

Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (proyecto DURACON)

Moreno E. I.¹, Ayuso-Blanco F.², Torres-Acosta A. A.³ y Troconis-Rincón O.⁴

Fecha de recepción: 8 de junio de 2009- Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2009

RESUMEN

El Proyecto DURACON XV.3 (Durabilidad del Concreto) es financiado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y varias instituciones en Latinoamérica. Su objetivo es evaluar la durabilidad del concreto reforzado contra la corrosión en climas de Latinoamérica, España y Portugal. Especímenes de concreto de dos relaciones agua-cemento han sido preparados en cada país participante y expuestos en varios sitios representativos (en ambientes marinos y no marinos) de los principales climas de cada región. México participa con 15 sitios de exposición distribuidos a lo largo de nuestras principales ciudades y costas. Parámetros electroquímicos como la resistencia a la polarización, resistividad eléctrica del concreto, y potenciales de corrosión, así como parámetros climáticos como temperatura, precipitación pluvial, humedad relativa, dióxido de carbono, tiempo de humectación, tiempo de insolación, etc., son algunos de los datos medidos. Adicionalmente, la concentración de cloruros y el frente de carbonatación fueron medidos en períodos programados. El sitio de exposición en Mérida, Yucatán, está localizado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, la cual está localizada en el norte de la ciudad, aproximadamente a 30 km de la costa. El objetivo de este trabajo es discutir los principales resultados y las tendencias de las mediciones de corrosión después de cuatro años de exposición en este ambiente urbano.

Palabras clave: carbonatación, concreto, corrosión, durabilidad, ambiente.

Effect of the environment on reinforced concrete after four years of urban exposure in Yucatán (DURACON project)

ABSTRACT

Project DURACON XV.3 (Durability of concrete) is sponsored by The Iberoamerican Program for Science and Technology (CYTED) and several Institutions in Latin-America. Its aim is to evaluate the durability of reinforced concrete against corrosion in Latin-American, Portuguese, and Spanish climates. Concrete specimens with two water-cement ratios have been set in each participant countries and distributed at several exposure sites (marine and non-marine environments) that are representative of the main climates from each region. México participates with 15 exposure sites distributed along our coasts and main cities. Electrochemical parameters such as polarization resistance, electrical concrete resistivity, and corrosion potential as well as climatic parameters like temperature, rainfall, relative humidity, carbon dioxide, time of wetness, time of insolation, etc., are some of the measured data. Also, the chloride concentration and the carbonation front in concrete were measured at scheduled times. The exposure site at Mérida, Yucatán, is located at the Facultad de Ingeniería campus, which is located north of the city and, approximately, 30 km away from the coast. The objective of this paper is to discuss the main results and tendencies of the corrosion measurements after four years of exposure to this urban environment.

Keywords: carbonation, concrete, corrosion, durability, environment.

¹ Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Miembro Red DURACON. Email: emoreno@uady.mx

² Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Estudiante de maestría en ingeniería

³ Instituto Mexicano del Transporte, Coordinador Nacional Red DURACON

⁴ Universidad del Zulia, Coordinadora Internacional Red DURACON

INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo es la más habitual entre las principales causas del deterioro de las estructuras de concreto reforzado (Neville 1999). Las investigaciones relacionadas con la corrosión del acero de refuerzo han estado especialmente enfocadas en el estudio de las causas y mecanismos de deterioro, desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto a nivel de laboratorio como “in situ”) y al empleo de métodos de protección (Troconis-Rincón *et al.* 2003). En los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de las estructuras de concreto reforzado con el fin de programar eficientemente las acciones de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo (ACI 365 2000).

Sin embargo, la carga ambiental localizada puede crear microclimas donde el desempeño de un elemento de concreto sea diferente de una región a otra (Castro *et al.* 2000). Sin tomar en cuenta dicho efecto ambiental, la predicción de la vida útil estaría comprometida. Con el fin de determinar el impacto de la carga ambiental regional en el concreto, se desarrolló un proyecto CYTED a nivel Iberoamericano para evaluar este impacto ambiental en elementos de concreto reforzado. El proyecto cuenta con la participación de once países incluyendo a México (Troconis-Rincón *et al.* 2006).

A nivel nacional se cuenta con quince estaciones, nueve urbanas y seis marinas, ubicadas en los estados de Baja California, Campeche (3 estaciones), Chihuahua, México, Michoacán, Oaxaca, Querétaro, Tamaulipas, Yucatán (2 estaciones) y Veracruz (2 estaciones), así como en el Distrito Federal, para así abarcar gran parte del país.

El objetivo de este trabajo se concentra en la presentación de los resultados obtenidos en la estación urbana del Estado de Yucatán después de cuatro años de exposición, la cual se encuentra ubicada en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. La Facultad se localiza en la parte norte de la ciudad de Mérida, a 30 km de la costa norte de la Península de Yucatán.

METODOLOGÍA

Se utilizaron relaciones agua-cemento (a/c), de 0.65 y 0.45. El cemento empleado fue cemento pórtland ordinario resistente a sulfatos (CPO 30 RS), la grava fue silíceo de 19 mm, y la arena fue cuarzosa. Para el concreto de a/c de 0.65 se empleó una dosificación de cemento de 285 kg/m³, y 411 kg/m³ para a/c de 0.45.

El revenimiento fue de 10 cm y las probetas se curaron por 21 días en cámara de humedad.

Así mismo, se utilizaron dos tipos de probetas: de concreto simple de 15 x 15 x 30 cm, y reforzadas de las mismas dimensiones pero con seis barras de 9.5 mm con recubrimientos de 15, 20 y 30 mm de concreto; dos por recubrimiento (Troconis-Rincón *et al.* 2006). Dichas barras se encuentran protegidas con material epóxico en los extremos, dejando 30 cm² de acero libre, con el fin de forzar la interacción con los agentes agresivos a través de la cara lateral de las probetas de concreto.

Seis probetas de concreto simple y seis de concreto reforzado (3 por cada a/c) fueron colocadas en las estaciones de exposición. Como las probetas tenían una cara orientada a los vientos predominantes y la otra oculta, las probetas en la estación Mérida se colocaron en el sentido norte-sur con las caras de prueba orientadas al este (vientos predominantes) y oeste (protegida de los vientos), ya que los vientos predominantes en Mérida son ESE y ENE (Mérida 2008).

Una estación meteorológica localizada en las instalaciones de la Facultad proporcionó los parámetros climáticos de temperatura, precipitación pluvial, humedad relativa, dióxido de carbono, tiempo de humectación, tiempo de insolación, y velocidad del viento.

Para medir la corrosión del acero de refuerzo se obtuvo la velocidad de corrosión medida a partir de la resistencia a la polarización, el valor de la diferencia de potencial entre el acero y un electrodo de referencia, y también por medio de la resistencia del concreto, datos que fueron obtenidos utilizando un corrosímetro equipado con un anillo de guarda (Troconis-Rincón *et al.* 2007).

Después de uno y tres años de exposición, se retiraron secciones de 5 cm de espesor de los especímenes de concreto simple, para la determinación de la profundidad de carbonatación y la concentración de cloruros. La determinación de la carbonatación del concreto se realizó mediante el rociado de una solución alcohólica al 1% de fenolftaleína sobre la superficie recién expuesta del concreto (Moreno *et al.* 2004).

Adicionalmente, posterior a la pulverización de muestras de concreto tomadas de los especímenes, se determinó la concentración de cloruros utilizando el método de digestión ácida de acuerdo a la norma ASTM C 1152 (2004). Posteriormente, la

determinación de la concentración se realizó mediante el método de adiciones conocidas empleando un electrodo de ión selectivo de cloruros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros climáticos

La figura 1 muestra la precipitación mensual durante los cuatro años de exposición. Las precipitaciones anuales han sido de 808, 765, 849 y 795 mm, bastante estables.

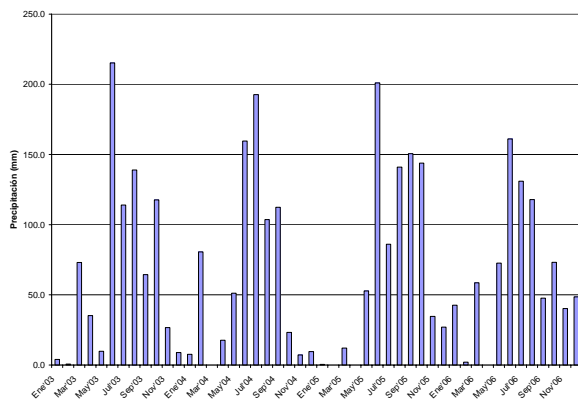


FIGURA 1. Precipitación mensual en la estación Mérida.

Las temperaturas promedios mensuales son mostradas en la figura 3. En esta figura se aprecia que la temperatura promedio anual está alrededor de los 24°C, aunque los promedios máximos y mínimos mensuales varían entre 37 y 13°C. Se constata que, para el período de análisis, todas las temperaturas son mayores de 0°C, lo que permite considerar todos los períodos con 80% o más de humedad relativa para el

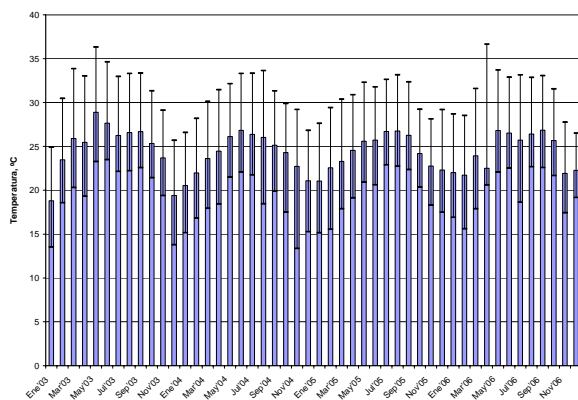


FIGURA 3. Temperatura mensual promedio.

Finalmente, la radiación solar y la velocidad de viento se presentan en las figuras 5 y 6, respectivamente. El promedio de radiación solar anual ha sido de 165, 187, 176 y 158 W/m². Por otra parte, el promedio

La figura 2 presenta la humedad relativa promedio mensual, así como el promedio mensual de las humedades máximas y mínimas diarias. La humedad relativa promedio se ha mantenido durante los cuatro años entre 73 y 74 %. Sin embargo, el promedio de los valores mínimos y máximos de la humedad relativa varía, entre 47 y 91 %.

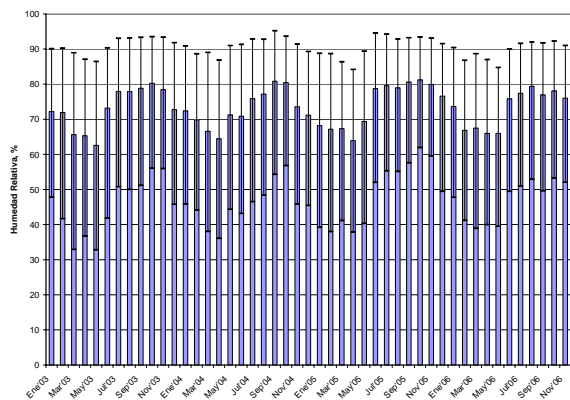


FIGURA 2. Humedad relativa mensual promedio.

cálculo del tiempo de humectación, el cual se presenta en la figura 4. En los cuatro años, el promedio anual se ha conservado alrededor del 45% anual. Estos valores de humedad y temperatura son adecuados para desarrollar velocidades de corrosión importantes una vez que la barra de acero se ha despasivado.

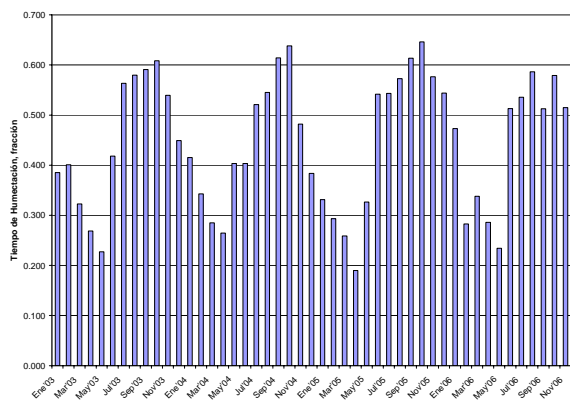


FIGURA 4. Tiempo de humectación mensual.

anual de la velocidad de viento ha sido de 13, 16, 15 y 14 m/s. En adición a estas pruebas, se determinó la concentración ambiental del dióxido de carbono, encontrándose valores que oscilan entre 440 y 480

ppm. Inicialmente, la agresividad del medio se había clasificado como C3 en base al tiempo de humectación, y depositación de cloruros y azufre (Ayuso Blanco 2005). Durante los cuatro años de

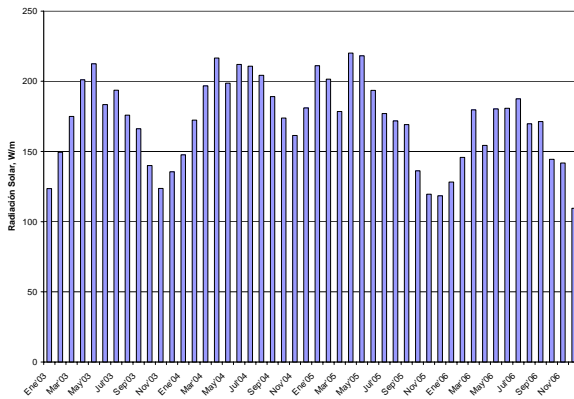


FIGURA 5. Radiación solar promedio mensual.

exposición, los parámetros se han mantenido estables por lo que no se justifica un cambio en dicha clasificación.

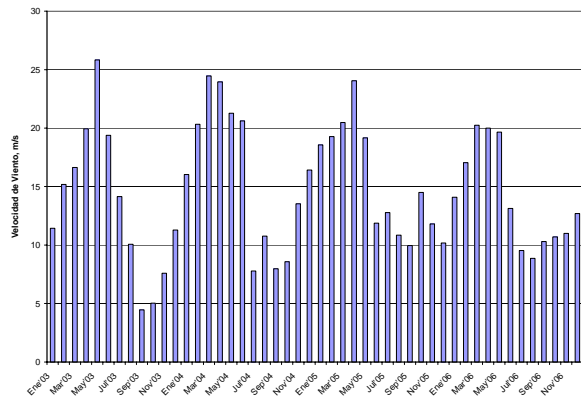


FIGURA 6. Velocidad del viento promedio mensual.

Pruebas electroquímicas

Los promedios de los potenciales de media celda se presentan en las figuras 7 y 8 para las probetas de a/c de 0.65, de las barras expuestas y protegidas de los vientos predominantes, respectivamente. En ambos casos se aprecia un comportamiento pasivo durante el tiempo de exposición, ya que los potenciales se

mantienen más positivos que -200mV. Durante los primeros 400 días se observó una tendencia hacia valores más nobles, con una estabilización posterior. Esta tendencia hacia valores más nobles también fue reportada por la estación de Chihuahua durante sus primeros dos años de exposición (Rodríguez Ramírez et al. 2005).

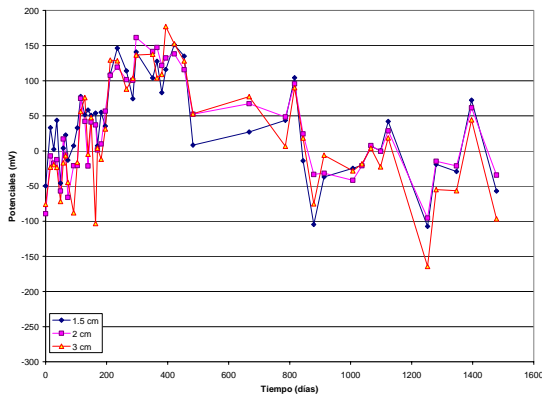


FIGURA 7. Potenciales en las probetas a/c = 0.65, expuestas a los vientos predominantes.

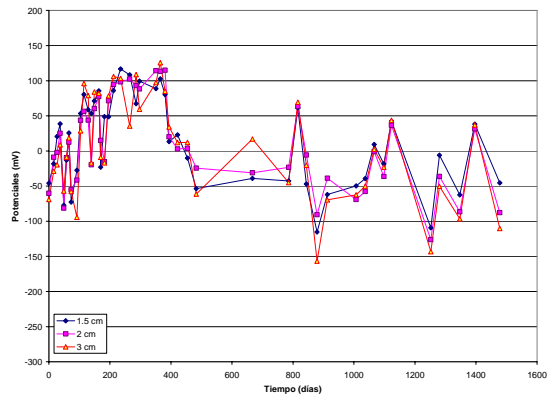


FIGURA 8. Potenciales en las probetas a/c = 0.65, protegidas de los vientos predominantes.

Por otra parte, los promedios de las probetas de a/c de 0.45 se presentan en las figuras 9 y 10, también para el caso de las barras expuestas y protegidas a los vientos, respectivamente. En este caso también se observan valores asociados normalmente con un comportamiento pasivo, aunque con valores más

negativos que en las probetas de a/c de 0.65, ya que son más positivos que -250mV (Ayuso Blanco 2005). También en este caso se observa una tendencia similar hacia valores más nobles durante los primeros 400 días.

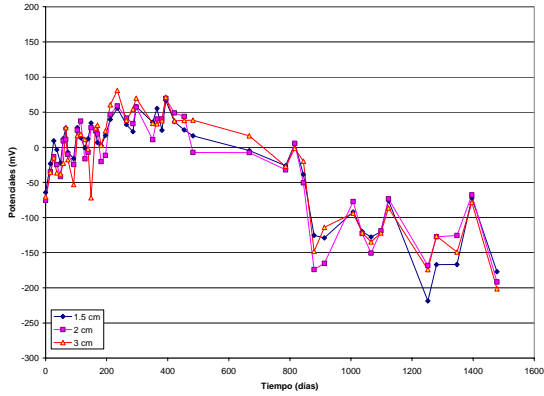


FIGURA 9. Potenciales en las probetas $a/c = 0.45$, expuestas a los vientos predominantes.

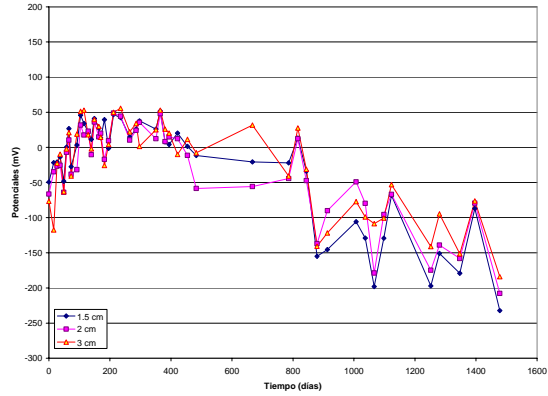


FIGURA 10. Potenciales en las probetas $a/c = 0.45$, protegidas de los vientos predominantes.

Los promedios de las densidades de corriente de corrosión se presentan en las figuras 11 y 12 para las probetas de a/c de 0.65, tanto para las barras expuestas a los vientos predominantes como

protegidas de ellos. En ambos casos se aprecia un comportamiento pasivo por debajo de $0.1 \mu A/cm^2$, valor considerado como umbral de corrosión (Troconis-Rincón *et al.* 2003).

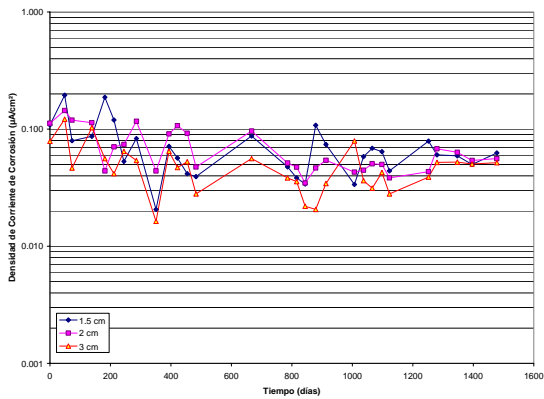


FIGURA 11. Velocidades de corrosión en las probetas $a/c = 0.65$, expuestas a los vientos predominantes.

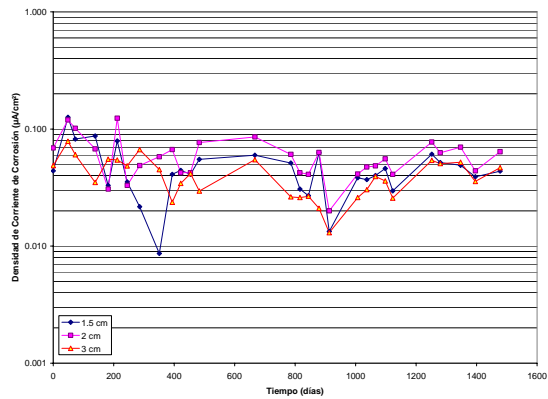


FIGURA 12. Velocidades de corrosión en las probetas $a/c = 0.65$, protegidas de los vientos predominantes.

Los promedios correspondientes a las probetas de a/c de 0.45, de las barras expuestas y protegidas a los vientos predominantes, se presentan en las figuras 13 y 14, respectivamente. En ambos casos se mantiene el comportamiento pasivo observado en las otras probetas de mayor relación a/c . Estos valores

contrastan con los reportados por la estación de Chihuahua (Rodríguez Ramírez *et al.* 2005), en donde se observaron valores moderados de corrosión (entre 0.1 y $0.5 \mu A/cm^2$) durante sus primeros dos años de exposición a pesar de presentar valores de potencial pasivos.

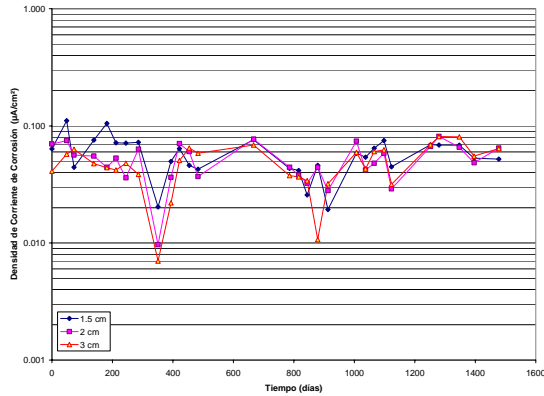


FIGURA 13. Velocidades de corrosión en las probetas a/c = 0.45, expuestas a los vientos predominantes.

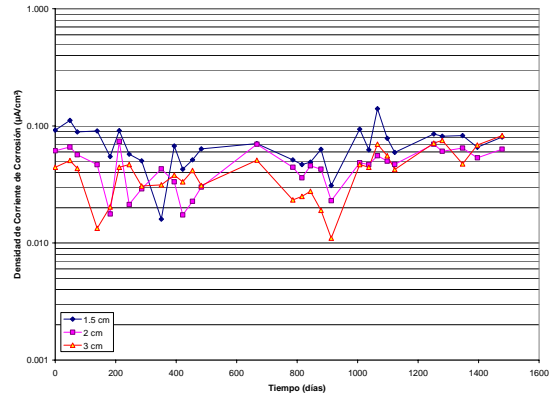


FIGURA 14. Velocidades de corrosión en las probetas a/c = 0.45, protegidas de los vientos predominantes.

Carbonatación y concentración de cloruros

Las profundidades de carbonatación a uno y tres años de exposición se presentan en la tabla 1 para las probetas de a/c de 0.65, y en la tabla 2 para las de 0.45. Los valores de los coeficientes de carbonatación (k) presentan cierta inestabilidad, aunque ésta era esperada en los primeros años. Por lo tanto, los coeficientes a tres años se consideran más representativos que los primeros. Con esto en cuenta,

se aprecia un mayor coeficiente de carbonatación en la cara expuesta que en la cara protegida para ambas relaciones agua/cemento. Adicionalmente, los valores de k obtenidos para la a/c de 0.65 (3.6 mm/año^{1/2}) son menores que los obtenidos en otra investigación con agregados locales para una a/c de 0.62 (4.8 mm/año^{1/2}), enfatizando con esto la calidad de las probetas de concreto (Moreno et al. 2004).

TABLA 1. Profundidad y coeficientes de carbonatación en probetas de a/c de 0.65.

Edad (año)	Probeta	Cara expuesta a los vientos dominantes		Cara protegida de los vientos dominantes	
		e _{CO2} (mm)	k (mm/año ^{1/2})	e _{CO2} (mm)	k (mm/año ^{1/2})
1.15	1	5.77	5.37	5.80	5.40
	2	3.60	3.35	2.50	2.36
	3	4.47	4.16	1.97	1.83
	Promedio	4.60	4.30	3.40	3.20
3.00	1	7.20	4.16	6.01	3.47
	2	5.51	3.18	3.95	2.28
	3	6.14	3.54	5.57	3.22
	Promedio	6.28	3.63	5.18	2.99

TABLA 2. Profundidad y coeficientes de carbonatación en probetas de a/c de 0.45.

Edad (año)	Probeta	Cara expuesta a los vientos dominantes		Cara protegida de los vientos dominantes	
		e _{CO2} (mm)	k (mm/año ^{1/2})	e _{CO2} (mm)	k (mm/año ^{1/2})
1.15	1	0.00	0.00	0.57	0.53
	2	0.67	0.62	0.37	0.34
	3	1.47	1.37	1.03	0.96
	Promedio	0.70	0.70	0.70	0.60
3.00	1	2.07	1.20	0.53	0.31
	2	2.41	1.39	1.38	0.80
	3	2.40	1.39	2.06	1.19
	Promedio	2.29	1.32	1.32	0.76

En las figuras 15 y 16 se presentan los perfiles de cloruros solubles en ácido en % por peso de cemento (% ppc), a tres años de exposición, para las probetas de a/c de 0.65 y 0.45, respectivamente. La distancia 0 cm coincide con la superficie de la cara expuesta a los vientos dominantes y la distancia 15 cm coincide con la superficie de la cara protegida de los vientos. En cada figura se marcan los límites a 0.1 y 0.2 % ppc

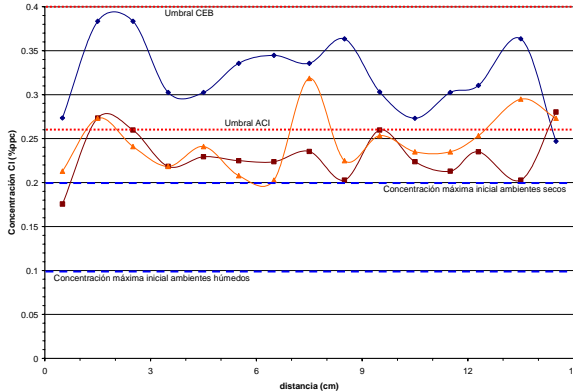


FIGURA 15. Concentración de cloruros ácido-solubles en las probetas a/c = 0.65 en % por peso de cemento después de 3 años de exposición.

En el caso de las probetas de a/c de 0.65, el material contiene una cantidad mayor de la recomendada para un concreto que será expuesto a cloruros en ambientes secos o húmedos; en el caso de las probetas de a/c de 0.45, esto sólo sucede para el caso de ambientes húmedos. En el caso de los umbrales de corrosión, para las probetas de 0.65, los valores a 2 cm de profundidad están en la cercanía, o ligeramente por arriba, del umbral propuesto por el ACI. Sin embargo, el efecto esperado de estas concentraciones no se refleja en los valores de potencial y de densidad de corriente de corrosión medidos. De hecho, la baja concentración observada en las probetas de a/c de 0.65 en el primer centímetro de profundidad, ligado con el aumento en el segundo centímetro, estaría asociada principalmente con la carbonatación observada en estas probetas (Moreno 2000), y no con un ingreso significativo de cloruros desde el exterior. Por lo tanto, tomando en cuenta el cambio en la concentración de cloruros por peso de cemento entre ambas relaciones a/c, este aumento en las probetas de a/c de 0.65 estaría relacionado al aumento de material pétreo, principalmente arena, por el cambio de a/c siguiendo el método de diseño del ACI.

CONCLUSIONES

- Los parámetros climáticos han presentado consistencia durante los cuatro años que se han monitoreado, con valores de humedad y

sugeridos por el ACI 222 para concretos recién colados que se van a exponer a cloruros en ambientes húmedos y secos, respectivamente (ACI 222 2001). Adicionalmente, se marcan los límites de umbral de cloruros sugeridos por el ACI (0.26 % ppc) y el CEB (0.4 % ppc) como iniciadores de la corrosión (ACI 222 2001).

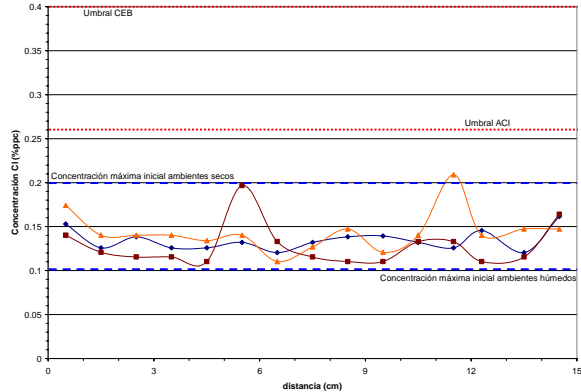


FIGURA 16. Concentración de cloruros ácido-solubles en las probetas a/c = 0.45 en % por peso de cemento después de 3 años de exposición.

temperatura suficientes para desarrollar velocidades de corrosión importantes una vez que la superficie de acero se despasive.

- Las probetas de acero de ambas a/c se encuentran pasivas después de cuatro años de exposición en ambiente urbano, por lo que el efecto de la carga ambiental aun no es patente.
- Las concentraciones de cloruros encontradas en las probetas de a/c de 0.65 están por arriba de las normas aceptadas para concretos recién colados de elementos expuestos a cloruros en ambientes secos o húmedos; para las probetas de a/c de 0.45, las concentraciones están por arriba de lo permitido sólo en el caso de elementos expuestos a cloruros en ambientes húmedos.
- Las altas concentraciones de cloruros son atribuibles al material pétreo, principalmente a la arena, y no a un ingreso de cloruros desde el exterior.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al CYTED-CONACYT, al IMT, a la Universidad Autónoma de Yucatán y al CINVESTAV el apoyo parcial para realizar la investigación. Así como a P. Castro, F. Ayuso, A. Nadal, E. Marquez, F. Cauich y M. Balancan por su colaboración en la ejecución de algunas de las pruebas reportadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 222 (2001). Protection of metals in concrete against corrosion. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- ACI 365 (2000). Service-life prediction—State-of-the-art report. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- ASTM C-1152 (2004). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Ayuso Blanco F. E. (2005). Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Castro P., Moreno E.I., Genescá J. (2000). Influence of Marine Climates on Carbonation of Reinforced Concrete Buildings. *Cement and Concrete Research* 30 (10), 1565-1571.
- Mérida (2008). Programa de ordenamiento ecológico territorial del municipio de Mérida, Yucatán. Ayuntamiento de Mérida.
- Moreno E. I. (2000). La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto. *Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 4 (2), 43-48.
- Moreno E. I., Domínguez Lara G. G., Cob Sarabia E. J., Duarte Gómez F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería—Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 8 (2), 117-130.
- Neville A. M. (1999). Tecnología del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México D.F.
- Rodríguez-Ramírez M., Almeraya-Calderón F., Gaona-Tiburcio C., Torres-Acosta A., Martínez-Villafañe A., Trocónis-Rincón O. (2005). Estudio de la corrosión de hormigón armado en un ambiente urbano-industrial—Proyecto DURACON. *Revista Ingeniería de Construcción*, 20 (2), 129-136.
- Trocónis-Rincón O., Romero de Carruyo A., Andrade C., Helene P., Díaz I. (2003). DURAR – Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. CYTED, Maracaibo.
- Trocónis-Rincón O., Andrade C., Barbosa M., Irassar F., Montenegro J. C., de Lima M. G., Helene P., Vera R., Carvajal A. M., de Gutiérrez R. M., del Basto S., Saborio E., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Castro-Borges P., Moreno E. I., Salta M., de Melo A. P., Martínez I., Castellote M., Rodríguez G., Derrégibus M., Sánchez M., de Partidas E. A., Fernández R. (2006). Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment*, 41 (7), 952-962.
- Trocónis-Rincón O., Sánchez M., Millano V., Fernández R., de Partidas E. A., Andrade C., Martínez I., Castellote M., Barbosa M., Irassar F., Montenegro J. C., Vera R., Carvajal A. M., de Gutiérrez R. M., Maldonado J., Guerrero C., Saborio-Leiva E., Villalobos A. C., Tres-Calvo G., Torres-Acosta A., Pérez-Quiroz J., Martínez-Madrid M., Almeraya-Calderón F., Castro-Borges P., Moreno E. I., Pérez-López T., Salta M., de Melo A. P., Rodríguez G., Pedrón M., Derrégibus M. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science*, 49 (7), 2832-2843.

Este documento se debe citar como:

Moreno E. I., Ayuso-Blanco F., Torres-Acosta A. A. y Troconis-Rincón O. (2009). **Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (proyecto DURACON)**. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 13-3, pp. 53-60, ISSN: 1665-529X.