

**AVISO Sonoflex**

AVISO Resmat

# Estudio de la corrosión de hormigón armado en un ambiente urbano-industrial. Proyecto DURACON

## Corrosión study of reinforced concrete in urban-industrial environment. DURACON Project

Mario Rodríguez Ramírez\*, Facundo Almeraya Calderón\*\*, Citlalli Gaona Tiburcio\*\*, Andrés Torres\*\*\*, Alberto Martínez Villafañe\*\*, Oladis Trocónis de Rincón\*\*\*\*

\* Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Chihuahua, MEXICO

\*\* Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Chihuahua. MEXICO

\*\*\* Instituto Mexicano del Transporte (IMT), MEXICO

\*\*\*\* Univesridad de Zulia, VENEZUELA

facundo.almeraya@cimav.edu.mx

Fecha de recepción: 23/ 02/ 2005

Fecha de aceptación: 14/ 06/ 2005

PAG. 129 - 136

### Resumen

Este trabajo forma parte del proyecto iberoamericano DURACON, en el cual se caracteriza la durabilidad de hormigones expuestos en condiciones ambientales prevaletantes en Ibero América, basándose en la exposición de muestras de hormigón armado en al menos dos atmósferas distintas, considerándose una zona marina y otra urbana, en cada país participante. Los resultados obtenidos de exponer probetas de hormigón armadas a condiciones ambientales actuantes en la ciudad de Chihuahua, México (atmósfera Urbano-Industrial) durante 24 meses de exposición, se discutirán en este trabajo. Se diseñaron dos tipos de hormigones en función de su relación agua/cemento siendo de 0.45, y 0.65 con un mismo tipo de cemento, además, tres espesores de recubrimiento (15, 20 y 30 cm.) fueron evaluados. Los ensayos estuvieron centrados principalmente en la medida de parámetros electroquímicos que permitieron evaluar la susceptibilidad a la corrosión de las barras metálicas, mediante pruebas y monitoreo de potenciales de corrosión, e implementando la técnica de resistencia a la polarización para determinar la velocidad de corrosión.

Palabras Clave: Corrosión, hormigón, durabilidad, ambiente, acero

### Abstract

This work is part of the DURACON Ibero-American project, which seeks to characterize the concrete durability in Ibero-American environmental conditions, being based on the concrete reinforced samples exposition in at least two different atmospheres (marine and urban), for each Ibero-American country. Results from concrete reinforced probes exposed in Chihuahua-City, Mexico (atmospheres urban-industrial) environmental conditions during 24 months of exposition were obtained. Two types of concrete were used in water/cement ratios of 0.45 and 0.65 respectively. Furthermore, three covers (15, 20 and 30 cm) were evaluated too. The present work focused on the measurements of electrochemical parameters to evaluate the corrosion susceptibility for the metallic bars through the measurement and monitoring of corrosion potentials, and implementing the lineal polarization resistance (LPR) technique to measurement of corrosion rates.

Keywords: Corrosion, concrete, durability, environmental, carbon steel

## 1. Introducción

La corrosión de la armadura en el acero de refuerzo es una de las causas más habituales responsable del deterioro de las estructuras de hormigón que está llevando a elevados gastos de reparación y mantenimiento, con la preocupación que ello supone para las administraciones que son las propietarias de las obras públicas, y los particulares cuyas viviendas sufren

deterioros prematuros.

Las investigaciones relacionadas con la corrosión de armaduras han sido amplias en los últimos años, pero han estado especialmente enfocadas en aspectos como: el estudio de las causas y mecanismos de deterioro, el desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto en laboratorio como "in situ") y al empleo

de métodos de protección. Más recientemente se planteó la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras de hormigón armado. (Castro P., et al., 1998)

Las características físicas del hormigón como aislante están relacionadas con la estructura de la red de poros que se genera debido al exceso de agua que es necesario utilizar en el amasado, para hacer suficientemente manipulable el material. La porosidad total del hormigón está constituida, tanto por los poros cerrados u ocluidos como por una red de poros, cuyos tamaños oscilan entre pocas  $\mu\text{m}$  hasta alrededor de  $100\mu\text{m}$  (poros de gel) desde  $\sim 100\mu\text{m}$  hasta  $\sim 10^5 \text{ m}$  (poros capilares) y desde  $10^5 \mu\text{m}$  hasta el orden de  $\text{mm}$ , que son los llamados poros de aire o grandes poros. Todos los que están comunicados entre sí están relacionados con el concepto de permeabilidad o penetrabilidad, que es la característica fundamental que va a controlar la llegada de agentes agresivos hasta la armadura. La permeabilidad del hormigón a una determinada sustancia no depende sólo del tamaño y número de poros, como en el caso de los materiales porosos inertes, sino que influyen en ella también fenómenos de absorción, las reacciones químicas que se pueden producir, el necesario equilibrio de capas eléctricas, etc. De lo anterior surgen comentarios de que en el caso del hormigón se comporte como una membrana semipermeable. (Andrade, 1993, Andrade et al., 1994)

Cuando la humedad ambiental es suficiente, estos poros del hormigón están rellenos por un líquido acuoso constituido principalmente por iones  $\text{OH}^-$  (alcalinidad elevada con un pH entre 12 y 14),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La cantidad relativa de cada uno de ellos depende fundamentalmente del tipo y proporción de cemento utilizado y de la relación agua/cemento, además, esta composición varía con la edad del hormigón, habiéndose demostrado que a partir de los 28 días de edad, el ión  $\text{Ca}^{2+}$  prácticamente desaparece de la disolución, que pasa a estar constituida casi completamente por  $\text{NaOH}$  y  $\text{KOH}$ . A esta elevada alcalinidad y con el contenido de  $\text{O}_2$  normal en las estructuras enterradas o sumergidas, el acero se recubre de una capa de óxidos muy adherente, compacta e invisible (pasivante) que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el hormigón sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambie sus características físicas o químicas por agresiones exteriores (Andrade, 1988).

## 2. Metodología experimental

La estación de ensayo fue constituida por paneles metálicos para sostener las probetas de hormigón a un metro por encima del suelo, y orientados hacia la dirección de los vientos predominantes.

### 2.1 Materiales para la fabricación de las probetas de hormigón

Los hormigones estudiados fueron fabricados tomando en cuenta las especificaciones que se dan a continuación:

1. Tipo de Cemento: Cemento Pórtland Ordinario CPO 30 RS, densidad 3.15
2. Árido Silíceo triturado de 19 mm (tamaño máximo grueso), densidad 2.58,  $P_g = 58\%$
3. Arena cuarzosa, densidad 2.50,  $P_a = 42\%$ ,
4. Relación a/c: 0.45 (cemento 411  $\text{kg}/\text{m}^3$  y agua 185  $\text{lto}/\text{m}^3$ ),  $f'c = 350 \text{ kg}/\text{cm}^2$
5. Relación a/c: 0.65 (cemento 285  $\text{kg}/\text{m}^3$  y agua 185  $\text{lto}/\text{m}^3$ ),  $f'c = 210 \text{ kg}/\text{cm}^2$
6. Adición de plastificante 0.3% del peso del cemento (sikament 190 CR).
7. Asentamiento  $10 \pm 1.0 \text{ cm}$
8. Encofrado en madera resinosa.
9. Curado bajo agua por 7 días.
10. Se prepararon 6 probetas de hormigón con armadura (tres con relación a/c = 0.45 y tres con relación a/c = 0.65).

### 2.2 Caracterización física de las probetas de hormigón con armadura

Las probetas de hormigón armado que fueron expuestas en las estaciones de ensayo son: 3 probetas de relación a/c 0.45 y 3 de relación 0.65, de forma prismática de  $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}$  con 3 series de armaduras del mismo tipo en cada probeta, con espesores de recubrimiento distintos, siendo de 15, 20 y 30 mm como se puede apreciar en el corte de la sección transversal de la Figura 1. Además, las barras acero del refuerzo vistas en sentido longitudinal tienen 15 cm de la armadura desnuda, esto tomando como referencia el centro de la probeta que es de 30 cm de largo y el resto de la barra es recubierto por una resina epóxica en cada extremo, acompañada por tubo de plástico que hace la función de aislante de la parte no desnuda y como protector del contacto del cable de cobre, el cual se utilizara para las conexiones eléctricas durante el estudio de corrosión (ver figura 2).

Las probetas se montaron en estructuras metálicas debidamente separadas y aisladas unas de

otras, y con una orientación preferencial hacia los vientos dominantes en la azotea de uno de los edificios del complejo, considerando el menor de las barreras físicas que se pudiera tener e impedir la corriente de flujos del viento en el área(ver figura 3).

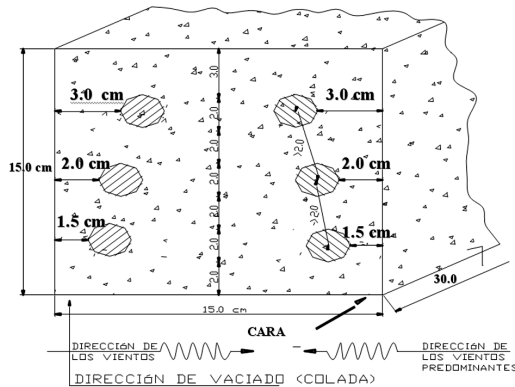


Figura 1. Sección transversal de la probeta

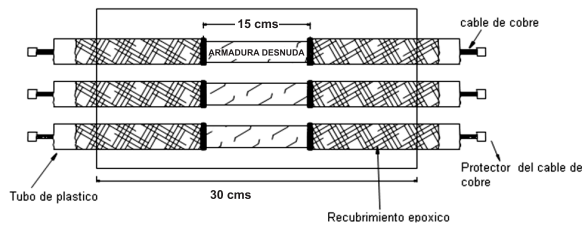


Figura 2. Sección longitudinal de la probeta

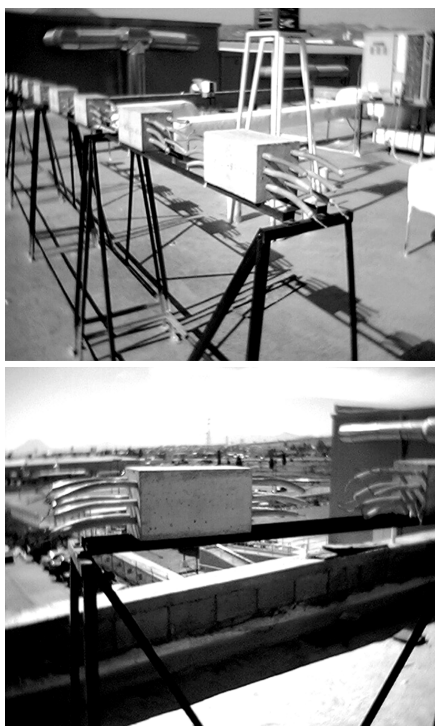


Figura 3. Estación de monitoreo orientada hacia los vientos dominantes

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1 Potencial de Corrosión

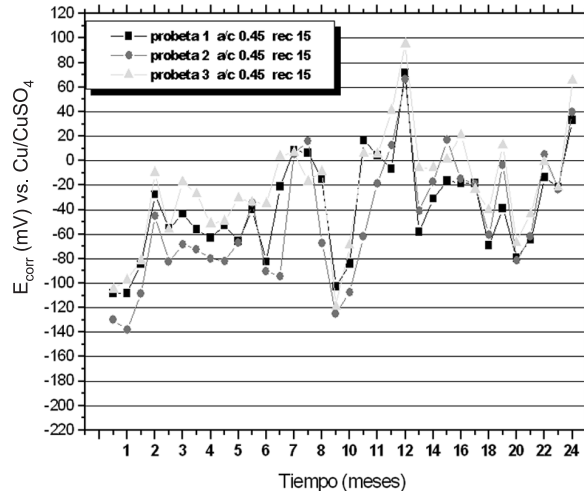
El análisis de las gráficas de potencial obtenidas de cada una de las probetas en estudio, se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876-91. (ver Tabla 1).

Tabla 1. Interpretación de resultados norma ASTM C-876-91

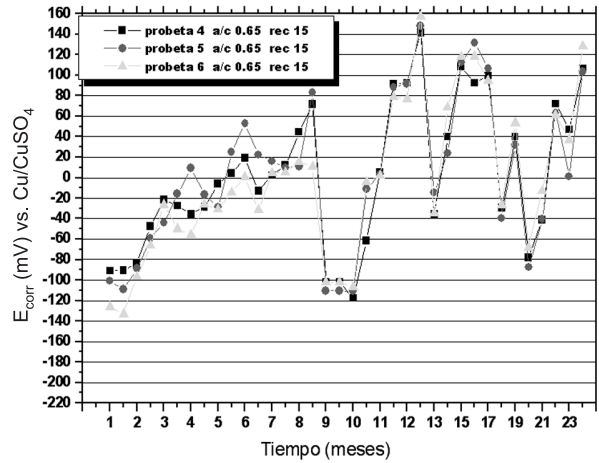
Potencial de corrosión (Ecorr)	Riesgo de daño
< -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
> -350	90 % de probabilidad de corrosión

En la Gráfica 1 (inciso a-c) se observa el comportamiento del potencial de corrosión como función del tiempo de exposición para las probetas 1, 2 y 3 cuya la relación a/c es 0.45 y con los tres recubrimientos (15, 20 y 30 mm). Como se puede observar los valores de los potenciales no superaron los -200 mV lo que indica que existe un 10 % de probabilidad de que exista corrosión de acuerdo con ASTM C-876-91. Los potenciales en las probetas ya mencionadas comenzaron con valores de -130 mV aproximadamente al inicio de la experimentación y conforme fue transcurriendo el tiempo se llega a alcanzar valores de potencial mas nobles, que van desde los +70 a +100 mV después de los dos años de exposición, esto significa que el acero refuerzo se encuentra estado pasivo para los tres casos (ver grafica 1).

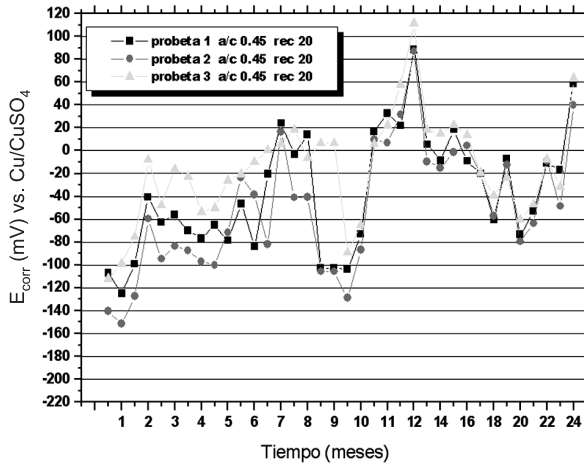
En el caso de las probetas con relación a/c de 0.65 (Gráfica 2, incisos a-c). Los valores de los potenciales permiten observar que existe un 10 % de probabilidad de corrosión de acuerdo como se establece en ASTM C-876 -91. El comportamiento de los potenciales que se observó en estas tres probetas (4-6), presentó una tendencia a través del tiempo a la formación de una película pasivante del sistema sobre la superficie de las varillas de refuerzo conformada por los iones OH<sup>-</sup> posicionados en el acero. Los valores de los potenciales para la relación a/c 0.65 van desde -140 a +110 mV demostrándose su pasividad a la fecha en los tres tipos de recubrimientos, y por otro lado, el patrón de desenvolvimiento que siguen los potenciales dejan ver que existen periodos de activación del sistema, sobre todo cuando existe una humedad relativa alta y sostenida en un microclima como el que se está evaluando.



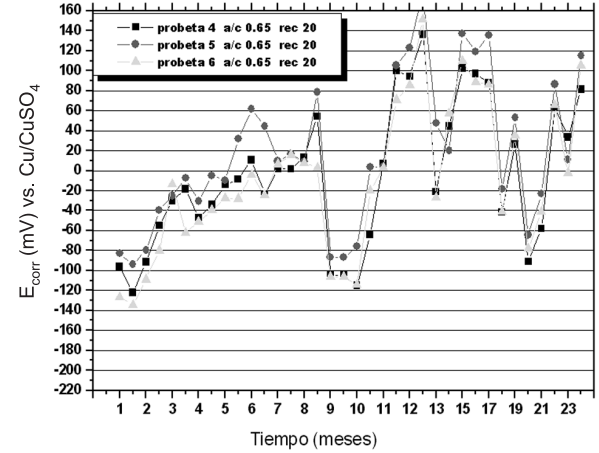
a) Relación a/c: 0.45. Rec 15 mm



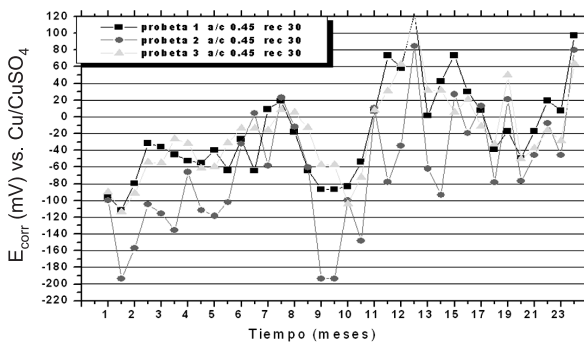
a) Relación a/c: 0.65. Rec 15 mm



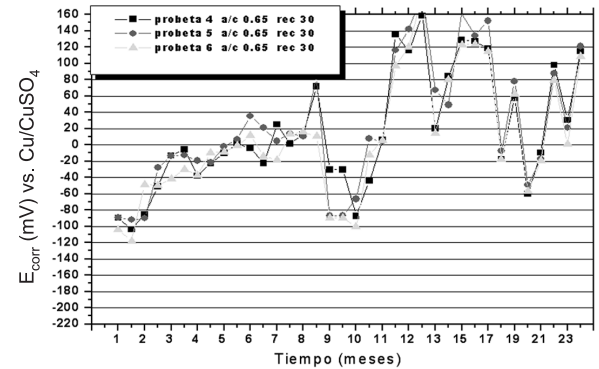
b) Relación a/c: 0.45. Rec 20 mm



b) Relación a/c: 0.65. Rec 20 mm



c) Relación a/c: 0.45. Rec 30 mm



c) Relación a/c: 0.65. Rec 30 mm

Gráfica 1. Comportamiento del potencial de corrosión en las probetas 1, 2 y 3 con relación a/c 0.45 y recubrimientos de 15, 20 y 30 mm

Gráfica 2. Comportamiento del potencial de corrosión en las probetas 4, 5 y 6 con relación a/c 0.65 y recubrimientos de 15, 20 y 30 mm.

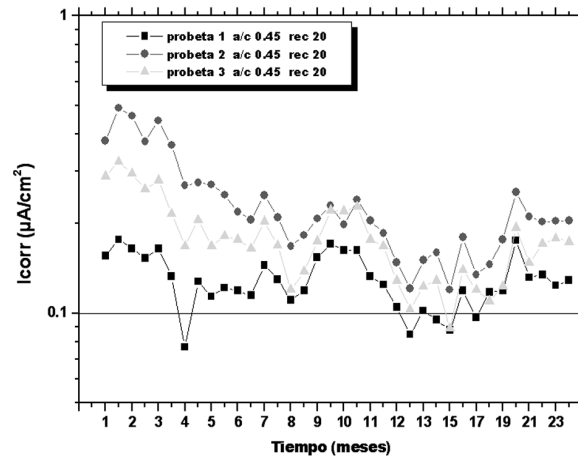
3.1 Velocidad de corrosión

La cinética de corrosión en el hormigón armado se obtuvo a través de mediciones de velocidades de corrosión que se analizan en las graficas del tipo semi-log de  $i_{corr}$  (intensidad de corrosión) obtenidas de cada una de las probetas estudiadas, en el tiempo estimado. Además, se realizo de acuerdo a la referencia internacional DURAR, ver Tabla 2 (Trocónis et al., 1998).

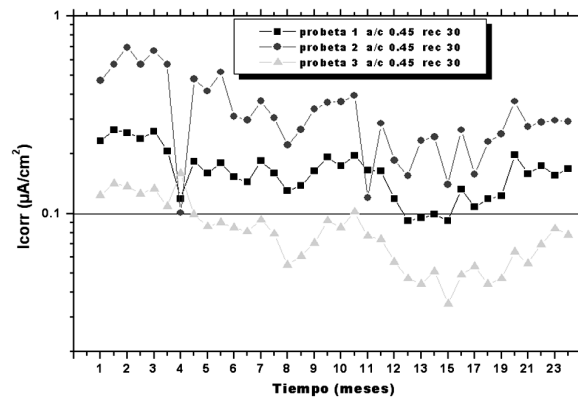
Tabla 2. Clasificación de  $i_{corr}$  en términos de vida útil

$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

En la Gráfica 3 (incisos a-c) correspondientes a las probetas 1-3 con relación a/c de 0.45 se observan los siguientes comportamiento de  $i_{corr}$ . En el recubrimiento de 15mm (inciso a), la  $i_{corr}$  se encuentra en el intervalo de 0.10 a 0.45  $\mu A/cm^2$  lo cual permite clasificarlo como una corrosión de nivel moderado, basándose en los criterios del DURAR. El recubrimiento de 20 mm tuvo un comportamiento descendente, lo que permite identificar que la corrosión de la armadura se está pasivando (corrosión moderada) dado que la  $i_{corr}$  está en un intervalo de 0.1 a 0.5  $\mu A/cm^2$ . En el caso del recubrimiento de 30 mm, inciso c, comienza con una velocidad de corrosión elevada de 0.5  $\mu A/cm^2$  los primeros 4 meses de exposición, y con el paso del tiempo se vuelve una corrosión moderada, y en el caso de las otras 2 probetas el comportamiento se muestra de manera muy diferente debido a que sus valores no varían con respecto al tiempo, presentando una velocidad de corrosión de tipo moderada.

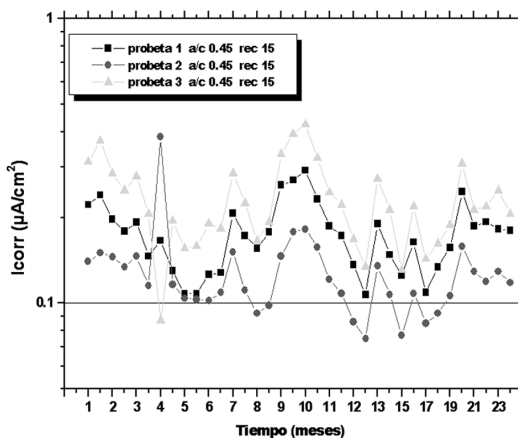


b) Relación a/c: 0.45. Rec 20 mm



c) Relación a/c: 0.45. Rec 30 mm

Gráfica 3. Comportamiento de la intensidad de la corriente en las probetas 1, 2 y 3 con relación a/c 0.45 y recubrimientos de 15, 20 y 30 mm

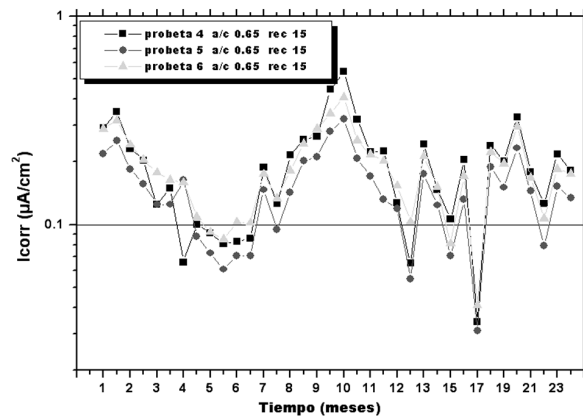


a) Relación a/c: 0.45. Rec 15 mm

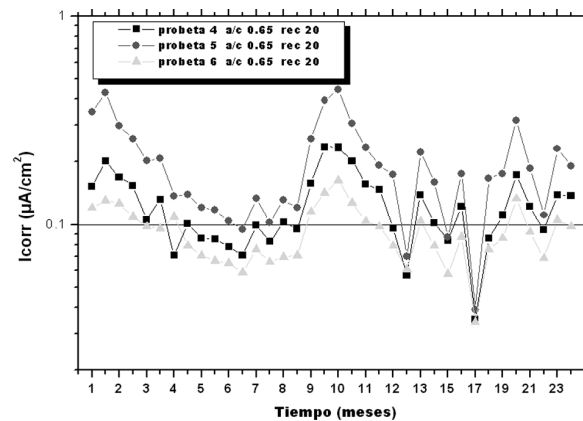
En las probetas 4-6 con relación a/c de 0.65 (ver Gráfica 4, incisos a-c). Según el comportamiento del recubrimiento de 15 mm para las probetas 4-6, se observa que los valores de velocidad de corrosión son moderados, pero entre los meses 8-10 la velocidad de corrosión se incrementó sin llegar a niveles de corrosión elevada y posteriormente se mantiene en un estado de pasivacion. Las probeta 5 con recubrimientos de 20 mm (inciso b), presentaron las siguientes características: inicia con valores altos al principio de la exposición siendo de 0.5  $\mu A/cm^2$  y posteriormente descienden durante los primeros 9 meses de exposición; después de este tiempo se vuelve a generar una activación del sistema generalmente con valores por encima de la probeta 4 y 6 como muestra el patrón desarrollado por las 3 probetas. Actualmente, se encuentra en una velocidad de corrosión



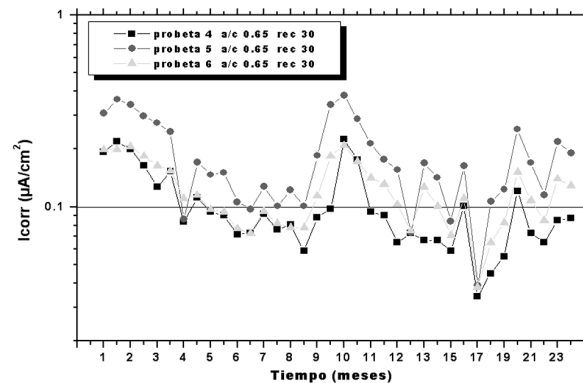
moderada en estado pasivo. Para el caso del recubrimiento de 30 mm se observan valores de velocidad de corrosión menores a  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  casi al final del monitoreo, considerándose una corrosión en niveles aun despreciables.



a) Relación a/c: 0.65. Rec 15 mm



b) Relación a/c: 0.65. Rec 20 mm



c) Relación a/c: 0.65. Rec 30 mm

Gráfica 4. Comportamiento de la intensidad de la corriente en las probetas 4, 5 y 6 con relación a/c 0.65 y recubrimientos de 15, 20 y 30

### 3.2 Registro de parámetros ambientales y meterequímicos de la zona de estudio

El registro de la humedad relativa y temperaturas a través de los 24 meses de exposición se puede observar en la Gráfica 5. En el caso de la humedad relativa se observan los niveles máximos, medios y mínimos mensuales reportados por la estación climatológica del CIMAV, lugar donde se tiene la estación de monitoreo, para el caso los meses de julio a octubre donde el humedecimiento del ambiente es mayor en relación a los otros meses, aunado al incremento de las temperaturas ambientales, las cuales también son mayores en estas épocas de verano alcanzando los  $35^\circ\text{C}$ . Es importante observar la relación del comportamiento de los parámetros electroquímicos en estas fechas (ver Gráficas 1,2,3 y 4), ya que concuerdan con una moderada activación del sistema a través de la lectura de los potenciales e intensidades de corriente de corrosión, aunque de acuerdo a la magnitud y sobre todo por la permanencia de las mismas, no se pueden considerar de mucha influencia ya que después de esta temporada se presenta una desecación por reducciones en los valores de estos parámetros.

Por lo anterior se puede señalar que a medida que hay un incremento de la humedad, los potenciales de corrosión tienden a ser más activos (valores más negativos) y esto se ve mayormente reflejado en la intensidad de corrosión donde se observa más el incremento de este parámetro porque el sistema de corrosión se activa. En el caso de la temperatura, este factor no afecta tan directamente los parámetros electroquímicos como el caso de la humedad relativa.

De acuerdo con los ensayos meterequímicos, las probetas son expuestas en la estación de ensayo, catalogada como una zona urbano-industrial en Chihuahua, México, (latitud  $28^\circ-38'-07''$ , longitud  $106^\circ-00'-40''$ , 1380 m altitud snm). Los parámetros se muestran en la Tabla 3.

Los valores mostrados en la Tabla 3 nos indican el tipo de atmósfera que se presenta en la zona, presentando en el caso de la humedad relativa un promedio de 37 %, condición de lugar poco húmeda, tendiendo a largos periodos de tiempo por debajo aun del valor medio en el año. Esto lo respalda el análisis de factor de tiempo de humectación, el cual por su magnitud, es catalogada como una atmósfera baja según norma ISO 9223.

En el caso del contenido del ión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), los datos obtenidos de sus concentraciones atmosféricas nos indican un bajo

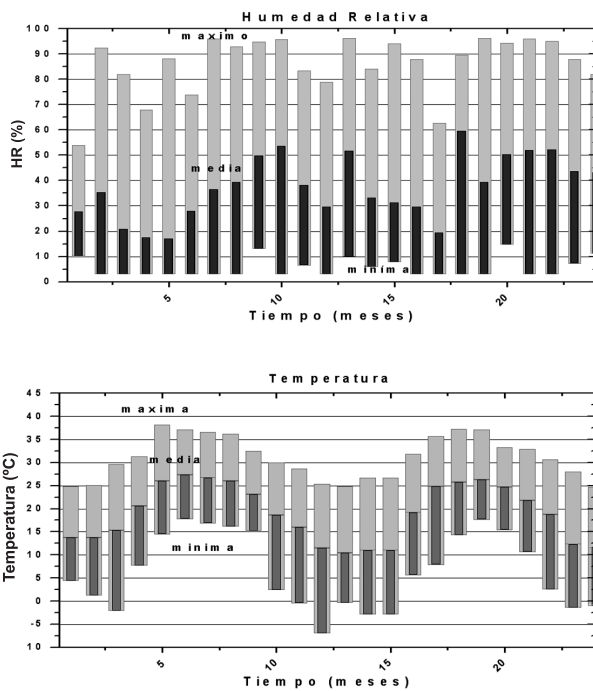


### 4. Conclusiones

Después de 24 meses de exposición de las probetas de hormigón armado se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los valores de los potenciales de corrosión observados en la armadura de refuerzo de las probetas tanto para la relación  $a/c = 0.65$  y  $0.45$  se comportan más activos en los primeros meses de exposición. Sin embargo, conforme aumenta el tiempo de exposición los potenciales se vuelven más nobles, esto se debe en gran parte a las bajo nivel de humedad relativa promedio que se presentan en la región no permitiendo el desencadenamiento de un sistema de corrosión activo permanente, tendiendo a presentar una escasa probabilidad de corrosión, de acuerdo con los criterios de interpretación ASTM C-876-91.
2. El comportamiento de la velocidad de corrosión  $i_{corr}$  en las probetas es de un nivel de corrosión moderado de acuerdo a la referencia internacional de valores de intensidad de corriente propuesto por el DURAR para hormigón armado. Esto se debe a la baja agresividad de los fenómenos climatológicos, al menos en el caso de la humedad relativa, la cual no genera una influencia importante en esta zona. Además, se puede concluir de acuerdo al comportamiento de estas gráficas, que el sistema en la actualidad se encuentra en estado pasivo tanto para la relación  $a/c$  de  $0.45$  como para la de  $0.65$ .
3. En los tres tipos de recubrimientos  $15, 20, \text{ y } 30 \text{ mm}$ , hasta la fecha no se tiene alguna diferencia notable en cuanto a los valores de potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ), ni en los de intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ), ya que sus valores para ambos parámetros se encuentran en rangos que van desde niveles despreciables hasta moderados de corrosión, esto se le puede atribuir también a la baja agresividad atmosférica que prevalece en el lugar.
4. En cuanto a los parámetros de humedad relativa (HR) y factor de humectación (fTDH), se observan valores que reflejan una atmósfera catalogada como de agresividad corrosiva baja según norma internacional ISO 9223, ya que en primer termino se tienen humedades relativas con valores promedio por debajo de la considerado para activar al sistema y desencadenar la corrosión en la armadura, y esto se puede comprobar con los valores del factor de humectación (fTDH) que se encuentran en porcentajes muy bajos en relación a otras zona con altas concentraciones de humedad como son las marinas, aunado todo esto a las bajas cantidades de precipitación que se registran en la zona de ensayo.

contenido de cloruros, aún considerando valores máximos presentados como  $0.077$ , siendo que la norma ISO 9223 nos indica que hasta  $3 \text{ (mg/m}^2\text{día)}$  se catalogaría como una atmósfera de muy baja agresividad corrosiva por este agente. Para el  $\text{SO}_2$ , si se toma en cuenta su valor medio de  $35.7$ , también nos presenta características de categoría baja para la zona de ensayo. Por último, el dióxido de carbono se ha mantenido en niveles moderados, aunque en los últimos meses se han determinado los valores máximos de  $2.23 \text{ mg/lit}$ , lo cual propicia una alteración en el proceso de carbonatación del hormigón.



Gráfica 5. Registro de la humedad relativa y temperatura ambiente

Tabla 3. Parámetros meterequímicos de la estación de Chihuahua, México

Parámetros	HR (%)	T (°C)	fTDH	Precipitación (mm)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> día)	CO <sub>2</sub> (mg/lto)
Mínimo	-	-7.0	0.000	00.0	1.30	0.0000	0.63
Media	37.0	19.7	0.031	29.5	35.70	0.0067	1.36
Máximo	96.3	37.2	0.150	83.2	99.13	0.0770	2.23

5. Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_2$  son relativamente bajas según norma internacional ISO 9223, sobre todo en la parte de cloruros, lo que confirma la baja agresividad corrosiva para el hormigón armado en una zona seca y a su vez, se constituye una influencia cíclica en las demás variables como consecuencia de este tipo de medio ambiente, como son los potenciales de corrosión e intensidad de corriente.

## 5. Referencias

- American Society for Testing and Materials. (1991), ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM, Philadelphia, USA.
- Andrade C. (1988), Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, CSIC, Madrid, España.
- Andrade C. (1993), "Calculation of Chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements". Cement and Concrete Research, 23, 724-742.
- Castro P., Castillo R. y Carpio J.J. (1998), Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnostico, Vida útil y Reparaciones, 1ª edición, IMCYC, México (1998)
- ISO 9223 (1991), "Corrosion of metals and alloys. Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres".
- Lewis D.A. y Copesnhagen W. J. (1957), Industrial Chemist. Vol.11 No. 10.
- Oladis Trocónis de Rincón y Miembros de la Red Durar. (1998), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". CYTED. ISBN 980-296-541-3 Maracaibo, Venezuela. 1997(1era. Edición). 1998, 2da. Edición.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico al Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV), CONACYT y al Programa de Mejoramiento al Profesorado PROMEP de la Secretaria de Educación Publica SEP. Así mismo también se agradece a los técnicos académicos del Laboratorio de Corrosión y Protección (M.C. Adán Borunda Terrazas y M.C. Víctor M. Orozco Carmona) y Laboratorio de Ambiental del CIMAV (Ing. Elías Ramírez, M.C. Alfredo Campos, Ing. Daniel Lardizábal).