



## ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO CON 3 AÑOS DE EXPOSICIÓN AL MEDIO AMBIENTE DE LA CD. DE XALAPA, VER -PROYECTO DURACON-

M. A. Baltazar-Zamora<sup>1\*</sup>, G. Santiago-Hurtado<sup>1</sup>, A. Borunda-Terrazas<sup>2</sup>,  
E.E. Maldonado-Bandala<sup>1</sup>, F. Almeraya-Calderón<sup>2</sup>, C. Gaona-Tiburcio<sup>2</sup> A.A. Torres-Acosta<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana,  
Circ. G. Aguirre Beltrán S/N, Lomas del Estadio, Xalapa, Veracruz, México, CP 91000

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Chihuahua, Chih., México

<sup>3</sup>Instituto Mexicano del Transporte., Sanfandila, Querétaro, México.

\*e-mail: mbaltazar@uv.mx, miguelbaltazar21@gmail.com

### RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa el comportamiento de la corrosión del acero de refuerzo en concreto expuesto al ambiente de la ciudad de Xalapa, Ver., el efecto en la durabilidad del concreto y el acero de refuerzo no solo depende de sus características mecánicas sino también del medio ambiente de exposición como han demostrado investigaciones recientes. Se fabricaron 6 vigas de 15 x15 x 30 cm., con varillas de acero al carbono 1018 de 3/8” de diámetro, en tres espesores de recubrimiento, 1.5, 2.0 y 3.0 cm. Se diseñaron dos tipos de concreto con dos relaciones  $a/c = 0,65$  y  $a/c = 0,45$ , con un mismo tipo de cemento. Las pruebas para evaluar la susceptibilidad a la corrosión del acero de refuerzo, fueron resistencia a la polarización la cual nos indica la velocidad de corrosión del acero de refuerzo y el monitoreo de potenciales de corrosión en base a la norma ASTM C-876.

**Palabras Clave:** Durabilidad, Corrosión, Concreto, Medio Ambiente, Recubrimiento.



## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace unos años, se pensaba que las estructuras de concreto hidráulico tenían una vida útil ilimitada, y que su durabilidad dependía únicamente de sus características mecánicas, por lo que, durante la etapa de su diseño, no se tomaban en cuenta las condiciones ambientales a las cuales iban estar expuestas. De la literatura tan extensa se tiene que, la durabilidad de dichas estructuras dependen, no solo de sus características mecánicas sino también del medio ambiente en el que van estar inmersas. Uno de los trabajos de investigación más recientes para relacionar la durabilidad de las estructuras de concreto con el medio ambiente, es el realizado por el grupo DURACON (Influencia del medio ambiente en la durabilidad del concreto), a través del proyecto del mismo nombre que es auspiciado por el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Este proyecto está enfocado a estudiar el comportamiento del concreto hidráulico expuesto a diferentes condiciones ambientales de Ibero América. En México se tienen 14 estaciones de monitoreo, una de ellas es la estación que se encuentra en la Cd. de Xalapa, en el estado de Veracruz. El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de los tres primeros años de evaluación de las vigas expuestas a un medio ambiente catalogado como urbano [1,2].

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1. *Materiales para la elaboración de vigas de concreto*

Los especímenes bajo estudio fueron fabricados tomando en cuenta las siguientes especificaciones, el proporcionamiento de las mezclas se muestra en la tabla I.

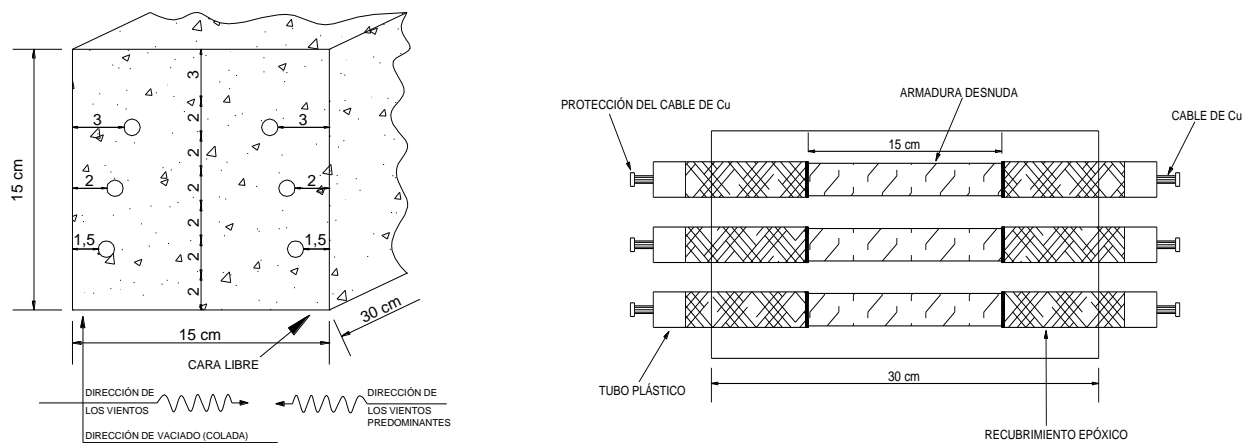
1. Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario
2. Agregado Silíceo triturado de 19 mm tamaño máximo, densidad de 2.58
3. Arena cuarzosa, densidad de 2.50
4. Relación a/c: 0.45 ( $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ )
5. Relación a/c: 0.65 ( $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ )
6. Adición de plastificante 0.3% por peso de cemento (sikament 190 CR).
7. Revenimiento  $10 \pm 1.0 \text{ cm}$ . cimbra metálica y curado bajo agua por 7 días.

Tabla I. Proporcionamiento de las mezclas empleadas.

Contenido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Relación 0.45	Relación 0.65
Cemento	411	285
Agua	185	185
Agregado pétreo	1010	1033
Agregado fino	731	812
Aditivo (plastificante)	4 cc/Kg cemento	

## 2.2. Preparación y colocación de las vigas

Para cada estación fueron elaboradas 12 vigas de concreto de 15 x 15 x 30 cm., de las cuales 6 son de concreto simple y las otras 6 de concreto reforzado con 6 varillas de acero 1018 del # 3 (9.5 mm de diámetro). Las varillas fueron colocadas dentro de las vigas, a 3 diferentes espesores de recubrimiento de concreto: 1.5, 2.0 y 3.0 cm., la figura 1 muestra un croquis de la geometría de las vigas del proyecto, las cuales fueron colocadas en soportes metálicos, con una cara orientada hacia los vientos predominantes (cara expuesta), y la otra cara hacia los vientos no predominantes (cara resguardada).



**Figura 1.** Croquis de la sección transversal y longitudinal de las vigas de concreto Reforzado del proyecto DURACON.

Las vigas de concreto reforzado son empleadas para realizar la evaluación de parámetros electroquímicos ( $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$  y  $\rho$ ). La  $i_{\text{corr}}$  fue medida usando la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal ( $R_p$ ) de acuerdo al manual de inspección de la Red DURAR [3].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Propiedades físicas de los concretos

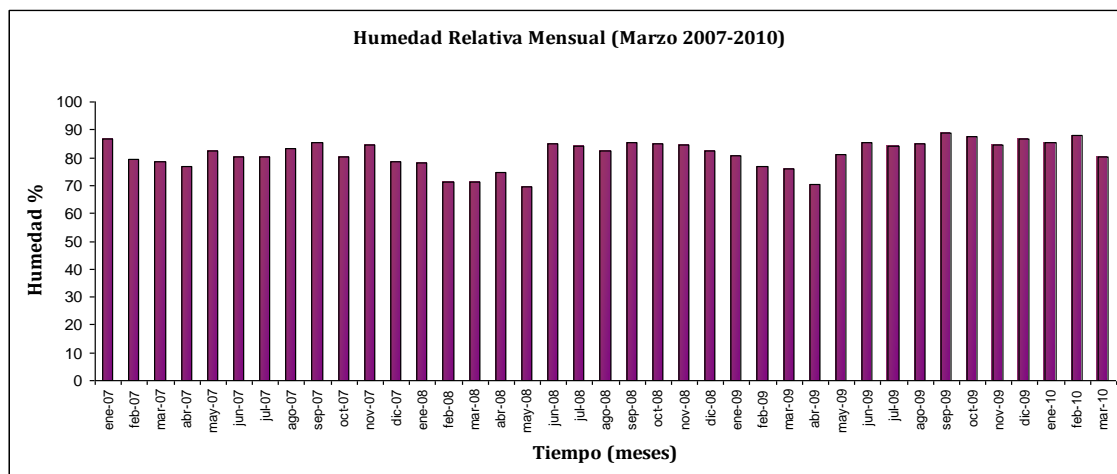
En la tabla II se presentan las propiedades físicas obtenidas de los concretos usados, como son: porosidad efectiva ( $\rho$ ), coeficiente de absorción capilar ( $k_a$ ), resistencia a la penetración de agua ( $m$ ) y resistencia a la compresión ( $f^c$ ) (ASTM Standars, Vol. 04.02, 2000). La resistencia a la compresión obtenida fue mayor a la resistencia esperada.

**Tabla II. Propiedades físicas de los concretos empleados.**

<i>Parámetro</i>	<i>Relación 0.45</i>	<i>Relación 0.65</i>
$f^c$ , N/mm <sup>2</sup>	51.5	40.0
$m$ , s/m <sup>2</sup>	$3.48 \times 10^7$	$3.60 \times 10^7$
$k_a$ , Kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup>	$1.47 \times 10^{-2}$	$1.99 \times 10^{-2}$
$\rho$ , %	8.5	11.9

#### Registro de parámetros ambientales

Las figuras 2 a 4 muestran el comportamiento de los parámetros ambientales (humedad relativa, temperatura y precipitación) durante los tres primeros años de exposición.



**Figura 2.** Variación mensual de la humedad relativa

La figura 2 muestra la humedad relativa promedio, la cual oscila entre un 75 y 85%.

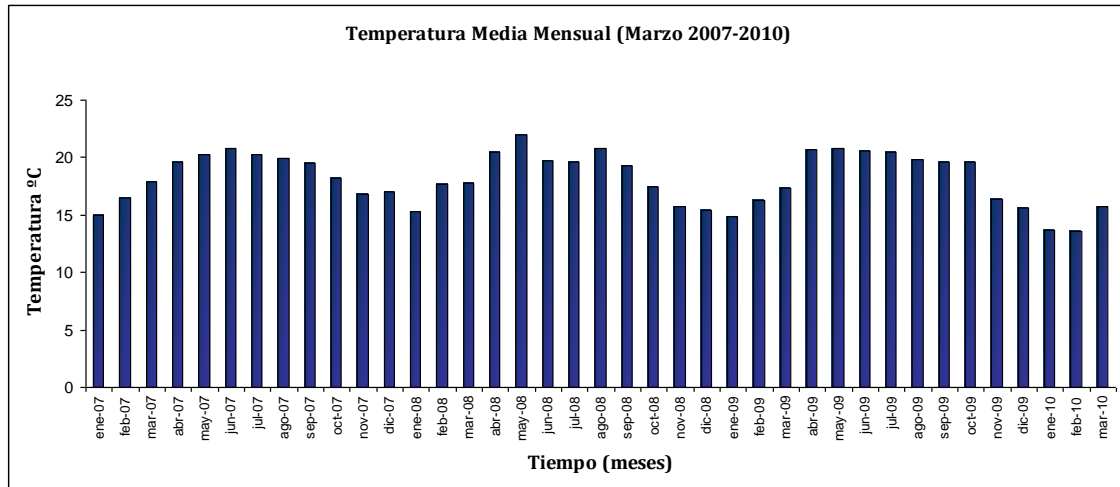


Figura 3. Variación mensual de la temperatura

La temperatura promedio registrada está entre 15 y 21°C (figura 3); y el promedio mayor de precipitación se registró en el mes de septiembre 2007, junio 2008 y septiembre 2009, coincidiendo con los valores más negativos de potenciales de corrosión reportados en estos tres primeros años de investigación (figura 4).

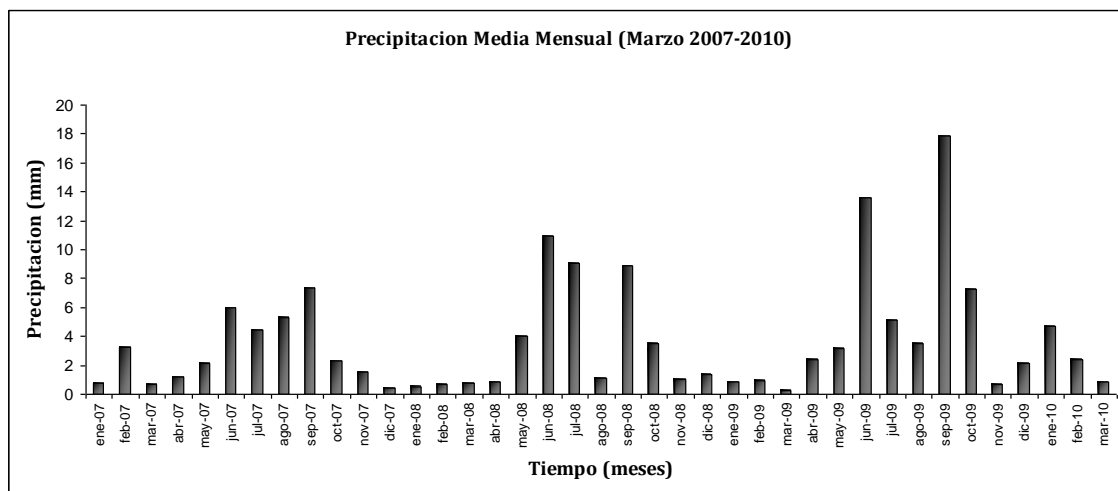


Figura 4. Variación mensual de la precipitación

## Potencial de Corrosión

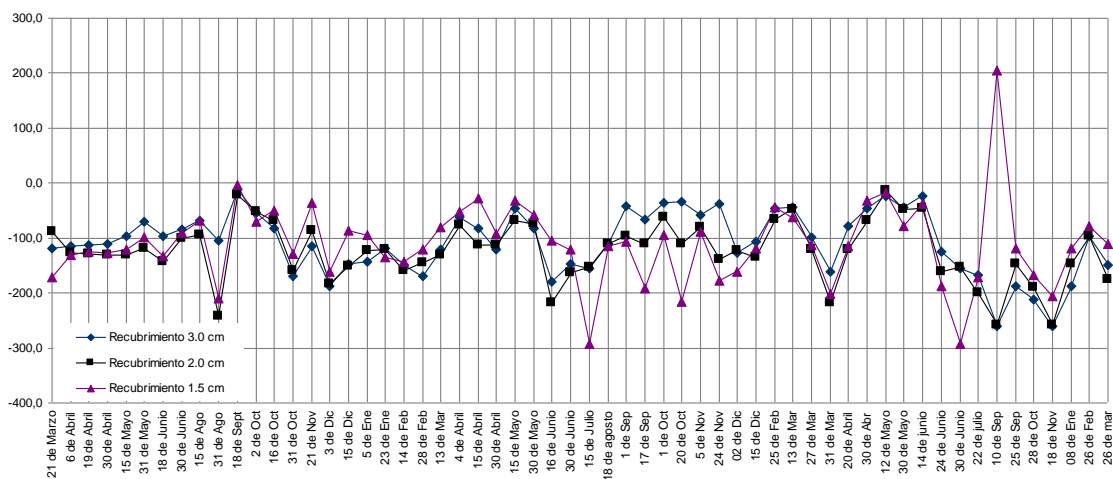
La interpretación de los valores de los potenciales de corrosión fue en base la Norma ASTM C-876-91, (ASTM Standars, Vol. 04.02, 1992), ver tabla III.

**Tabla III. Potenciales de corrosión en concreto reforzado [4].***Potenciales de corrosión Norma ASMT C876-91*

Potenciales más positivos que -200 mV	Riesgo de que ocurra corrosión es del 10%
Si está entre -200 y -350 mV	50% de probabilidad
Si son más negativos que -350 mV	se tendrá una probabilidad del 90% de que se esté corroyendo el acero

En las figuras 5 y 6, se puede observar el comportamiento de los potenciales de corrosión de dos de las seis vigas una con relación  $a/c=0.45$  y otra con relación  $a/c=0.65$ , se presentan los resultados de la cara expuesta a los vientos predominantes.

La figura 5 corresponde a la Viga con relación  $a/c=0.45$ , en general se observa un comportamiento homogéneo. El recubrimiento de 3.0 cm es el que tiene los valores menos negativos. En base a la Norma ASTM C 876-91, hay un riesgo de corrosión del 10%, hasta el 30 de junio de 2009, posteriormente entran a un estado de incertidumbre, a partir de 08 de enero de 2010 se vuelven a estabilizar entrando nuevamente a un estado de riesgo de 10% de corrosión.

**Figura 5. Comportamiento de potenciales de corrosión Viga con relación  $a/c=0.45$ .**

La figura 6 corresponde a la Viga con una relación  $a/c=0.65$ , durante el periodo de análisis se puede observar un comportamiento totalmente homogéneo, durante los 10 primeros meses, en los cuales los tres recubrimientos reportan valores más positivos que -200 mV, de acuerdo a la Norma ASTM C 876-91 nos indican que el riesgo de corrosión es de 10%. A partir del 31 de

marzo de 2009 presentan una variación cayendo así de acuerdo a la norma antes mencionada en un grado de incertidumbre de corrosión.

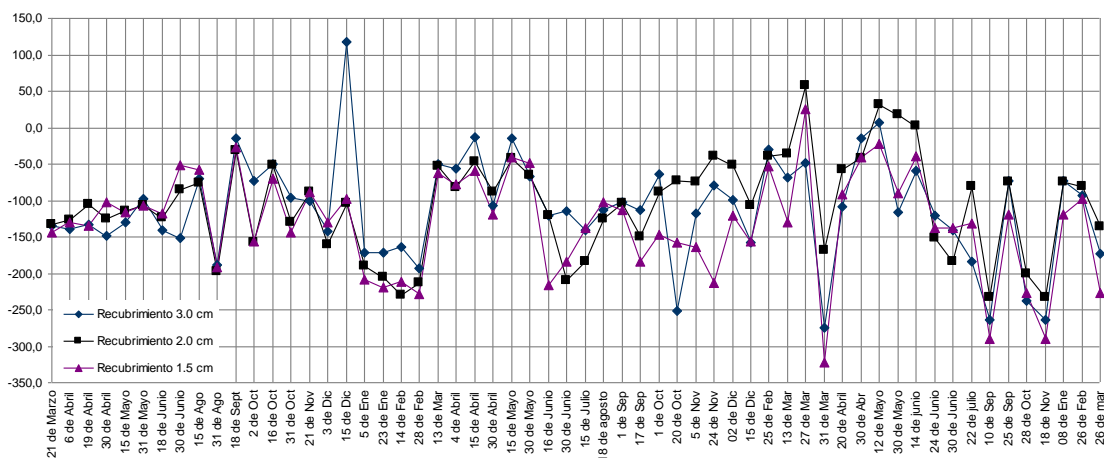


Figura 6. Comportamiento de potenciales de corrosión Viga con relación  $a/c=0.65$ .

## Cinética de Corrosión

En la Tabla IV se presentan los valores de cinética de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) del acero de refuerzo en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , de las vigas con relación  $a/c=0.45$ . La Viga 2 con recubrimiento de 1.5 cm tiene el valor de la cinética de corrosión más alto registrado; en las vigas con esta relación se presentaron algunos valores ligeramente elevados, en especial en la viga 1 y 2 durante el mes de abril de 2008 y marzo de 2009, lo cual las ubico en corrosión moderada, pero debido a su posterior estabilización se consideran en corrosión despreciable. Los valores  $i_{\text{corr}}$  registrados en las vigas con relación  $a/c=0.65$ , la Viga 5 con un recubrimiento de 2.0 cm tiene en su mayoría los valores de la cinética de corrosión más altos registrados, con ello y de acuerdo al manual del DURAR, podemos determinar que se encuentra en un nivel de corrosión elevada. Las vigas 4 y 6 e inclusive la viga 5 en su recubrimiento de 3 cm de acuerdo a la literatura y a los valores registrados nos indican una corrosión despreciable [5].

Tabla IV. Velocidad de corrosión, vigas con relación a/c = 0.45 y a/c=0.65.

VIGAS	REC. (cm)	Mar-07 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Jun-07 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nov-07 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Abr-08 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Mar-09 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Jul-09 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Oct-09 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Mar-10 i corr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
VIGA 1	3.0	<b>0.01</b>	<b>0.035</b>	<b>0.033</b>	<b>0.066</b>	<b>0.093</b>	<b>0.042</b>	<b>0.1</b>	<b>0.038</b>
REL.	2.0	0.01	0.087	0.051	0.111	0.113	0.077	0.096	0.066
A/C=0.45	1.5	0.017	0.058	0.03	0.073	0.121	0.05	0.142	0.051
VIGA 2	3.0	<b>0.019</b>	<b>0.043</b>	<b>0.033</b>	<b>0.082</b>	<b>0.104</b>	<b>0.055</b>	<b>0.057</b>	<b>0.065</b>
REL.	2.0	0.025	0.039	0.051	0.13	0.089	0.059	0.033	0.064
A/C=0.45	1.5	0.016	0.073	0.041	0.181	0.104	0.052	0.071	0.062
VIGA 3	3.0	<b>0.016</b>	<b>0.013</b>	<b>0.026</b>	<b>0.057</b>	<b>0.067</b>	<b>0.027</b>	<b>0.05</b>	<b>0.048</b>
REL.	2.0	0.024	0.027	0.034	0.071	0.072	0.067	0.057	0.114
A/C=0.45	1.5	0.02	0.053	0.029	0.05	0.054	0.039	0.035	0.086
VIGA 4	3.0	<b>0.008</b>	<b>0.025</b>	<b>0.016</b>	<b>0.046</b>	<b>0.041</b>	<b>0.025</b>	<b>0.035</b>	<b>0.092</b>
REL.	2.0	0.015	0.032	0.03	0.069	0.045	0.023	0.066	0.071
A/C=0.65	1.5	0.02	0.016	0.022	0.032	0.065	0.016	0.043	0.031
VIGA 5	3.0	<b>0.037</b>	<b>0.065</b>	<b>0.047</b>	<b>0.054</b>	<b>0.046</b>	<b>0.031</b>	<b>0.028</b>	<b>0.036</b>
REL.	2.0	0.219	0.24	0.121	0.023	0.11	0.102	0.129	0.063
A/C=0.65	1.5	0.025	0.098	0.028	0.132	0.205	0.048	0.066	0.07
VIGA 6	3.0	<b>0.019</b>	<b>0.063</b>	<b>0.023</b>	<b>0.049</b>	<b>0.04</b>	<b>0.024</b>	<b>0.018</b>	<b>0.059</b>
REL.	2.0	0.014	0.028	0.02	0.062	0.039	0.022	0.017	0.041
A/C=0.65	1.5	0.017	0.025	0.02	0.037	0.029	0.027	0.049	0.066

#### 4. CONCLUSIONES

Los valores de  $E_{\text{corr}}$  que se presentan a lo largo de estos tres años en los aceros de refuerzo con sus diferentes recubrimientos en lo general son más positivos que  $-200$  mV, lo que en base a la norma ASTM C 876-91 nos indica un riesgo de corrosión del 10%.

Los valores de velocidad de corrosión o cinética de corrosión nos corroboran el estado pasivo del acero en 10 de las 18 varillas de la cara expuesta, dado que en 8 de ellas, se presentan valores que indican un nivel de corrosión moderada, de la viga 1 (los tres recubrimientos) y de la viga 2 (dos de los tres recubrimientos), teniendo la mayor magnitud el recubrimiento de 2.0 cm de la viga 5 con una  $i_{\text{corr}} = 0.24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Hasta esta etapa de monitoreo los valores de la cinética de corrosión reportados por los especímenes indican de acuerdo a la literatura un nivel de corrosión despreciable, concordando perfectamente con los valores de potencial de corrosión monitoreados.



En los valores de potenciales de corrosión podemos notar la influencia de los parámetros ambientales ya que los valores más negativos tienen una relación con los valores de humedad y precipitación más elevados, reportados en los meses de: (julio, agosto, septiembre y octubre)

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a PROMEP por el segundo año de apoyo otorgado para la realización de este proyecto de investigación, autorizado por la SES mediante oficio no. PROMEP/103.5/07/2753, con cargo al “Proyecto de Apoyo a la Incorporación de Nuevos Profesores de Tiempo Completo PROMEP”.

## 6. REFERENCIAS

- [1] M.A. Baltazar-Zamora y et al., *Portugaliae Electrochimica Acta*, **27** N° 3, 237 (2009).
- [2] M. A. Baltazar-Zamora, G. Santiago-Hurtado, D. Nieves-Mendoza, E.E. Maldonado-Bandala, C. P. Barrios-Durstewist, R. E. Núñez-Jaquez, A.A. Torres-Acosta, *Congreso SMEQ/2010*, Zacatecas, Zac., México, (2010).
- [3] O. Troconis, Miembros Red DURAR. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, pg. 200, Durar, Red temática del CYTED, España, 1997.
- [4] G. Santiago-Hurtado “*Determinación del Nivel de Corrosión y Perfil de Carbonatación en Vigas de Concreto Reforzado con 3 años de Exposición al Medio Ambiente de la Cd. de Xalapa, Ver.*” pg. 50, Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana, (2010).
- [5] G. Santiago-Hurtado, E.E. Maldonado-Bandala, D. Nieves-Mendoza, M. A. Baltazar-Zamora, *Congreso SMEQ 2010*, Zacatecas, Zac., México. (2010).