

## EVALUACION DE MACROCELAS DE CORROSION EMBEBIDOS EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO BAJO AMBIENTE SALINO

### Evaluation of corrosion macrocells embedded in reinforced concrete beams in saline environment base

#### RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de la evaluación electroquímica de vigas de concreto armado expuestas en solución de NaCl al 5% y en Agua Potable durante 18 meses. El concreto fue elaborado con relaciones agua-cemento de 0.40 y 0.60. La evaluación se realizó empleando macroceldas de corrosión, potenciales a circuito abierto y ruido electroquímico. En los resultados se presentaron valores de mayor probabilidad de corrosión en los especímenes inmersos en salmuera con mayor relación agua-cemento, encontrándose el sistema pasivado. Las macroceldas fueron muy útiles como apoyo a la evaluación con técnicas electroquímicas.

**PALABRAS CLAVES:** Acero, concreto, macrocelda, potencial de corrosión, relación a/c, ruido electroquímico.

#### ABSTRACT

*In this work, corrosion of reinforcing steel in concrete beams exposed to two environments was evaluated. The two environments used were: drinking water (white) and salt water (5% NaCl sol.) for 18-months. The concrete had a water/cement ratio of 0.40 and 0.60, respectively. Monitoring was carried out by measuring macrocell voltage and current, with open-circuit potentials and electrochemical noise. The results presented more probability of corrosion in beams immersed in salt water with higher water/cement ratios and reaching the system a state of passivation. The macrocells were very useful for analyzing the corrosion system and correlated electrochemical techniques.*

**KEYWORDS:** Reinforcing steel, concrete, macrocell, corrosion potential, w/c ratio, electrochemical noise.

#### JOSE LUIS PÉREZ

Ingeniero Civil, M.Sc.  
Estudiante de doctorado  
CIMAV S.C.  
[jose.perez@cimav.edu.mx](mailto:jose.perez@cimav.edu.mx)

#### CITLALLI GAONA

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.  
Investigador Titular "B"  
CIMAV S.C.  
[citlalli.gaona@cimav.edu.mx](mailto:citlalli.gaona@cimav.edu.mx)

#### FACUNDO ALMERAYA

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.  
Investigador Titular "C"  
CIMAV S.C.  
[facundo.almeraya@cimav.edu.mx](mailto:facundo.almeraya@cimav.edu.mx)

#### ALBERTO MARTÍNEZ

Físico-Matemático, Ph.D.  
Jefe de División Titular "D"  
CIMAV S.C.  
[martinez.villafane@cimav.edu.mx](mailto:martinez.villafane@cimav.edu.mx)

#### JORGE GARCÍA

Ingeniero Civil, M.Sc.  
Estudiante de doctorado  
CIMAV S.C.  
[jorge.garcia@cimav.edu.mx](mailto:jorge.garcia@cimav.edu.mx)

#### LEONEL LÓPEZ

Ingeniero Civil, M.Sc.  
Estudiante de doctorado  
CIMAV S.C.  
[leonel.lopez@cimav.edu.mx](mailto:leonel.lopez@cimav.edu.mx)

## 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo por cloruros es uno de los procesos más predominantes que sufren las estructuras de concreto expuestas principalmente en ambientes marinos, poniendo en riesgo la seguridad y funcionalidad de las mismas, afectando su *durabilidad*. La utilización de sensores embebidos en la zona de recubrimiento del acero de refuerzo es importante para el cálculo del tiempo de vida útil y predicción de la vida de servicio residual de las estructuras [2]. Los sistemas de monitoreo con sensores de macroceldas permiten determinar el tiempo de corrosión en la zona de recubrimiento y el comportamiento de la corrosión del acero de refuerzo después de iniciada la corrosión [3].

Para lograr lo último es necesario el estudio bajo otras condiciones especiales como: diferente composición del concreto en ambiente sumergido, donde pueden obtenerse valores límites relevantes [4]. Por lo tanto se diseñaron sistemas de macroceldas en vigas de concreto armado, las cuales se analizaron en conjunto con técnicas electroquímicas para estudiar la utilidad de estas nuevas técnicas de monitoreo bajo ambiente sumergido [5].

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales para el diseño de las vigas y sensores

La elaboración de las vigas de 17x20x30cm fue a base de cemento Portland Ordinario (CPC 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 teórica [5]. La armadura fue de varillas de acero al carbono de 3/8" de diámetro y estribos de acero al carbono (alambrión) de 1/4" de diámetro. Se utilizaron sensores de 20cm de largo los cuales constan de una escalera de ánodos [1-6], acero de referencia y un cátodo de acero inoxidable, siendo los dos primeros de acero al carbono igual que el refuerzo de la armadura. Estos fueron elaborados con materiales económicos empleando soportes metálicos y grapas perro para sujetar los ánodos, manguera tipo industrial para el aislado de ánodos, cátodo y los alambres de cobre con la armadura, excepto el acero de referencia que tiene contacto eléctrico, pintura de aceite para protección de la escalera, y corbatillas de plástico para la sujeción del sensor sobre la armadura los cuales fueron probados por continuidad antes de ser embebidos en concreto (Fig. 1, 2, 3).

| Mezcla   | Cemento | Agua | Grava | Arena | Aditivo     |
|----------|---------|------|-------|-------|-------------|
| a/c 0.60 | 324     | 209  | 1035  | 765   | Sin-Aditivo |
| a/c 0.40 | 513     | 209  | 1035  | 606   | SinAditivo  |

Tabla 1. Dosificación de concreto ((kg/m<sup>3</sup>)/proporción)

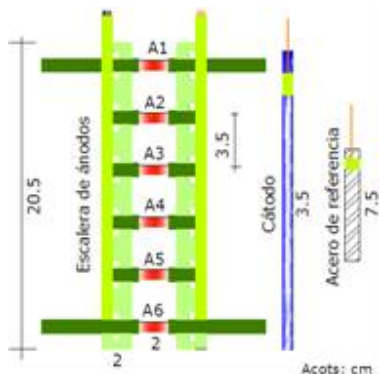


Figura 1. Forma y tamaño de un sensor (macrocela)

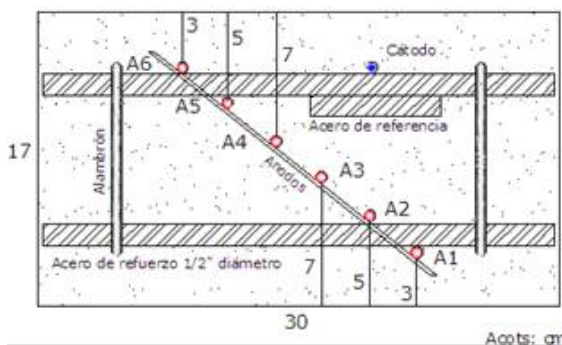


Figura 2. Viga con armadura y sensor (macrocela)



Figura 3. Revisión de la continuidad del sistema antes de ser embebido en concreto.

**2.2 Procedimiento del ensayo y monitoreo**

Las probetas estuvieron inmersas en dos ambientes: agua potable (blanco) y en una solución de NaCl al 5% (salmuera) durante 18 meses para acelerar la corrosión del sistema. Se colocaron 4 probetas de relación a/c de 0.40 y 4 de 0.60 para cada ambiente, considerándose para el análisis por corrosión en este artículo 1 probeta de relación a/c de 0.40 y 1 de 0.60, de cada ambiente. El monitoreo se realizó empleando un Multímetro de alta impedancia FLUKE 87 III, midiendo las señales de corriente y voltajes 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/CuSO<sub>4</sub>); para el monitoreo con ruido electroquímico se empleó un potencióstato/galvanostato SOLARTRON 1285.

Para análisis del sistema se adecuó la norma ASTM C 876-91 [7] al electrodo de referencia embebido de Acero Inoxidable. Se estableció una correlación con base a sus diferencias de potenciales de referencia entre electrodos de referencia de +316mV para Cu/CuSO<sub>4</sub> y +150mV para acero inoxidable con respecto al electrodo normal de hidrógeno NHE (McCarter y Vennesland, 2004), ver Tablas 2 y 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 que nos indique el riesgo por corrosión en cierto sistema.

| Potencial de corrosión (E <sub>corr</sub> ) | Riesgo de daño                   |
|---|----------------------------------|
| < -200                                      | 10% de probabilidad de corrosión |
| -200 a -350                                 | Cierta incertidumbre             |
| > -350                                      | 90% de probabilidad de corrosión |

Tabla 2. Interpretación de resultados norma ASTM C 876-91

| Potencial de macrocelda(E <sub>corr</sub> ) | Riesgo de daño                   |
|---|----------------------------------|
| < -95                                       | 10% de probabilidad de corrosión |
| -95 a -166                                  | Cierta incertidumbre             |
| > -166                                      | 90% de probabilidad de corrosión |

Tabla 3. Adaptación de norma ASTM C 876-91 para interpretación de resultados con electrodo de referencia Acero Inoxidable.

**2.3 Mediciones de voltajes y corrientes de macrocelda (A1-A6) y armadura (AR)**

Fueron medidos los voltajes y corrientes individuales de cada ánodo y acero de referencia con respecto al cátodo de acero inoxidable. En las probetas con relación a/c=0.40 los voltajes de macrocelda estuvieron debajo de -95mV (agua potable) y de -400mV la expuesta en salmuera a partir del séptimo mes (Figuras 4a, 5a). Las corrientes de macrocelda fueron de 0 a 0.3 µA para la probeta expuesto en agua potable y de 3 a 9 µA la expuesta en salmuera (Figuras 4b, 5b).

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 (Figuras 6a, 7a). Las corrientes de macrocelda fueron de 0 a 0.3 µA para las probetas expuestas en agua potable y de 3 a 16µA los primeros tres meses de exposición, disminuyendo gradualmente hasta conservarse entre 3 y 7 µA para la expuesta en salmuera (Figuras 6b, 7b).

**2.4 Potenciales a circuito abierto y Ruido electroquímico para ánodos (A1-A6) y armadura (AR)**

Para 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 (Figuras 4c, 5c). 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 entre -350mV y -700mV en la viga expuesta en salmuera (Figuras 6c, 7c).

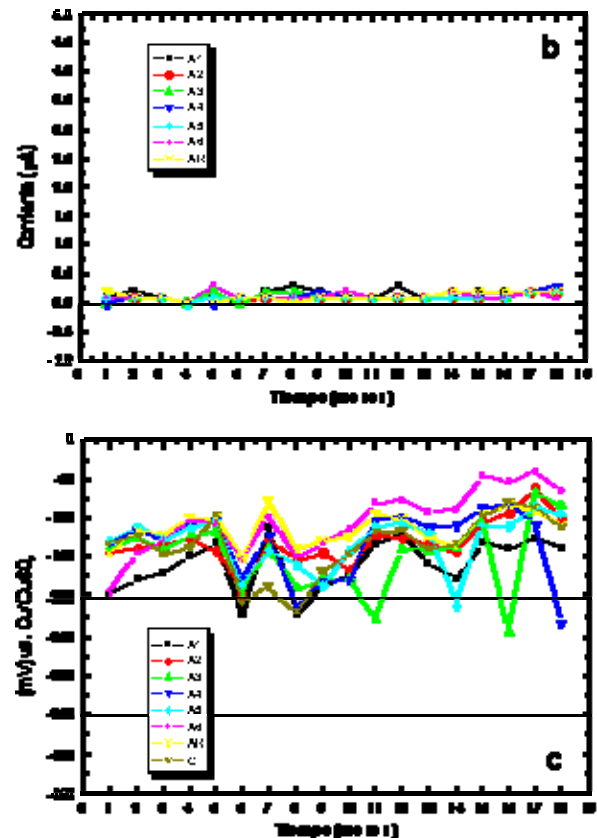
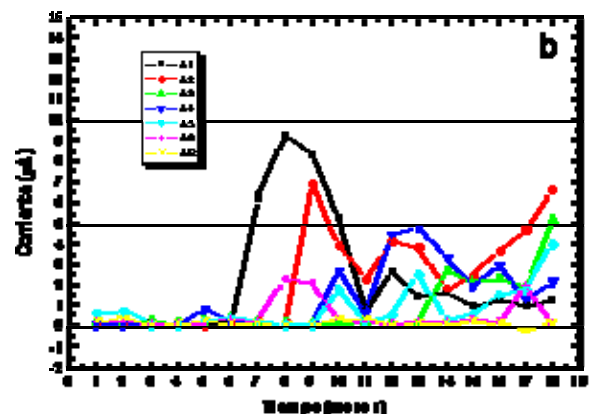
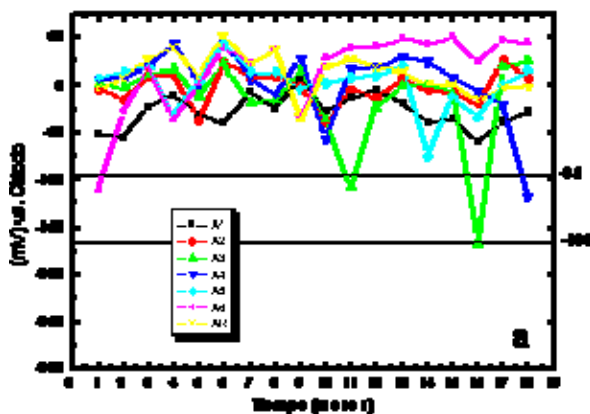
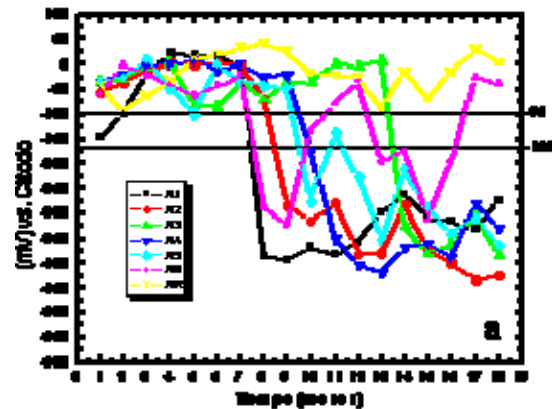


Figura 4. Vigas con relación a/c 0.40 expuestas en agua potable



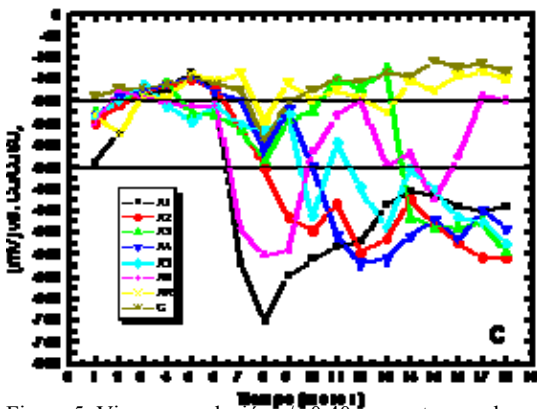


Figura 5. Vigas con relación a/c 0.40 expuesto en salmuera

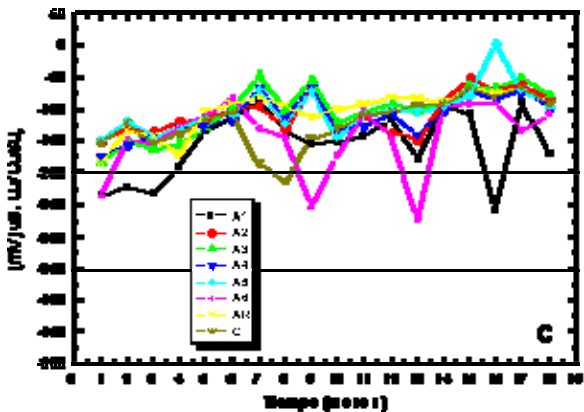
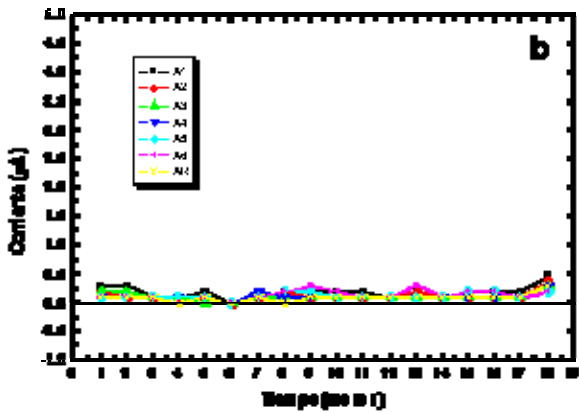
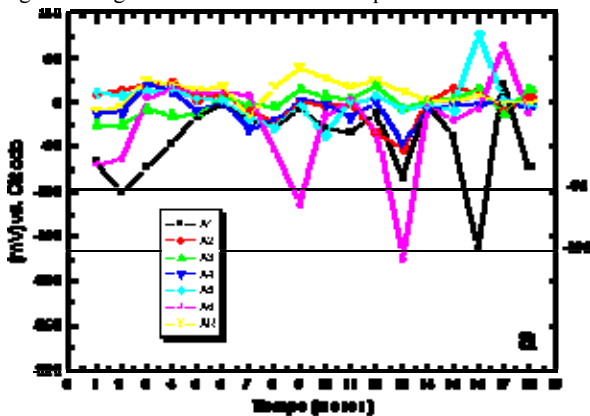


Figura 6. Vigas con relación a/c 0.60 expuesto en agua potable

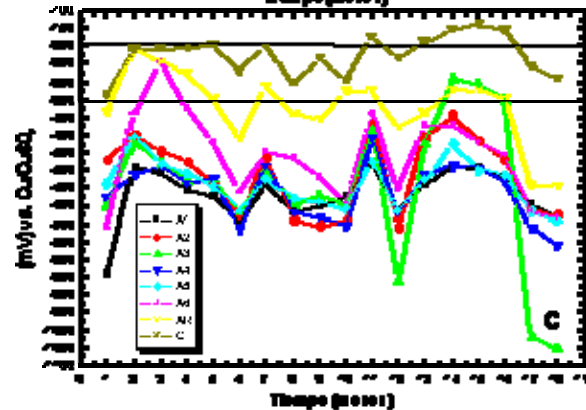
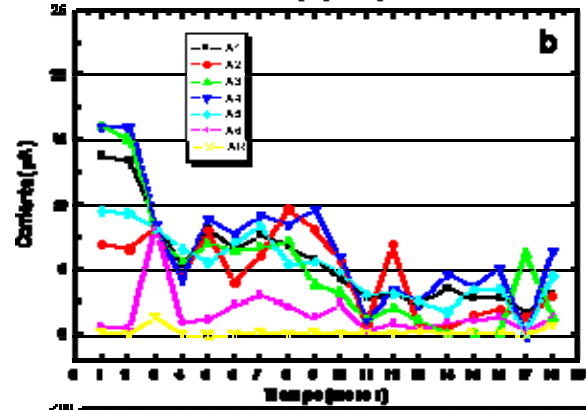
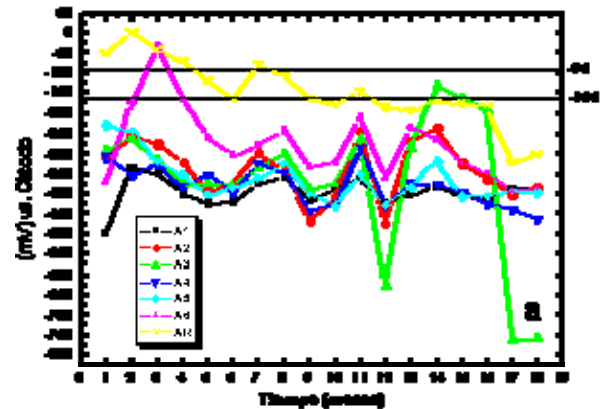


Figura 7. Vigas con relación a/c 0.60 expuesto en salmuera

En la técnica de ruido electroquímico se empleó análisis estadístico de datos, obteniéndose la densidad de corriente para clasificar el nivel de corrosión (Troconis, 1991), el tipo de corrosión conforme a su análisis espectral en potencial y corriente (Legat y Dolecet, 1995) y su velocidad de corrosión (Sagues A, 1991) de acuerdo a la formula:  $V(\text{mm/año}) = i_{\text{corr}}(\mu\text{A}/\text{cm}^2) * 0.011$  (Tablas 4,5 y 6)(Figura 8).

| $I_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ | Nivel de corrosión |
|---|--------------------|
| <0.1  | Despreciable       |
| 0.1-0.5                                     | Moderada           |
| 0.5-1.0                                     | Elevada            |
| >1.0  | Muy elevada        |

Tabla 4. Niveles de corrosión.

| Tipo de corrosión | PENDIENTE (dB[V/Hz <sup>1/2</sup> ]/década) |      | PENDIENTE (dB[AHz <sup>1/2</sup> ]/década) |      |
|-------------------|---|------|--|------|
|                   | Máx.  | Min. | Máx.                                       | Min. |
| Pasivación        | -15   | -25  | 1  | -1   |
| Picado            | -20   | -25  | -7   | -14  |
| Uniforme          | 0   | -7   | 0  | -7   |

Tabla 4. Tipos de corrosión.

| Relación (a/c) | Electrodos- mes | Rn     | Icorr  | Nivel de corrosión |
|----------------|-----------------|--------|--------|--------------------|
| 0.40           | A1-9            | 0.7155 | 0.0363 | Despreciable       |
| 0.40           | A6-9            | 2.3728 | 0.0110 | Despreciable       |
| 0.40           | AR-9            | 0.0406 | 0.6403 | Elevada            |
| 0.60           | A1-9            | 0.8615 | 0.0302 | Despreciable       |
| 0.60           | A6-9            | 0.1562 | 0.1664 | Moderada           |
| 0.60           | AR-9            | 0.0732 | 0.3551 | Moderada           |
| 0.40           | A1-18           | 1.3043 | 0.0199 | Despreciable       |
| 0.40           | A6-18           | 2.5353 | 0.0103 | Despreciable       |
| 0.40           | AR-18           | 0.0093 | 2.7914 | Muy elevada        |
| 0.60           | A1-18           | 1.3670 | 0.0190 | Despreciable       |
| 0.60           | A6-18           | 1.6334 | 0.0159 | Despreciable       |
| 0.60           | AR-18           | 0.0619 | 0.4197 | Moderada           |

| PSDpot | Tipo de corrosión | PSDcorr | Tipo de corrosión | Vcorr (mm/año) |
|--------|-------------------|---------|-------------------|----------------|
| -2.3   | UNIFORME          | -1.6    | UNIFORME          | 0.0004         |
| -2.7   | UNIFORME          | -3.9    | UNIFORME          | 0.0001         |
| -2.3   | UNIFORME          | -2.1    | UNIFORME          | 0.0070         |
| -1.7   | UNIFORME          | -2.5    | UNIFORME          | 0.0003         |
| -2.2   | UNIFORME          | -2.5    | UNIFORME          | 0.0018         |
| -1.9   | UNIFORME          | -4.2    | UNIFORME          | 0.0040         |
| -2.9   | UNIFORME          | -3.9    | UNIFORME          | 0.0002         |
| -2.0   | UNIFORME          | -1.3    | UNIFORME          | 0.0001         |
| -2.2   | UNIFORME          | -0.7    | PAS-UNIF          | 0.0307         |
| -3.4   | UNIFORME          | -3.2    | UNIFORME          | 0.0002         |
| -3.4   | UNIFORME          | -2.3    | UNIFORME          | 0.0001         |
| -1.6   | UNIFORME          | -4.3    | UNIFORME          | 0.0046         |

Tabla 6. 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.

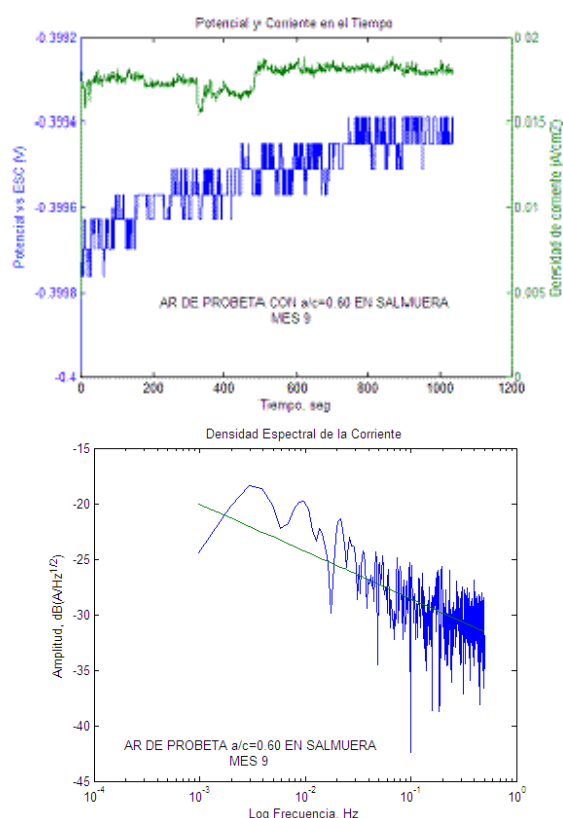


Figura 8. Series de tiempo y densidad espectral en corriente para AR en el mes 18 de la viga con relación a/c 0.60 expuesto en salmuera.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las vigas con relación a/c=0.40 y 0.60 expuestas en Salmuera, son las que presentaron potenciales de corrosión y voltajes de macroceldas de corrosión más negativos que las vigas expuestas en agua potable, con intervalos de (0 a -400mV) del sensor acero/acero inoxidable y de (-200 a -600mV) del Cu/CuSO4 siendo las de relación a/c=0.60 más activas aún, con probabilidades que van de incertidumbre a un 90% de que exista corrosión en el acero y en los ánodos del sensor de acuerdo a la norma ASTM C-876-91.

Las corrientes de macrocelda no son todavía representativas para que indiquen el riesgo por corrosión del sistema en estudio, con intervalos promedios de 0 a 0.3 µA en las vigas expuestas en Agua Potable, y de 0 a 20 µA en las vigas expuestas en Salmuera.

El funcionamiento del sensor de acero al carbono/acero inoxidable (macroceldas de corrosión) es adecuado, y esto se confirma con el monitoreo comparativo con el electrodo de referencia (Cu/CuSO4) y la medición de corriente galvánica, en la cual se detectó mayor sensibilidad de los ánodos que el acero de refuerzo.

Las series de tiempo en corriente y potencial de ruido electroquímico para las vigas expuestas en salmuera mostraron en general un estado de pasivación para los meses 9 y 18, con niveles de corriente de despreciable a moderado, excepto la viga de rel.  $a/c=0.40$ , que tuvo corrientes elevadas, pero de pasivación de acuerdo al análisis espectral en corriente que mostro un tipo de corrosión uniforme-pasivación.

El empleo de macroceldas como nuevas técnicas de monitoreo es recomendable para lugares inaccesibles de estructuras de concreto reforzado expuestas a ambiente marino principalmente donde los programas de mantenimiento son excesivamente caros. Es un auxiliar como método de prevención del deterioro que sufren las estructuras con el tiempo, las cuales deben de considerarse dentro del programa de mantenimiento y conservación de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. J. McCarter, and O. Vennesland, "Sensor systems for use in reinforced concrete structures", *Construction and Building Materials* 18, (2004), pp. 351-358.
- [2] W. J. McCarter, T.M. Chrisp, A. Butler, and P.A.M Basheer, "Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete", *Construction and Building Materials* 15, (2001), pp. 115-124.
- [3] P. Schiessl, and M. Raupach, "Monitoring system for the corrosion risk of steel in concrete structures", *In: Concrete International*, pp 52-55, (1992).
- [4] M. Raupach, and P. Schiessel, "Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures", *NDT&E International* 34,6, pp 435-442, (1991).
- [5] M. Raupach, "Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences", *Construccion and Building Materials* 10, No. 5, pp 329-338, (1996).
- [6] S. Kosmatka, and W. Panarese, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Instituto Mexicano del Cemento A.C., 13 edición, ISBN-968-464-074-9, México, 1992.
- [7] M. Raupach, and C. Dauberschmidt, "Durability of marine structures made of high-performance concrete", *RILEM Proceedings, PRO 32 International Conference on Advances in Concrete and Structures* 2, pp. 919-930, (2003).
- [8] *ASTM C-876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA (Reapproved 1999).