



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

COMPORTAMIENTO POR CORROSION DE SENSORES GALVANICOS (ACERO AL CARBONO /ACERO INOXIDABLE) EMBEBIDOS EN CONCRETO REFORZADO MEDIANTE TECNICAS ELCTROQUIMICAS

J.L. Pérez-Díaz¹, D. Hernández-Cruz¹, J.A. Figueroa-Gallegos¹, C. Gaona-Tiburcio², F.M. Almeraya-Calderón²

1 Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez, km 1081, Colina Universitaria, C.P. 29020. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

2 Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Departamento de Física de Materiales/Grupo Corrosión, Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, C.P. 31109. Chihuahua, Chihuahua. México.

RESUMEN

El objetivo principal fue la evaluación por corrosión del sistema de sensores galvánicos (acero al carbono/acero inoxidable) embebidos en vigas de concreto reforzado expuestas a dos ambientes: Agua potable (blanco) y Salmuera (sol. NaCl al 5%) durante 18 meses mediante el sistema de macroceldas de corrosión, potenciales de corrosión y ruido electroquímico. El concreto fue elaborado con una relación agua/cemento (a/c) de 0.40 y 0.60. Las vigas de 20x17x30 cm., se elaboraron con varillas corrugadas de acero al carbono de 3/8" de diámetro, así como estribos de acero al carbono de 1/4" de diámetro. El monitoreo del riesgo por corrosión del sistema se realizó midiendo los voltajes y corrientes de macroceldas, y los potenciales a circuito abierto mediante un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, la cinética de corrosión mediante ruido electroquímico empleando un Potenciostato/Galvanostato SOLARTRON 1285. Los resultados del comportamiento por corrosión para ambos sistemas estuvieron acorde con los ambientes empleados, presentando mayor probabilidad de corrosión en las vigas inmersas en salmuera con mayor relación a/c, y los resultados con ruido electroquímico demuestran corrosión uniforme o mixta en el sistema de sensores, alcanzando el sistema un estado de pasivación. El desempeño de los sensores fue útil para el análisis del riesgo por corrosión del sistema en correlación con las técnicas electroquímicas, los resultados con ruido electroquímico respaldan la información.

Palabras claves: Concreto reforzado, relación a/c, potencial a circuito abierto, macrocelda, ruido electroquímico.

ABSTRACT

The objective of this research is the evaluation on the performance of corrosion systems of galvanic (carbon steel/stainless Steel) sensors embedded in reinforced concrete beams exposed to two different media: Potable Water (white) and saline solution (5 % NaCl) for 18 months period. The techniques used to measure the corrosion level were corrosion macrocells, corrosion potential and electrochemical noise. The concrete beams were prepared with a 0.40 and 0.60 water/cement (w/c) ratio respectively, and their dimensions were 20 x 17 x 30 cm, and 3/8" carbon steel corrugated bars and 1/4" carbon steel stirrups were used. The monitoring was carried out measuring the macrocell voltage and current, while the potential at open circuit was measured using a reference electrode Cu/CuSO₄. Plus, the corrosion kinetic by electrochemical noise was measured using a SOLARTRON 1285 Potentiostat/Galvanostat. The results from both media systems (water and saline solution) were as expected, showing higher corrosion probability on the beams immersed in saline solution and with higher w/c ratio. While the electrochemical noise results show a uniform corrosion or mixed along the sensor, taking the system into a passivated state. The performance of the sensors were crucial in the analysis of the corrosion risk in correlation with the electrochemical techniques, the electrochemical noise supports the results this investigation.

Keywords: Reinforced concrete, water/concrete ration, open circuit potential, macrocell, electrochemical noise.

INTRODUCCION

La corrosión del acero de refuerzo por la presencia de cloruros en el concreto genera el deterioro de las estructuras expuestas a ambientes salinos, poniendo en riesgo su funcionalidad y seguridad, reduciendo la durabilidad esperada. Por otro lado esto ocasiona considerables costos de mantenimiento o en su caso el riesgo de la pérdida total de la estructura. Los sensores galvánicos se han venido empleando desde 1990 como método preventivo contra el ataque de agentes agresivos principalmente para una gran variedad de estructuras marinas, los cuales monitorean el riesgo por corrosión del acero de refuerzo, mejorando la predicción de la vida de servicio. No obstante aún faltan evaluaciones y resultados con aplicaciones prácticas con otros tipos de materiales empleados como sensores, bajo otras condiciones diferentes de estudio, donde puedan esperarse valores limites relevantes^{1, 2, 3}. La corrosión galvánica es también conocida como macrocelda de corrosión (Figura 1), los potenciales y corrientes son medidos de la actividad entre un ánodo que se corroe y un cátodo pasivo. Aquí la corriente registrada es una medida solamente de la parte de corrosión causada por el proceso de reducción del cátodo, no considerando la propia corrosión del ánodo (microceldas de corrosión)⁴.

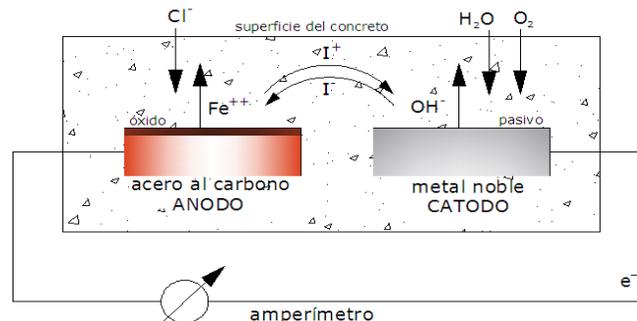
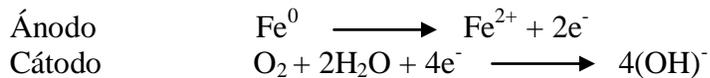


Figura 1. Macrocella de corrosión

La corriente galvánica o de macrocelda es generada por la diferencia de potencial natural de dos materiales disímiles, uno que funciona como ánodo, lugar donde se desarrolla la corrosión por lo cual debe ser de un material vulnerable a la corrosión, y el otro que funcione como cátodo donde se lleva a cabo el proceso de reducción. Para que se lleve a cabo la corrosión electroquímica es necesario que ocurran estos dos procesos, las reacciones principales son las siguientes:



El proceso de corrosión en el ánodo también involucra ambas reacciones pero aquí la corriente anódica es mayor que la corriente catódica, en el cátodo la corriente catódica es mayor que la anódica, con lo cual se conforma la macrocelda de corrosión. Los factores que influyen en el funcionamiento de una macrocelda de corrosión en el concreto, como el diseño en la forma geométrica y tamaño de los sensores, la posición y colocación dentro de la zona de recubrimiento, así como la separación entre ánodos y cátodos pueden ocasionar el aumento o disminución en valores de corriente galvánica⁵, para este estudio los principales factores examinados que influenciaron en la señal de corrientes de macrocelda fueron la relación de áreas entre ánodo/cátodo, las distancias de separación y altura con respecto al nivel de inmersión de los ambientes a las que fueron expuestos. Las variables como la calidad del concreto, el recubrimiento del acero de refuerzo, el monitoreo de potenciales y corrientes de macrocelda de los electrodos del sensor, son importantes para investigar y determinar el mecanismo de corrosión del sistema⁶ y probar que esta técnica se puede utilizar como método alternativo de monitoreo del riesgo por corrosión dentro del concreto⁷.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales para el diseño de la mezcla

Los materiales empleados para la elaboración de las vigas fue a base de cemento Pórtland ordinario (CPO 30R), grava triturada con tamaño máximo de agregado de 19mm (3/4”), agregado fino con módulo de finura de 2.71. La relación agua-cemento fue de 0.60 y 0.40 con respecto al peso del cemento (Tabla 1), colado bajo la norma Mexicana C-159 y curado bajo agua durante 28 días para alcanzar su máxima resistencia teórica⁸.

Tabla 1. Dosificación del concreto ((kg/m³concreto)/proporción)

<i>Mezcla</i>	<i>Cemento</i>	<i>Agua</i>	<i>Grava</i>	<i>Arena</i>	<i>Aditivo</i>
a/c 0.60	324	209	1035	765	Sin Aditivos
a/c 0.40	513	209	1035	606	Sin Aditivos

Sistema de sensores

Los sensores fueron diseñados como celda galvánica consistiendo de acero al carbono (ánodos “A1”, “A2”) y electrodos de acero inoxidable (cátodos “C”), estos fueron aislados de la armadura con mangueras tipo industrial a excepción del acero de referencia (AR) que tiene contacto eléctrico con la armadura, para la conexión entre electrodos se utilizó alambres de cobre conectados a los ánodos y cátodo con salida al exterior de la viga dispuestos a formar un circuito

corto. La sujeción del sensor sobre la armadura se realizó mediante corbatillas de plástico. La relación de áreas entre ánodo/cátodo es de 1:10, correspondiente a 4cm² para cada ánodo y de 40cm² para el cátodo. El área del cátodo tiene que ser mayor debido a que las áreas correspondientes de 1:1 generan bajas corrientes galvánicas, sobre todo para electrodos de acero inoxidable, por lo tanto no serían apropiados para detectar el daño por corrosión del acero en concreto⁹. La geometría del sensor y su posición en la zona de recubrimiento dentro de la viga se muestra en la Figura 2. El material anódico usado en esta investigación corresponde a un acero 1017 (UNS G10170) de la misma composición que la armadura, el cátodo de un acero inoxidable austenítico tipo 304 (UNS S30400)¹⁰, ver Tabla 2. El análisis de la composición química de elementos del sensor se realizó preparando muestras de 3 grs. del material anódico y catódico realizándose una digestión ácida en el microondas marca CEM modelo MDS-200, donde se aplicó el método STILL que consistió en la preparación de 0.5 grs. de cada muestra con HCl, HNO₃, HF y HBO₃, la cual posteriormente se filtró y aforó antes de hacer el análisis o lectura de elementos por Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-OES) modelo IRIS-AP, Espectrofotometría de Absorción Atómica (FAA) modelo AVANTA SIGMA y Analizador Elemental modelo EA-1110¹¹, los resultados se muestran en la Tabla 2. Cada arreglo de sensores fue probado por continuidad eléctrica antes y después de ser embebidos mediante un circuito corto externo.

Tabla 2. Composición química de los elementos del sensor

<i>Elementos (%)</i> peso	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Co</i>
Acero al carbono	0.041	0.027	0.198	0.429	----	0.021	0.02	Bal	0.021	----	0.014
Acero inoxidable	17.864	7.719	0.072	2.003	0.484	0.032	0.045	Bal	0.356	0.595	0.101

Diseño de la viga con sensores embebidos

Las vigas de concreto armado con dimensiones de 17x20x30cm fueron preparadas con una armadura de varillas de acero al carbono de 3/8” de diámetro y estribos de acero al carbono (alambrón) de 1/4” de diámetro sujetadas con alambre de amarre de acero recocido. Dos sensores fueron embebidos por cada viga (cara 1, ánodo A1) y (cara 2, ánodo A2), ambas con 3 cm de recubrimiento, sumergidas a una distancia del nivel de agua (NA) y salmuera (NS) a 8(A1) cm y 22(A2) cm. La armadura fue embebida con un recubrimiento de concreto de 3.5cm en ambas caras de 20X30 cm expuestas a la penetración de cloruros, las otras cuatro caras laterales de 17X20cm y 17X30cm se recubrieron con un pulido de cemento y de impermeabilizante asfáltico base solvente, para evitar la penetración de cloruros en estos lados.

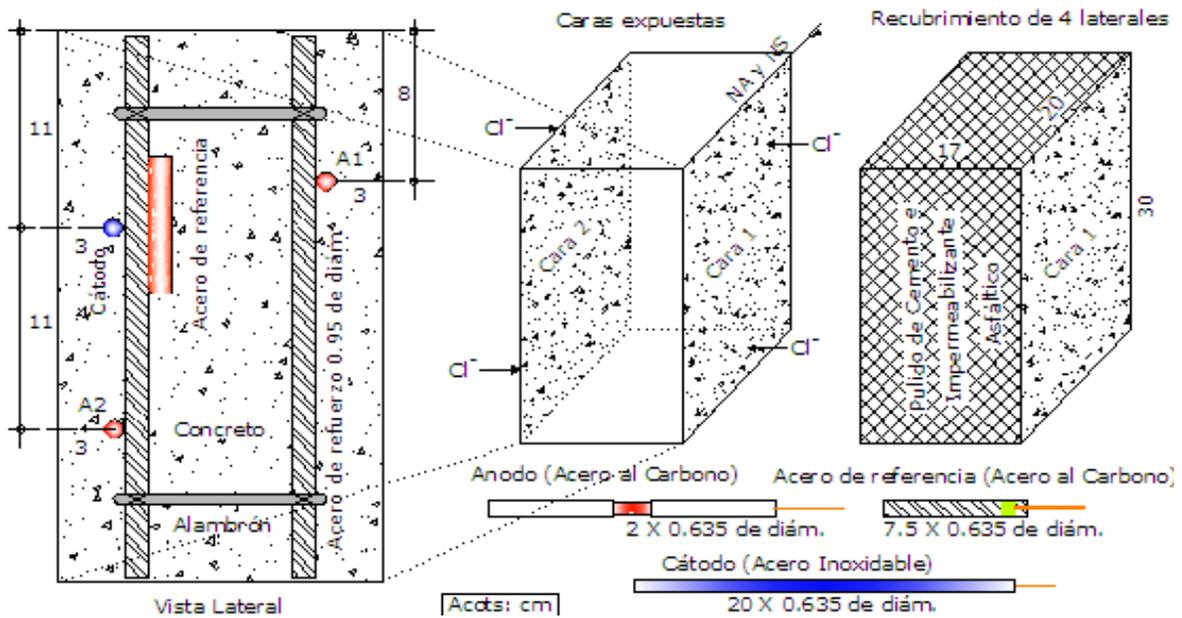


Figura 2. Tamaño y forma de los especímenes de concreto armado y sensores galvánicos

Procedimiento del ensayo y monitoreo con técnicas electroquímicas

Las probetas estuvieron inmersas durante 18 meses en dos ambientes: Agua Potable (blanco) y en una solución de NaCl al 5% (Salmuera) para acelerar la corrosión del sistema. Las vigas expuestas en Salmuera corresponden de igual forma como las expuestas en Agua Potable, una con relación a/c de 0.60 y otra de relación a/c de 0.40. El monitoreo de las probetas se realizó empleando un Multímetro de alta impedancia FLUKE 87 III, midiendo las señales de potenciales y corriente de macrocelda generadas dentro del concreto mediante un circuito corto externo, así como los potenciales de corrosión empleando un electrodo de referencia externo de Cobre-Sulfato de Cobre (Cu/CuSO₄)(Figura 3).



Figura 3. Monitoreo del sistema con multímetro y electrodo de referencia Cu/CuSO₄

La estimación del efecto de los cloruros sobre los sensores y acero de refuerzo dentro del concreto se realizó con pruebas de ruido electroquímico empleando un Potenciostato/Galvanostato SOLARTRON 1285, la cual permite la detección y evaluación del comportamiento de la corrosión general y localizada¹², durante 9 meses a partir del mes 10 hasta el mes 18. El arreglo del monitoreo se presenta en la figura 4.

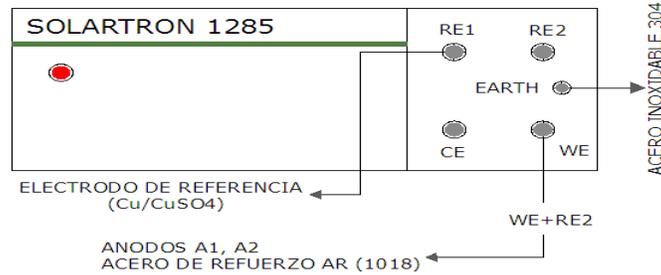


Figura 4. Arreglo para monitoreo del Potencial y Corriente en el tiempo

RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Potenciales y corrientes de macrocelda, potenciales de corrosión del sistema

El análisis de las gráficas obtenido de cada espécimen se realizó de acuerdo con los criterios establecidos de la norma ASTM C 876-91¹³, tanto para los potenciales de corrosión con respecto al Cu/CuSO₄ como los potenciales de macrocelda con respecto al Acero Inoxidable embebido estableciendo una correlación con base a sus potenciales para electrodos de referencia con respecto al electrodo normal de hidrógeno (NHE), ver Tabla 3. El análisis de corriente de macrocelda se realizó con base a la literatura encontrada, dado que todavía no existen estudios estandarizados de los niveles de corriente relevantes que nos indique el riesgo por corrosión en cierto sistema.

Tabla 3. Interpretación norma ASTM C 876-91, potenciales de corrosión con Cu/CuSO₄ y Acero Inoxidable

Potenciales de corrosión (E_{corr})	Voltajes de macrocelda (V_{corr})	Riesgo de daño (%)
< -200	< -95	10% de probabilidad de corrosión
-200 a -350	-95 a -166	Cierta incertidumbre
> -350	> -166	90% de probabilidad de corrosión

Se monitoreó los potenciales y corrientes individuales de los ánodos (A1,A2) y acero de referencia con respecto al cátodo, los potenciales de corrosión con respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO₄ utilizó las mismas varillas de refuerzo (AR), ánodos (A1, A2) y cátodos (C) del sensor como electrodo de trabajo (Figura 5).

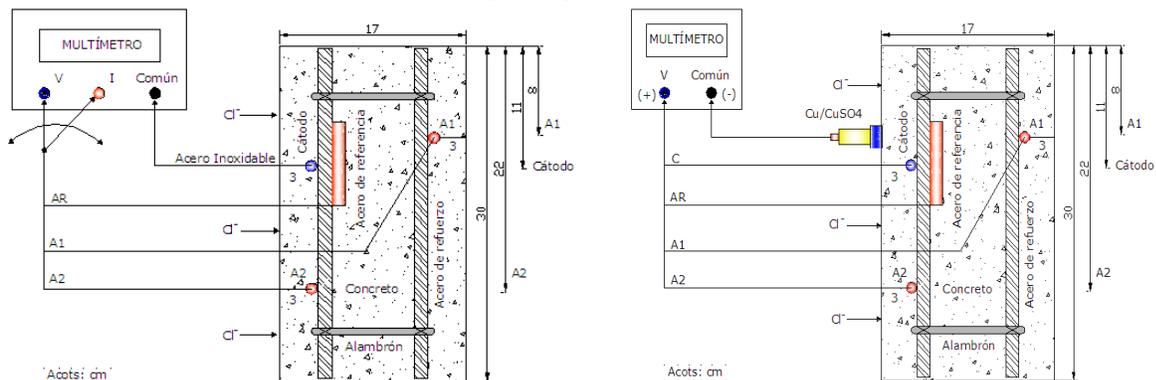


Figura 5. Monitoreo de Voltajes, Corrientes de Macrocelda y Potenciales de Corrosión

Potenciales y corrientes de macrocelda para los ánodos (A1, A2) y armadura (AR):

En las probetas con relación a/c 0.40 los potenciales de macrocelda estuvieron debajo de -95mV (agua potable) y de -300 a -400mV la expuesta en salmuera a partir del séptimo mes (Figura 6a). Las corrientes de macrocelda fueron de 0 a 0.3 μA para las vigas expuestas en agua potable y de 3 a 9 μA la expuesta en salmuera (Figura 6b). En las probetas con relación a/c 0.60 los voltajes de macrocelda estuvieron debajo de -95mV (agua potable) y entre -166mV a -450mV la expuesta en salmuera (Figura 7a). Las corrientes de macrocelda fueron de 0 a 0.3 μA para las expuestas en agua potable y de 3 a 14 μA los primeros tres meses de exposición, disminuyendo gradualmente hasta conservarse entre 3 y 7 μA para las expuestas en salmuera (Figura 7b).

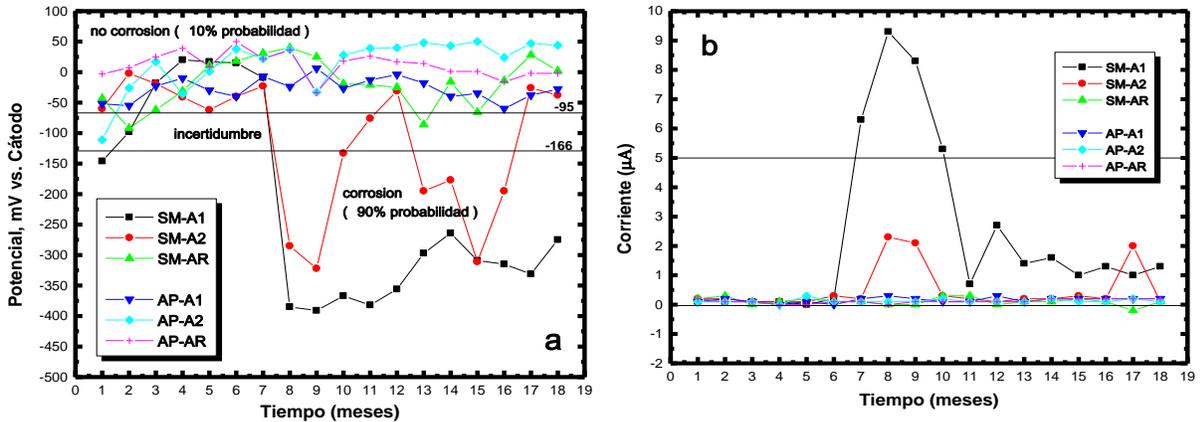


Figura 6. Vigas expuestas en Agua Potable y Salmuera con relación a/c: 0.40

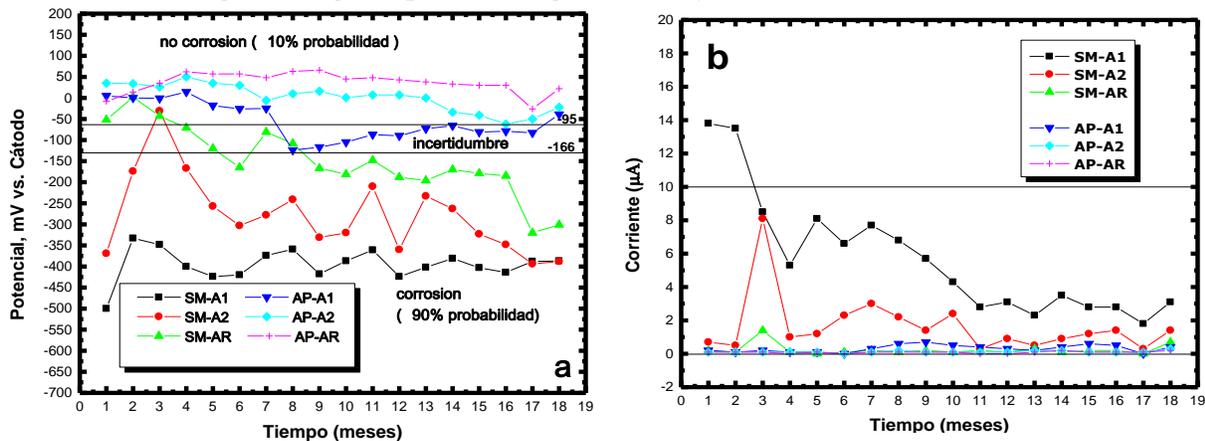


Figura 7. Vigas expuestas en Agua Potable y Salmuera con relación a/c: 0.60

Potenciales de corrosión para ánodos (A1-A2) y armadura (AR):

En las probetas con relación agua-cemento a/c 0.40, los potenciales de corrosión variaron con valores debajo de -200mV (viga en agua potable) y hasta -600mV a partir del mes séptimo de la viga expuesta en salmuera (Figura 8a). Los potenciales de corrosión para las probetas con relación agua-cemento a/c 0.60 variaron con valores menores a -200mV para las probetas en agua potable, y de -350mV a -700mV en la vigas expuestas en salmuera (Figura 8b).

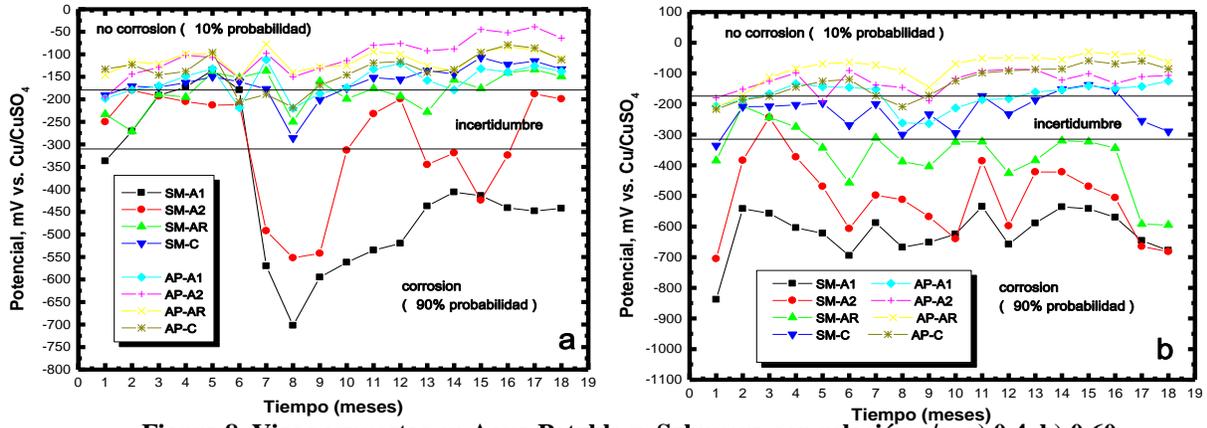


Figura 8. Vigas expuestas en Agua Potable y Salmuera con relación a/c: a) 0.4, b) 0.60

Corrientes de macrocelda conforme al nivel de inmersión

Los sensores a 8cm (A1) con respecto al nivel de inmersión presentaron corrientes de macrocelda mas elevadas hasta de $9\mu\text{A}$ y $14\mu\text{A}$ (con respecto al ánodo: $2.25\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $3.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$) para vigas de mejor y menos calidad del concreto. La activación del sensor a mayor profundidad de 22cm (A2) los valores de corrientes de macrocelda resultaron menores hasta un tercio de los valores máximos encontrados (Figura 9), debido a que a mayor profundidad la difusión de oxígeno es más lenta y por lo tanto disminuye la actividad de corrosión, actualmente se conoce que aún sin la presencia de oxígeno, otras reacciones de reducción dentro del concreto aseguran su desarrollo¹⁴. Estos valores son similares con otros autores ($15\mu\text{A}$ y de $16\mu\text{A}$), bajo condiciones diferentes de ensayo, materiales, diseños y arreglos geométricos del sistema^{2,15}.

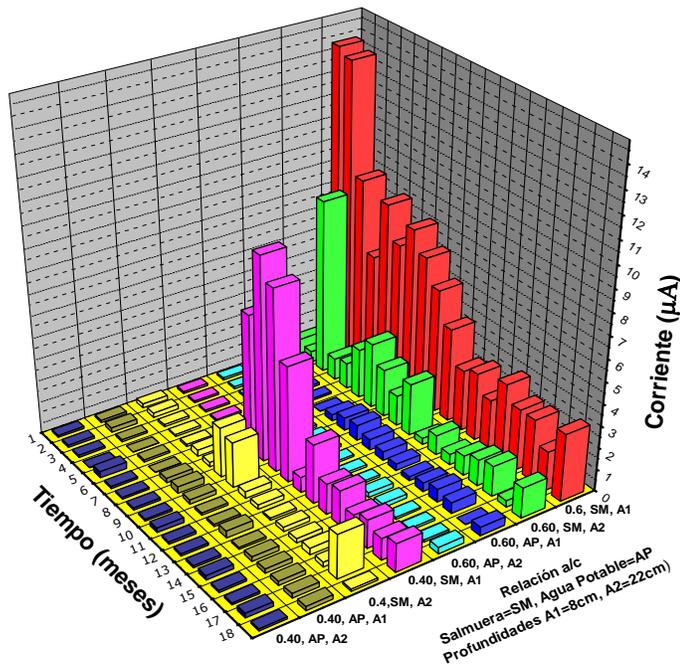


Figura 9. Corrientes de macrocelda a profundidades de 8cms y 22cm

Ruido Electroquímico (Rn)

Las probetas expuestas en salmuera son las que tienen un mayor riesgo por corrosión para ambas relación agua-cemento se realizó mediciones con ruido electroquímico para los electrodos más externos (A1, A6) y el acero de refuerzo (AR) que de acuerdo al análisis estadístico de datos se tienen los siguientes resultados, para los meses 9 y 18 de exposición (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados con ruido electroquímico para los meses 9 y 18, en electrodos A1, A6 y AR de probetas de relación a/c=0.40 y 0.60 expuestos en salmuera

RELACIÓ N (a/c)	ELECTRODO S- MES	Rn	Icorr	Nivel de corrosión	PSDpo t	Tipo de corrosión	PSDcor r	Tipo de corrosión	Vcorr (mm/año)
0.40	A1-9	0.715	0.036	DESPRECIABL	-2.3	UNIFORM	-1.6	UNIFORM	0.0004
		5	3	E					
0.40	A6-9	2.372	0.011	DESPRECIABL	-2.7	UNIFORM	-3.9	UNIFORM	0.0001
		8	0	E					
0.40	AR-9	0.040	0.640	ELEVADA	-2.3	UNIFORM	-2.1	UNIFORM	0.0070
		6	3	E					
0.60	A1-9	0.861	0.030	DESPRECIABL	-1.7	UNIFORM	-2.5	UNIFORM	0.0003
		5	2	E					
0.60	A6-9	0.156	0.166	MODERADA	-2.2	UNIFORM	-2.5	UNIFORM	0.0018
		2	4	E					
0.60	AR-9	0.073	0.355	MODERADA	-1.9	UNIFORM	-4.2	UNIFORM	0.0040
		2	1	E					
0.40	A1-18	1.304	0.019	DESPRECIABL	-2.9	UNIFORM	-3.9	UNIFORM	0.0002
		3	9	E					
0.40	A6-18	2.535	0.010	DESPRECIABL	-2.0	UNIFORM	-1.3	UNIFORM	0.0001
		3	3	E					
0.40	AR-18	0.009	2.791	MUY ELEVADA	-2.2	UNIFORM	-0.7	PAS-UNIF	0.0307
		3	4	E					
0.60	A1-18	1.367	0.019	DESPRECIABL	-3.4	UNIFORM	-3.2	UNIFORM	0.0002
		0	0	E					
0.60	A6-18	1.633	0.015	DESPRECIABL	-3.4	UNIFORM	-2.3	UNIFORM	0.0001
		4	9	E					
0.60	AR-18	0.061	0.419	MODERADA	-1.6	UNIFORM	-4.3	UNIFORM	0.0046
		9	7	E					

Dada la nula activación del sensor de agua potable, solo presentamos los resultados de las vigas expuestas el salmuera para asegurar que estas si presentaron corrosión por cloruros. Se tomaron lecturas de Potenciales (E) y corriente (I) con 1024 pts., a 1 pto./seg. En general las series de potencial y corriente con el tiempo (Figura 10) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con transitorios escasos demostrando del análisis visual un tipo de corrosión generalizada.

Las densidades espectrales del potencial en los sensores y acero de refuerzo en general durante los 9 meses de monitoreo presentaron pendientes del orden (-1.72 a - 3.76) para las vigas de mejor calidad. Los espectros de frecuencia en corriente para las vigas de mejor calidad presentaron pendientes del orden de (-0.63 a -4.92) y para las de menos calidad (-0.43 y -3.26), estos valores en función de la pendiente de las densidades espectrales de frecuencia corresponden a un tipo de corrosión uniforme y de pasivación-uniforme¹⁶ (Figuras 11,12).

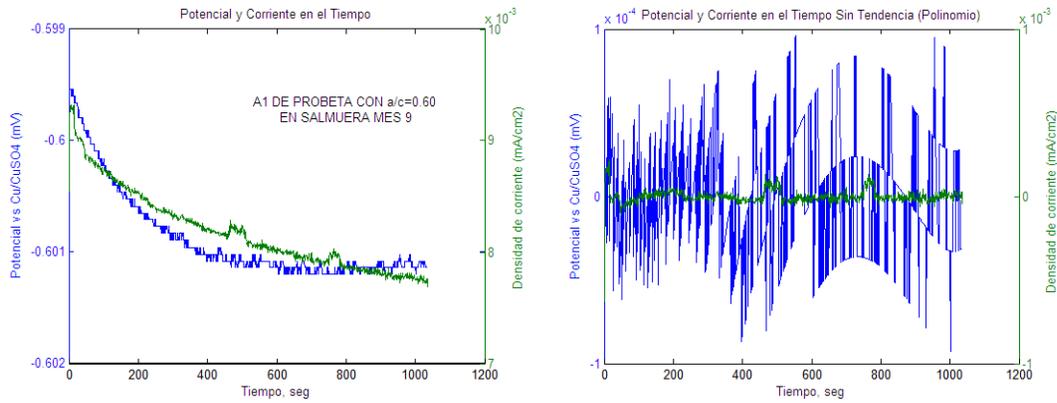


Figura 10. Serie de tiempo, obtenidos del sensor (A1) en concreto de baja calidad mes 09, con tendencia (izquierda), sin tendencia (derecha)

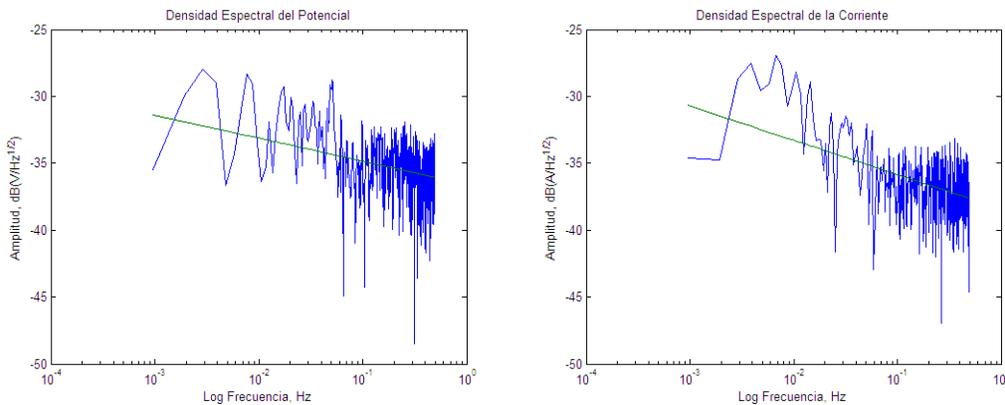


Figura 11. Densidades espectrales, registro de potenciales y corriente en el tiempo, sensor (A1), concreto de baja calidad en el mes 09

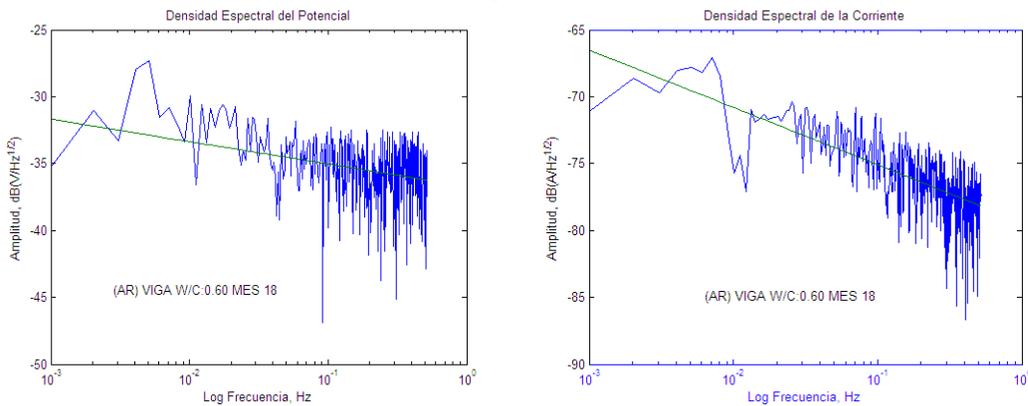


Figura 12. Densidades espectrales, registro de potenciales y corriente en el tiempo, acero de refuerzo (AR), concreto de baja calidad, mes 18

Las velocidades de corrosión del acero de refuerzo de nivel moderado ($2.5 \mu\text{m/año}$) vigas de buena calidad, y de nivel moderado del orden $2.5 \mu\text{m/año}$ a nivel alto ($20 \mu\text{m/año}$) para vigas de menos calidad en los meses 17 y 18. Los sensores presentaron niveles de corrosión relativamente muy altos del orden de $20 \mu\text{m/año}$ hasta $200 \mu\text{m/año}$ en ambas calidades del concreto y representa la posible influencia de la relación de áreas de los electrodos del sensor y el espacio circundante (Figura 13), que de acuerdo con el análisis estadístico esta velocidad de corrosión alta representa la pasivación del sistema y no de alguna activación por cloruros.

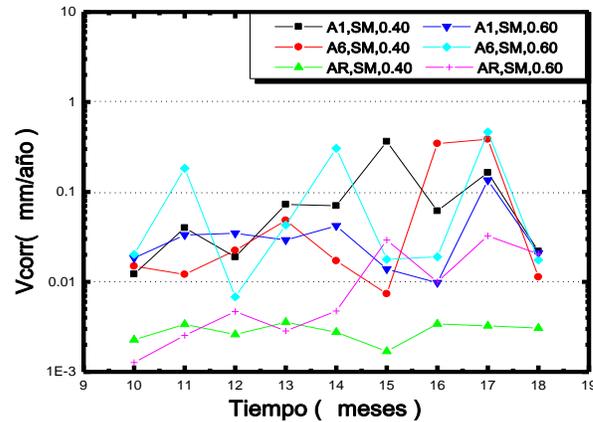


Figura 13. Velocidades de corrosión del acero de refuerzo y sensores para ambas calidades del concreto

CONCLUSIONES

- ✓ Los potenciales de macrocelda del sensor acero al carbono/ acero inoxidable presentó muy buena correlación con respecto a los potenciales de corrosión con Cu/CuSO₄, obteniendo un comportamiento aceptable recomendable para la detección del daño por corrosión del acero de refuerzo.
- ✓ Las corrientes de macrocelda para las vigas expuestas en salmuera presentaron valores mayores para las de menor calidad que las de buena calidad, esto se debe a que los concretos más densos son más tardados para llevar a cabo el flujo de corriente iónica. Los vigas expuestas en agua potable tuvieron casi valores nulos en corriente para ambas calidades del concreto, por lo tanto sin ninguna señal del sistema.
- ✓ La información obtenida con la técnica de ruido electroquímico, demuestra que las vigas tienen corrosión uniforme o mixta sobre al acero de refuerzo y sensores, por la pasivación del sistema durante el tiempo de exposición, excepto para la viga de menor calidad que presenta en los meses 17 y 18 indicios de corrosión más altos pero sin presentar corrosión localizada por cloruros.
- ✓ La utilización de técnicas electroquímicas como los potenciales a circuito abierto son de gran ayuda para evaluar el funcionamiento de sensores de macroceldas embebidos en concreto reforzado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Conacyt, al Cimav, Cementos Chihuahua y la UNACH-FI en el financiamiento y apoyo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Schiessl P. y Raupach M. "Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures". In: Concrete International, (1992), pp. 52-55.
- [2] Raupach M. y Schiebl P. "Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures", NDT&E International 34,6 (2001), pp. 435-442.
- [3] McCarter W.J., Chrisp T.M., Butler A. y Basheer P.A.M. "Near-Surface Sensors for Condition Monitoring of Cover-Zone Concrete", Construction and Building Materials 15, (2001), pp. 115-124.
- [4] McCarter W.J. y Vennesland O. "Sensor systems for use in reinforced concrete structures", Construction and Building Materials 18, (2004), pp. 351-358.
- [5] Arya C. y Vassie O. "Influence of cathode-to-anode area ratio and separation distance on galvanic corrosion currents of steel in concrete containing chlorides", Cement and Concrete Research 25, (1995), pp. 989-998.
- [6] Raupach M. y Dauberschmidt C. "Durability of marine structures made of high-performance concrete", RILEM Proceedings (2003), PRO 32 International Conference on Advances in Concrete and Structures 2, (2003), pp. 919-930.
- [7] Raupach M. "Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences", Construction and Building Materials 10, (1996), pp. 329-338.
- [8] Kosmatka S. y Panarese W. Diseño y control de mezclas de concreto, Instituto Mexicano del Cemento A.C., 13 edición, ISBN-968-464-074-9, 1992, México.
- [9] Zinc-Taek P., Yoon-Seok C., Jung-Gu K. y Lun C. "Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of steel embedded in concrete structure", Cement and Concrete Research 18, (2005), pp. 1814-1819.
- [10] ASM HANDBOOK. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, (1990), Vol. 1, USA.
- [11] PROCEDIMIENTO LAQ03. Determinación del contenido de Al, C, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Si, Ti y Zn, de aceros al carbono y aceros inoxidable por ICP-AAE y CHNS-O, CIMAV-EMA, BAJO NORMA ISO/IEC-17025-2005, (2005), Méx.
- [12] Dawson J.L. (2005). Electrochemical noise measurement. In: Kearns JR, Scully JR, editors. Electrochemical noise measurement for corrosion applications, ASTM STP 1277. Annual Book of ASTM Standards, pp. 3.
- [13] ASTM C876-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
- [14] Alonso, C., Andrade, C. and García A.M. "The role of oxygen in the kinetic of the corrosion of reinforcements". In: Proceedings of Eurocorr'98. (1998).
- [15] Elsener, B. "Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring". Cement & Concrete Composites 24, (2002), pp. 65-72.
- [16] Legat y Dolecek. Corrosion Science (Houston). Vol 51, No. 4, 1995.