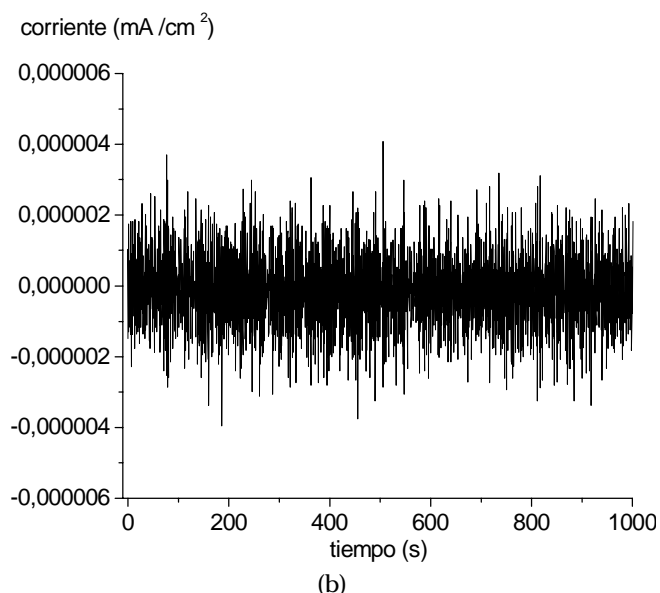
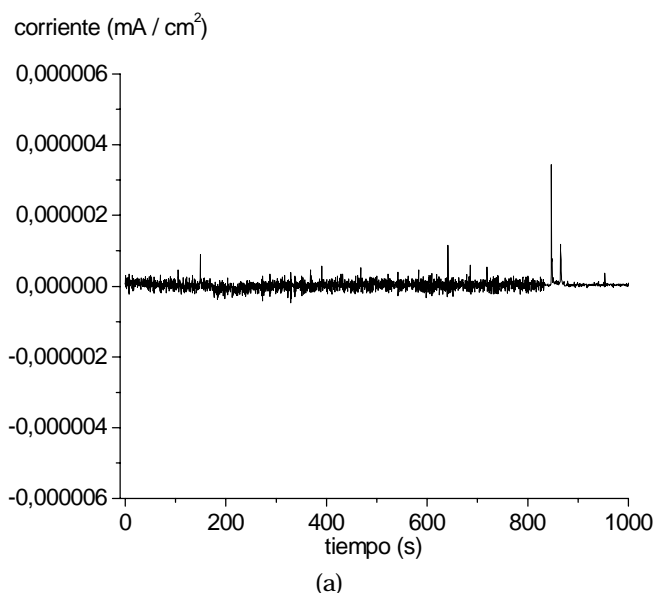
menor que 0,05. Los valores para este sistema son significativamente diferentes. Por lo tanto, la velocidad de corrosión obtenida en el dominio de la frecuencia resulta más representativa que la obtenida en el dominio del tiempo. Este resultado demuestra que la velocidad de corrosión determinada por la técnica del ruido electroquímico debe tenerse en cuenta no solo en el dominio del tiempo, sino también, en el dominio de la frecuencia. La velocidad de corrosión debe ser obtenida tomando la resistencia del ruido electroquímico de la impedancia como la resistencia de polarización, a pesar de que el análisis del ruido en el dominio de la frecuencia sea más complicado. Esta resistencia es normalmente obtenida a un intervalo de frecuencias de 0,001 a 1 Hz en el cual tienden a ocurrir los procesos de corrosión.

Comportamiento de las señales del ruido en el dominio del tiempo y la frecuencia

Las señales del ruido de la corriente en el dominio del tiempo demuestran la existencia de un mayor número de fluctuaciones de este indicador para la condición de exposición a la intemperie (Fig. 5 a, b, y c) con relación a la inmersión (Fig. 6 a, b y c) para las tres relaciones agua/cemento. Las fluctuaciones son provocadas por las variaciones a que ocurren los procesos continuos (eventos) de oxidación reducción que ocurren en la superficie entre los dos refuerzos.

Este comportamiento de las señales de corriente confirma una mayor presencia de los agentes agresivos (Cl^- , O_2) en la superficie de los aceros de refuerzo para la condición de exposición a la intemperie. Por otra parte, el resultado de las mediciones del ruido de la corriente en el dominio del tiempo demuestra la existencia de picos en toda la señal, de ahí, el mayor número de fluctuaciones. La presencia de estos picos indica que el proceso de corrosión es intenso y por otra parte, son más apreciables para la condición de exposición a la intemperie. Ellos evidencian además, los eventos de oxidación reducción que se producen en una zona específica de los refuerzos, siendo un indicador del carácter localizado de la corrosión.

Las señales del ruido de la corriente en el dominio de la frecuencia, presentan obviamente un comportamiento muy similar en comparación con el dominio del tiempo. Existe un mayor número de fluctuaciones de corriente también para la condición de exposición a la intemperie (Fig. 7 a, b y c) en comparación con la inmersión (Fig. 8 a, b y c). Para ambas condiciones de exposición un incremento en la relación agua/cemento implica un mayor número de fluctuaciones, lo que es también un indicador de una mayor corrosión.

**Fig. 5.** Señales de ruido de la corriente en el dominio del tiempo a la intemperie: a) 0,4; b) 0,5; c) 0,6.

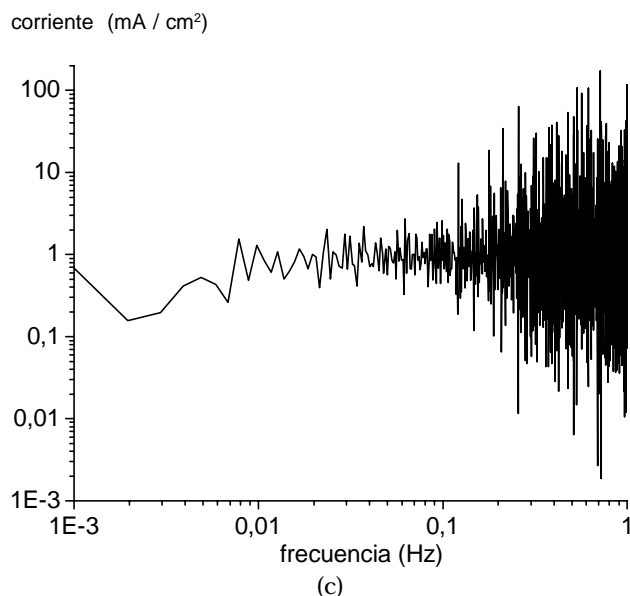
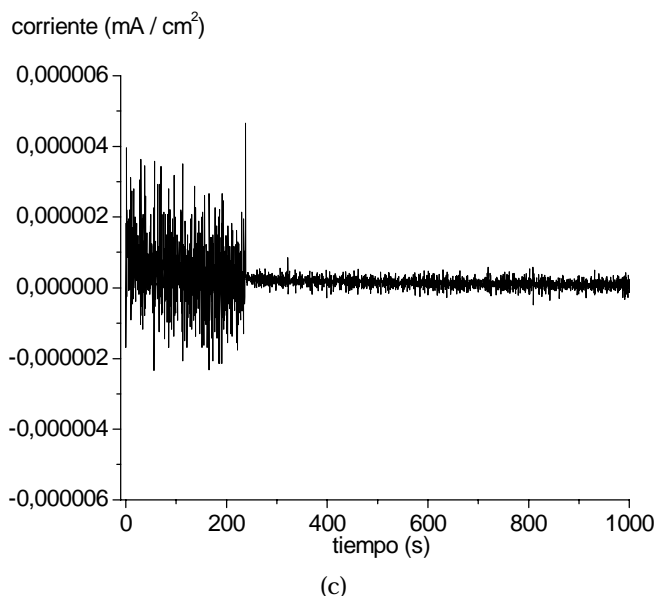
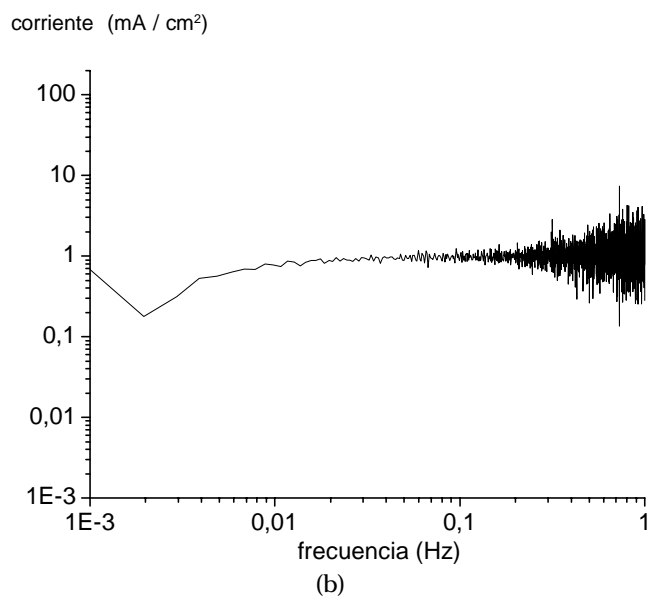
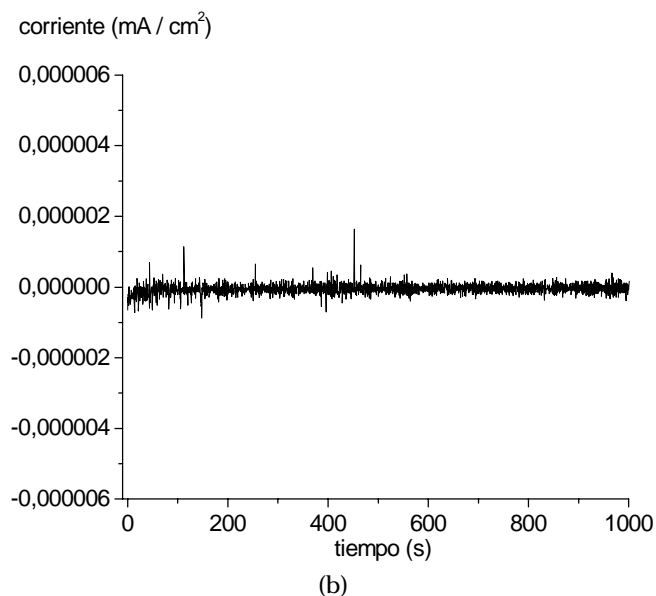
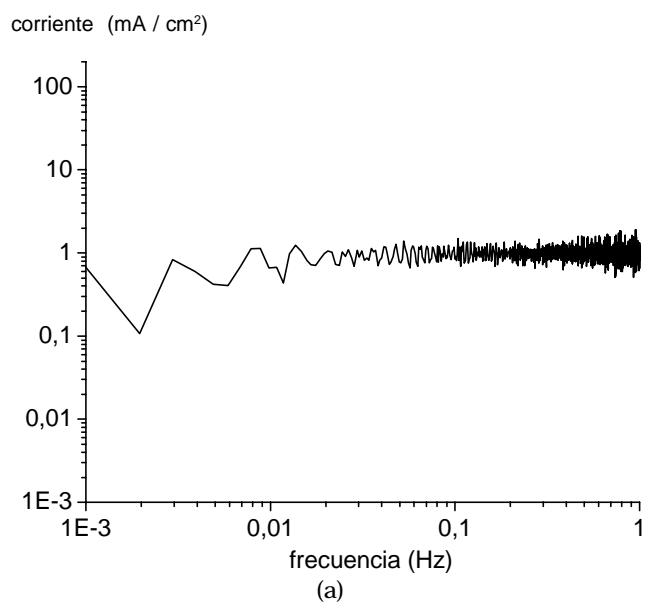
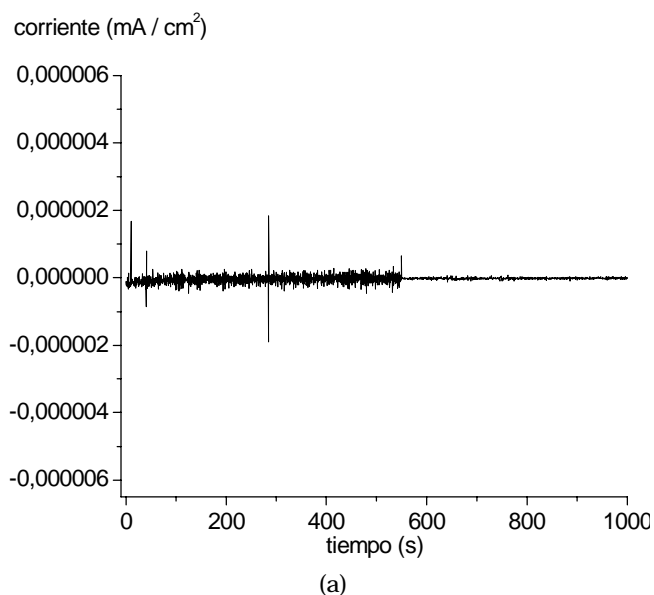


Fig. 6. Señales de ruido de la corriente en el dominio del tiempo a inmersión: a) 0,4; b) 0,5; c) 0,6.

Fig. 7. Señales de ruido de la corriente en el dominio de la frecuencia a la inmersión: a) 0,4; b) 0,5; c) 0,6.

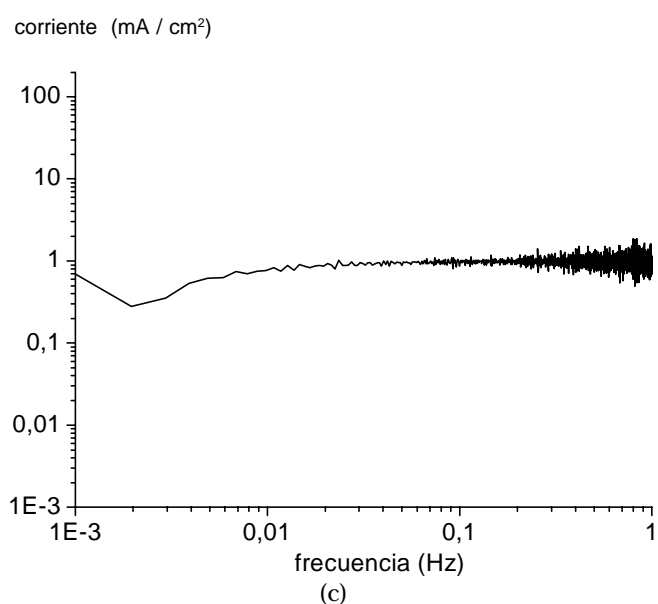
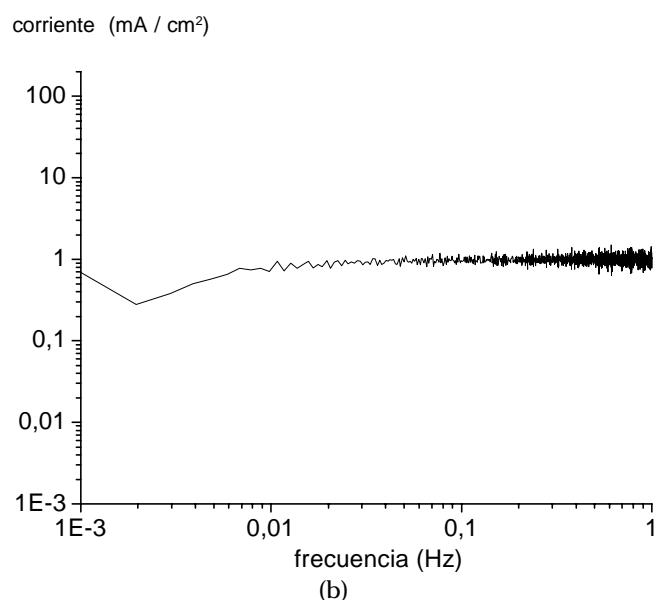
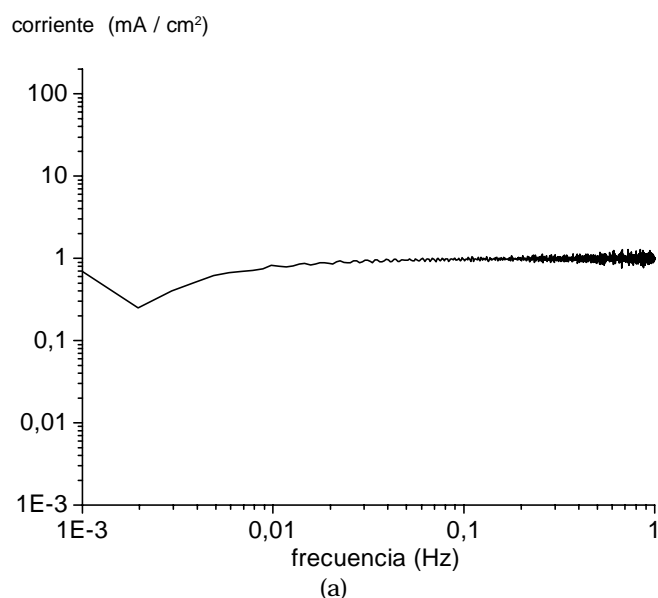


Fig. 8. Señales de ruido de la corriente en el dominio de la frecuencia a inmersión: a) 0,4; b) 0,5; c) 0,6.

Un aspecto interesante que ofrecen las señales de corriente en el dominio de la frecuencia a diferencia de las señales en el tiempo, es que el mayor número de fluctuaciones, es decir, la aparición de los picos ocurre en el intervalo de frecuencia de 0,1 a 1 Hz. Esto es característico del mecanismo de corrosión localizada que pudiera presentarse en el acero de refuerzo, ya que los eventos de oxidación reducción ocurren en zonas específicas para las tres relaciones agua/cemento y las dos condiciones de exposición.

Índice de picadura

A partir de las señales del ruido de la corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia, se determinó el índice de picadura, cuya magnitud (Tabla 4) está dentro del intervalo que caracteriza a la corrosión localizada ($0,1 < I_p < 1$).

La observación visual de la zona sin recubrir con pintura epoxi permite confirmar el tipo de corrosión que ocurre en el acero de refuerzo bajo la influencia de iones cloruro a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición. Se aprecia cómo la corrosión presenta un carácter localizado, pero de gran extensión (Fig. 9), es decir la corrosión electroquímica en el acero de refuerzo ocurre de acuerdo con un mecanismo heterogéneo que se basa en la existencia de zonas anódicas y catódicas definidas de extensión apreciable. Esto facilitó la medición del diámetro final para obtener la velocidad de corrosión tomada como referencia en el análisis estadístico, a pesar de la existencia de corrosión localizada. El método gravimétrico pudiera resultar más preciso. Es de observar además, la presencia de cráteres (huecos) en la superficie de los refuerzos de las zonas afectadas. Por lo tanto, existe una buena concordancia entre la observación visual y el índice de picadura calculado. La observación visual permite confirmar dos cuestiones fundamentales analizadas. La primera es que el grado de corrosión en los aceros de refuerzo aumenta con el incremento de la relación agua/cemento para una misma condición de exposición (Fig. 9). Esto confirma que existe una mayor penetración de los agentes agresivos a medida que se incrementa este indicador. Por otra parte, el grado de corrosión es mayor a la intemperie, confirmando que para este medio de exposición existe una mayor facilidad de penetración de los agentes agresivos no siendo así, para la condición de exposición bajo inmersión. La segunda cuestión es que la observación visual ratifica que el comportamiento que presentaron las señales del ruido de la corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia es típico de la corrosión localizada.

CONCLUSIONES

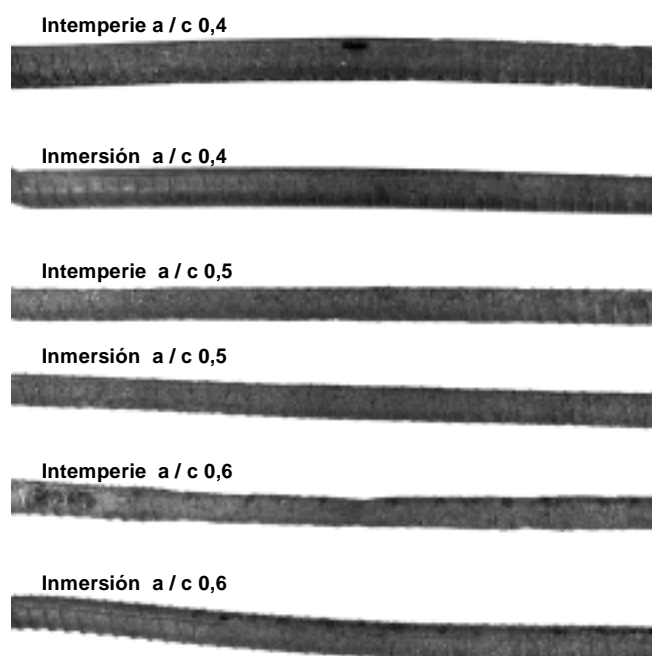
La velocidad de corrosión en el dominio de la frecuencia resulta más significativa que la determinada en el dominio del tiempo, tomando como referencia la medida directa de la velocidad de corrosión a partir de la diferencia de espesor.

Ha sido confirmada la ocurrencia de corrosión localizada bajo la influencia de iones cloruro en los aceros de refuerzo del hormigón por las señales del ruido de la corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia, así como por el índice de picadura y corroborada por observación visual.

Ha quedado demostrado que la exposición a la intemperie determina una mayor corrosión en el acero de refuerzo del hormigón armado que en condiciones de inmersión, debido a la mayor penetración

Tabla 4. Índices de picadura en el dominio del tiempo y la frecuencia.

0,001 < Ip < 0,01 Corrosión generalizada		
0,01 < Ip < 0,1 Corrosión mixta		
0,1 < Ip < 1 Corrosión localizada		
Ip > 1 Inicio de la picadura		
Intemperie		
Relación agua/cemento	Ruido en el tiempo	Ruido en la frecuencia
0,4	0,691	0,225
0,5	0,704	0,459
0,6	0,707	0,952
Inmersión		
0,4	0,661	0,112
0,5	0,671	0,132
0,6	0,687	0,176

**Fig. 9.** Observación visual de los aceros de refuerzos.

de los agentes agresivos en el hormigón en tales circunstancias.

Ha sido confirmando que al incrementar la relación agua/cemento en la dosificación del hormigón, aumenta la corrosión en el acero de refuerzo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Castañeda A., Corvo F. y Rivero C. Influencia de la agresividad atmosférica en el deterioro de las estructuras en Ciudad de La Habana. IX Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Ciudad de La Habana, 9 al 13 de octubre de 2006.
2. Genezcá J. Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión. Capítulo 4. Primera Jornada sobre Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión. XVI Congreso Sociedad Mexicana Electroquímica. Queretaro, 23 de mayo de 2001.
3. Castañeda A., Corvo F. y Meitín J. Determinación de la velocidad de corrosión en la barra de refuerzo del hormigón armado mediante técnicas electroquímicas. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, 3, 147-151, 2004.
4. Castañeda A., Corvo F., O'Reilly V. Comparación entre el pronóstico de corrosión basado en la medición de potenciales y la determinación de la velocidad de corrosión de la barra de refuerzo mediante técnicas electroquímicas. **Rev. Materiales de Construcción**, Madrid. Edición Especial, 271-272, 155-162, 2003.
5. Cottis R.A. Interpretations of electrochemicals noise data. **Corrosion**, 57, 265-285, 2001.
6. Pistorius P.C. Design aspects of electrochemical noise measurements for uncoated metals: electrode size and sampling rate. **Corrosion**, 53, 273-283, 2003.
7. Betancourt N., Corvo F., Mendoza A., Simancas J., Morcillo M., González J.A., Fragata F., Pena J.J., De Villalaz M.S., Flores S., Almeida E., Rivero S., De Rincon O. Electrochemical noise evaluation of anodized aluminium. Comparative study against corrosion behaviour in the atmosphere. **Rev. Metal., Volumen extraordinario**, 38-42, 2003.
8. Cuevas-Arteaga C. and Porcayo-Calderón J. Electrochemical noise analysis in the frequency domain and determination of corrosion rates for SS-304 stainless steel. **Rev. Materials Science and Engineering**, 34, 439-446, 2006.
9. Sánchez-Amaya J.M., Cottis R.A. and Botana F.J. Shot noise and statistical parameters for the estimation of corrosion mechanisms. **Corrosion Science**, 47, 3280-3299, 2005.
10. Espada L., Sanjurjo M., Urrejola S., Bouzada F., Rey G. y Sanchez A. Ventajas del análisis Wavelet sobre el análisis de Fourier para la interpretación del ruido electroquímico. **Rev. Metal., Volumen extraordinario**, 72-79, 2003.
11. Mendoza D., Almeraya F., Rivera J. and Uruchurtu J. Guard ring and electrochemical noise employment in the evaluation of the steel concrete system. **Rev. Portugaliae Electrochimica Acta**, 22, 305-320, 2004.
12. Legat A., Leban M. and Bajt . Corrosion processes of steel in concrete characterized by means of electrochemical noise. **Rev. Electrochimica Acta**, 49, 2741-2751, 2004.
13. Miranda J.M., González J.A., Cobo A. and Otero E. Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. **Corrosion Science**, 48, 2172-2188, 2006.
14. Nieves D., Almeraya F. y Uruchurtu J. Evaluación del acero de refuerzo de concretos expuestos en NaCl al 3,5 %, mediante ruido electroquímico. Congreso Latinoamericano de Corrosión, Santiago de Chile, Chile, 365-371, 20 al 24 de octubre de 2003.
15. Shi A. Electrochemical Noise, acquisition, analysis and applications, <http://www4.esm.psu.edu/people/faculty/shaw/Electrochemical%20Noise.ppt>. (Consultado: 18 de marzo de 2004.)
16. O'Reilly V. Métodos para dosificar mezclas en hormigones. Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, Cuba, 12-56, 1990.
17. ISO-9223: Corrosion of metal and alloys. Clasification of aggressivity of the atmosphere, 1992.
18. Corvo F., Minotas J., Delgado J. and Arroyave C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. **Corrosion Science**, 47, 883-892, 2005.
19. Champion F.A. Ensayos de Corrosión, Ediciones URMO, España, Cap. 7, 216-224, 1960.
20. Castañeda A. y Corvo F. Cambios en la velocidad de corrosión en dependencia del régimen de lluvia. Congreso Latinoamericano de Corrosión, Santiago de Chile, Chile, 424-430, 20 al 24 de octubre de 2003.
21. Castañeda A., Díaz N., Corvo F. y González E. Influencia de la penetración de iones cloruro en el hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, 36, No. Especial, CQ21, 2005.