

Deterioration of concrete structures due to carbonation in tropical marine environment and accelerated carbonation chamber

Emilio Chávez-Ulloa, Tezozomoc Pérez López*, Javier Reyes Trujeque, Francisco Corvo Pérez

*Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche.
Avenida Agustín Melgar S/N, Colonia Buenavista, Código Postal 24039,
San Francisco de Campeche, Campeche, México. Teléfono: 52(981) 811 98 00 ext. 62800;
Fax: 52(981) 811 98 00 ext. 62899. *tezperez@uacam.mx.*

Abstract

This study is focused to analyze deterioration of simple and reinforced concrete samples elaborated using two water/cement ratio compositions, exposed to tropical marine environment and accelerated carbonation chamber. Carbonation front determination and electrochemical measurements were carried out to monitor the effect of exposure conditions on concrete deterioration. A clear influence of relative humidity is observed over the neutralization reaction of the concrete paste. The carbonation front rate is affected by water/cement ratio. Measurements of corrosion electrochemical potential, corrosion rate and concrete resistivity, show a determinant influence of relative humidity on the concrete-steel interface condition, despite carbonation have reached or not the steel rebar.

Keywords: concrete, carbonation, tropical marine environment.

Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada

Resumen

El proceso de deterioro en vigas de concreto simple y reforzado fabricadas con dos relaciones agua/cemento expuestas en medio marino tropical y cámara de carbonatación acelerada es analizado mediante el seguimiento del avance del frente de carbonatación y ensayos electroquímicos. La reacción de neutralización de la pasta de concreto es fuertemente dependiente de la humedad relativa, observándose una clara diferencia en función de la relación agua/cemento y el efecto de secado originado por la acción del viento predominante en el sitio de exposición. Las mediciones de potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad del concreto muestran la influencia determinante de la humedad relativa sobre las condiciones de la interfase acero-concreto, tanto en las probetas sin carbonatar, como en las que el frente de carbonatación de la pasta alcanzó al refuerzo de acero.

Palabras clave: corrosión, concreto, carbonatación, ambiente marino tropical.

Introducción

La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto

reforzado, y en ambientes tropicales no marinos puede ser el principal mecanismo. Debido a la porosidad del concreto y las condiciones de humedad relativa en el medio ambiente de exposi-

ción, los poros pueden estar en diferentes condiciones de llenado y permitir el acceso de diversas sustancias. En el caso de saturación del poro el transporte de CO_2 es por difusión en medio acuoso, siendo muy lento el avance, del orden de 10^{-8} cm^2/s [1, 2], sin que represente un riesgo para el deterioro del concreto por carbonatación. Cuando la humedad relativa es muy baja, como ocurre en zonas desérticas y semiáridas, el CO_2 difunde en la fase gaseosa, pero la cantidad de agua retenida en los poros no es suficiente para que se lleve a cabo el proceso de carbonatación [3]. La condición más favorable para el avance de la carbonatación es cuando la humedad relativa del medio está en el intervalo de 60 a 75%; en ese caso, la mayor cantidad de agua se halla en la cercanía de las paredes del poro, y el centro se encuentra hueco, por lo que el CO_2 de la atmósfera puede ingresar a mayor profundidad y reaccionar con los álcalis presentes [4, 5].

La principal consecuencia de la carbonatación es la caída abrupta del pH alcalino de la disolución poro del concreto que disminuye desde un valor promedio de 12,5 hasta un valor cercano a 8,3 en las zonas completamente carbonatadas, aunque se ha comprobado que este fenómeno tiene varias etapas con valores de pH entre 11,3 y 9,5. Cuando el frente de carbonatación llega hasta el acero de refuerzo, la película pasiva que lo protege pierde estabilidad termodinámica [6]. La ruptura y destrucción de la película protectora de óxidos implica la pérdida de la pasividad y el incremento en la velocidad de corrosión [7].

En la Península de Yucatán se han llevado a cabo mediciones de avance de carbonatación en edificios y en condiciones de laboratorio, reportando que los ciclos de humectación y secado, la distancia a la línea de costa y la humedad relativa son determinantes en dicho proceso [8]. En la Ciudad de San Francisco de Campeche, localizada en la parte occidental de la Península de Yucatán, los vientos dominantes son de tierra a mar [9], lo que le da particularidades al sitio que no han sido analizadas en relación a la carbonatación del concreto.

Debido a que el proceso de carbonatación requiere de periodos largos, se recurre a ensayos acelerados, con la finalidad de aproximar las condiciones de daño en periodos experimentales cortos. En este caso, se utilizó una cámara de carbo-

natación acelerada, a una concentración de CO_2 superior a la natural, así como temperatura y humedad relativa reportadas como propicias para el avance de la carbonatación [10]. El estudio se realizó en el Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche.

En este trabajo se analizaron los resultados de la exposición de muestras de concreto en medio marino tropical y en una cámara de carbonatación acelerada con el objeto de observar el comportamiento de especímenes de concreto bajo condiciones de humedad relativa, temperatura y concentración de CO_2 controlados. Se define con claridad el efecto de la humedad relativa del medio sobre la variación de los parámetros electroquímicos que gobiernan el proceso de corrosión.

Parte experimental

Elaboración de muestras

Se utilizaron materiales de construcción de la región, conocidos como grava (agregado grueso) producto de trituración de roca caliza propia de la Península de Yucatán y arena de mar (agregado fino) previamente lavada. Se hicieron las pruebas de absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a los requerimientos de la norma mexicana NMX C-111[11] (ASTM C 33) para la caracterización de los agregados. Se utilizó cemento Portland Tipo I, de marca comercial. Con la finalidad de visualizar la dispersión de propiedades del concreto elaborado, se hicieron 3 coladas con el mismo proporcionamiento. De cada colada, se elaboraron 2 muestras de concreto simple ($15 \times 15 \times 60$ cm) y 2 de concreto con acero de refuerzo ($15 \times 15 \times 30$ cm), para un total de 6 de concreto simple y 6 de concreto reforzado; a su vez, 4 cilindros para las pruebas de resistencia de compresión para cada colada. En ambos casos, se emplearon relaciones a/c 0,49 y 0,69 que corresponden a concretos de calidad media y baja respectivamente. En cada viga de concreto reforzado se embebieron varillas de acero de 0,95 cm de diámetro a 10, 20 y 30 mm de profundidad en relación transversal con respecto al borde. Las barras fueron recubiertas con pintura anticorrosiva, dejando sin recubrimiento una longitud de 15 cm en su centro para su libre exposición. El proporcionamiento de la mezcla se llevó a cabo bajo las recomendaciones de la Nor-

ma ACI 211 [12]. Las cantidades de materiales se anotan en la Tabla 1. Se utilizó un reductor de agua de marca comercial.

Se obtuvo el contenido de aire en el concreto fresco utilizando la norma NMX-C-157 [13] (ASTM C 138); al cumplir 28 días de curado, se midieron absorción y vacíos norma ASTM-C-642 [14] y resistencia a la compresión, norma NMX-C-83 [15] (ASTM C 39).

Exposición en medio natural

Una serie de probetas fabricadas con cada relación a/c 0,69 fueron colocadas en la azotea del Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP), ubicado en la línea de costa de la Ciudad de Campeche. Cada serie constó de 3 muestras con barra de acero y 3 de concreto simple para el seguimiento de la carbonatación.

Parámetros medio ambientales

Los datos registrados de temperatura, humedad relativa (HR), precipitación pluvial y velocidad de viento fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.

Cámara de Carbonatación Acelerada (CCA)

Se construyó una cámara de carbonatación acelerada con las siguientes dimensiones: 120 cm de largo por 40 cm de ancho y una altura de 90 cm. A un costado se instaló un tanque de CO₂ que permitía mantener dentro de la cámara una concentración cercana al 3%, de 80 a 100 veces mayor al existente en condiciones naturales. Este parámetro se registró de manera permanente empleando un sensor Teleaire (Modelo 7001). Por su parte, la humedad relativa y la temperatura se registró con un equipo HOBO Ware (Pro V2). Los primeros 6 meses la HR se mantuvo entre 65 y 70%, para favorecer la carbonatación del concreto. Al séptimo mes se incrementó al 90% con la finalidad de observar la activación de las varillas de acero como resultado de la carbonatación de la pasta.

Determinación del avance de carbonatación

Al llegar a 3, 6, 9 y 12 meses de exposición se hicieron cortes de la parte lateral de las vigas

de concreto simple a fin de dejar descubierta la sección transversal. La medición de la disminución del pH (neutralización) de la pasta de concreto se llevó a cabo con la aplicación de los indicadores ácido-base timolftaleína y fenolftaleína, precisando el avance con un vernier a partir del contorno de las caras laterales hacia el interior de la viga [16]. Las vigas fueron protegidas en los extremos y en las superficies horizontales a fin de evitar el proceso de difusión.

La profundidad de carbonatación (e_{co_2}) se calculó mediante la ecuación:

$$e_{\text{co}_2} = k t^{1/2} \quad (1)$$

donde: e_{co_2} es la profundidad de carbonatación (mm), k la constante de carbonatación (mm/año^{0.5}) y t el tiempo de exposición (años).

Ensayos electroquímicos

Las pruebas de potencial de corrosión (E_{corr}), resistividad (ρ) y velocidad de corrosión (i_{cor}) se realizaron con un potencióstato de campo de marca comercial.

Resultados

Propiedades físicas del concreto

La Tabla 2 presenta propiedades físicas y mecánicas después de 28 días de curado de las muestras fabricadas.

Condiciones de exposición

Cámara de ensayo acelerado. La Figura 1 muestra el registro de condiciones al interior de la CCA.

Registro de parámetros ambientales en medio natural. Las Figuras 2 y 3 presentan los datos registrados de precipitación pluvial y HR, que fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua.

Carbonatación. La Tabla 3 presenta los resultados del avance de carbonatación en las probetas de ensayo.

Mediciones electroquímicas

Potencial de corrosión (E_{corr}). La Figura 4 muestra los resultados de E_{corr} en la CCA. En el

Tabla 1
Proporción de materiales empleados para la elaboración del concreto

Contenido en Kg/m ³	Mezcla con relación a/c = 0,49	Mezcla con relación a/c=0,69
Cemento	50 kg	50 kg
Arena	155,73 kg	150,74 kg
Grava	302,54 kg	318,53 kg
Agua	24,55 kg	34,75 kg

Tabla 2
Propiedades del concreto con relación a/c 0,49 y 0,69 a 28 días

Mezcla	Relación a/c = 0.49				Relación a/c = 0.69			
	f'c (kg/cm ²)	Contenido de aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)	f'c (kg/cm ²)	Contenido de aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)
1	281	3,5	9,8	25,6	190	3,3	12,1	31,5
2	295	2,9	8,0	21,3	210	3,0	11,0	29,0
3	266	3,1	8,8	23,5	185	2,9	10,7	27,8
Promedio	280,67	3,17	8,87	23,47	195	3,07	11,27	29,43

f'c es la resistencia de compresión.

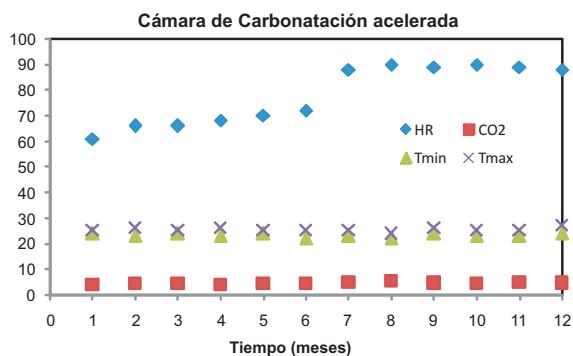


Figura 1. Registro de variables al interior de la Cámara de Carbonatación Acelerada (CCA). HR y CO₂ en %; Tmin y Tmax, en °C.

mismo gráfico se incluye la HR del medio y la concentración de CO₂ en la cámara. La Figura 5 muestra los resultados de Ecorr en medio natural. En el mismo gráfico se incluye la HR. Se reporta para las vigas con refuerzo, relación a/c 0,69 y 0,49.

Velocidad de corrosión. La Figura 6 muestra los resultados de Icorr en la CCA. En el mismo gráfico se incluye la HR del medio y la concentra-

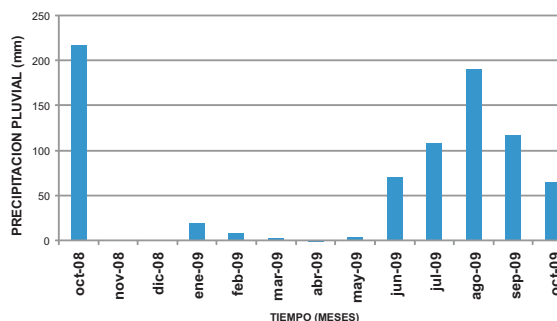


Figura 2. Registro mensual de la Precipitación.

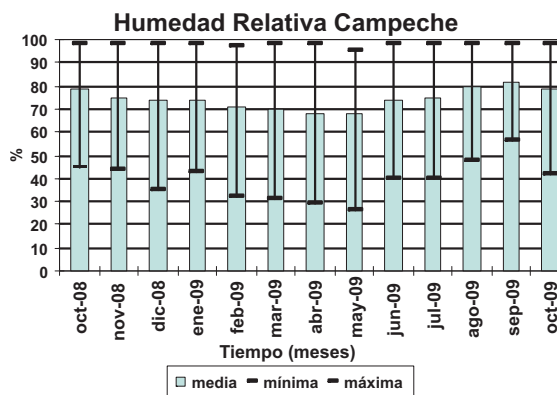


Figura 3. Registro mensual de la HR.

Tabla 3
Resultados del avance del frente de Carbonatación

Estación	Tiempo de exposición (año)	Mezcla Rel. A/C=0,69				Mezcla Rel. A/C= 0,49			
		Cara expuesta		Cara resguardada		Cara expuesta		Cara resguardada	
		e_{CO_2} (mm)	k (mm/año ^{0.5})	e_{CO_2} (mm)	k (mm/año ^{0.5})	e_{CO_2} (mm)	k (mm/año ^{0.5})	e_{CO_2} (mm)	k (mm/año ^{0.5})
CRIP	0,25	10	20	4	8	5	10	3	6
	0,50	18	25	8	11	10	14	5	7
	0,75	25	28	15	17	15	17	10	11
	1,00	40	40	30	30	24	24	20	20
CCA	0,25	40	80	35	70	20	40	17	34
	0,50	60	85	56	79	35	49	32	45
	0,75	75	86	72	83	45	52	43	49
	1,00	*	*	*	*	60	60	58	58

Cara expuesta: Superficie de la viga expuesta a la dirección de los vientos dominantes.

Cara resguardada: Superficie de la viga expuesta a la dirección contraria de los vientos dominantes.

*A nueve meses, ya se había alcanzado la carbonatación total de la viga.

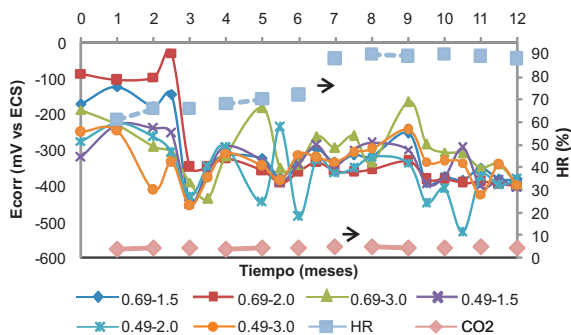


Figura 4. Ecorr vs tiempo en CCA.

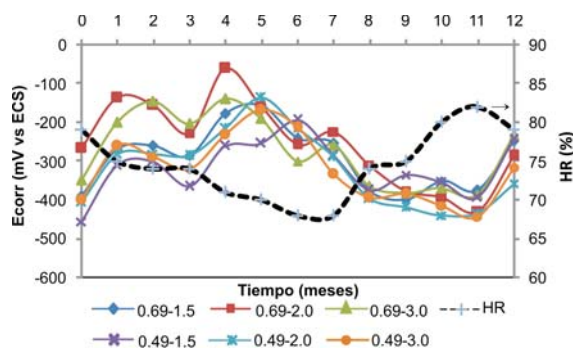


Figura 5. Ecorr vs tiempo en medio natural.

ción de CO₂ en la cámara. La Figura 7 muestra los resultados de Icorr en medio natural. En el mismo gráfico se incluye la HR.

Resistividad eléctrica, ρ . La Figura 8 muestra los resultados de ρ vs tiempo en CCA; la Figura 9 muestra los resultados de ρ en medio natural en ambos casos es en vigas con relación a/c 0,69 y 0,49.

Discusión

Propiedades físicas

Con los resultados reportados en la Tabla 2, se confirma la influencia de la relación a/c

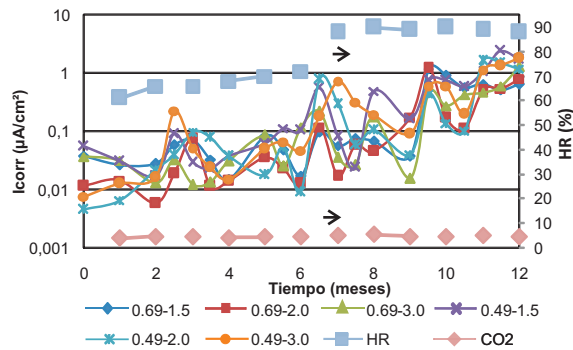


Figura 6. Icorr vs tiempo en CCA.

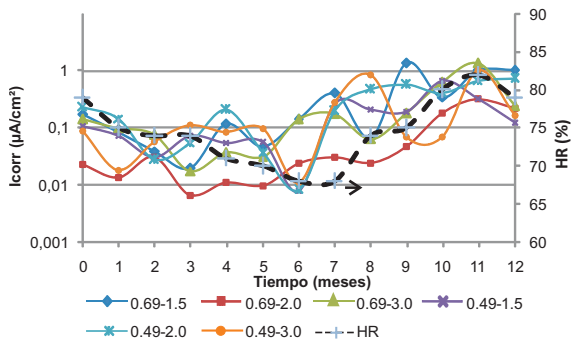


Figura 7. Icorr vs tiempo en medio natural.

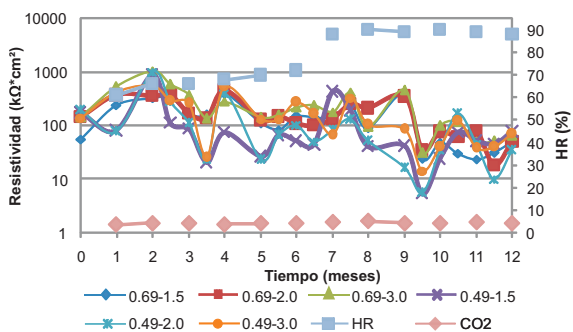


Figura 8. ρ vs tiempo para CCA.

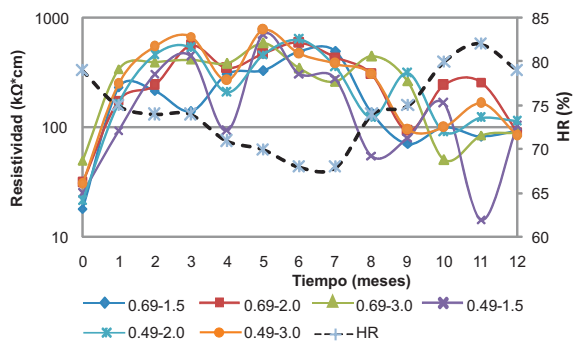


Figura 9. ρ vs tiempo en medio natural.

sobre la porosidad de las muestras y con ello la variación de la resistencia de compresión. A mayor relación a/c, las propiedades del concreto disminuyen en términos de durabilidad.

Carbonatación. La Tabla 3 muestra una clara influencia de la relación a/c en el avance de carbonatación. En cuanto al avance de carbonatación en las caras de los especímenes expuestos en condiciones naturales es debida a que el viento dominante influye en el secado de la superficie, siendo que arrastra el agua contenida en los

poros y la transporta a la atmósfera. En la cara resguardada el viento no es capaz de retirar la misma cantidad de agua de los poros y por lo tanto el avance de la carbonatación es diferente.

Relación de la HR con los parámetros electroquímicos

Cámara de carbonatación acelerada. En la Figura 4, se observa cómo en ambas relaciones a/c el potencial de corrosión (Ecorr) tiende a caer a valores inferiores a -350 mV en el tercer mes. De acuerdo al avance de carbonatación, en este lapso la neutralización ya alcanzó todas las varillas (15, 20 y 30 mm) en las probetas con relación a/c 0,69 y 15 mm para aquellas con relación a/c 0,49, estando muy próximas de las de 20 mm, lo que posiblemente se refleje en este decremento del Ecorr. Hussain *et al.* [17] reportaron que el Ecorr es sensible a modificaciones de pH de la pasta del concreto a medida que se carbonata, por lo que se observó un decaimiento paulatino a medida que el frente de carbonatación se aproxima a al 80% de la distancia total del espesor del concreto que cubre a la barra de acero. Moreno *et al.* [9] observaron cambios en el Ecorr hacia valores más negativos como resultado de la carbonatación al nivel de la varilla. Durante los siguientes 6 meses, la tendencia es mantener el Ecorr en un intervalo de -300 a -400 mV vs ECS. Posteriormente, al décimo mes, se aprecia una tendencia a disminuir el valor del Ecorr, esta vez, influenciado por el incremento en la HR en el interior de la CCA.

Para la exposición natural, Figura 5, se aprecia que las épocas de mayor humedad relativa y precipitación pluvial (ver Figuras 2 y 3), el Ecorr toma valores más negativos a los -350 mV, indicio de condiciones propicias para una mayor probabilidad de corrosión. Es clara la influencia de la HR en el valor del Ecorr, modificando su valor a más negativos cuando la HR incrementa y aumentando su valor en el caso de disminuir la HR.

Icorr. Es clara la relación de la Icorr con la HR, tanto en la CCA como en medio natural. En el intervalo de 60 a 70 % de HR, la Icorr es menor, indicando la zona de pasividad de la varilla, Figura 6. El cambio es notable después de incrementar la HR al interior de la cámara, lo que confirma la dependencia de la Icorr con el llenado de los

poros del concreto. Para las dos diferentes relaciones agua/cemento la resistividad disminuye en los meses que registran mayor precipitación pluvial en el medio. En concordancia con los valores obtenidos para la CCA, la Icorr en medio natural está directamente en función de la HR, Figura 7.

Resistividad eléctrica (ρ). Se aprecia que los índices de resistividad disminuyen hacia valores de un riesgo moderado de corrosión e inclusive pasan en algunas mediciones a valores menores de 10 $k\Omega\text{cm}$. El cambio es notable después de incrementar la humedad relativa al interior de la cámara, lo que confirma la dependencia de la resistividad con el llenado de los poros del concreto provocado por la humedad relativa. Para las dos diferentes relaciones agua/cemento la resistividad disminuye en los meses que registran mayor precipitación pluvial en el medio. En concordancia con los valores obtenidos para la CCA, la resistividad en medio natural está directamente en función de la HR.

Cámara de carbonatación acelerada

La Figura 10 presenta la relación del Ecorr con la Icorr. La Figura 11 presenta la relación del Ecorr con la ρ . La Figura 12 presenta la relación del icorr con la ρ .

Los valores de Ecorr e Icorr indicaron que durante las primeras 10 semanas, el acero de refuerzo embebido en las vigas de concreto expuestas en las CCA se encontraba en un estado pasivo. Posteriormente, se aprecia un descenso en el Ecorr hasta un valor cercano a -450 mV , en coincidencia con un incremento en Icorr cercano a $0,1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ indicando una posible activación del acero [9, 17]. A continuación, la condición de HR impone una polarización por resistencia óhmica, que retorna el potencial a valores menos negativos. Después de haber incrementado el porcentaje de humedad relativa en el interior de la cámara, se observa una variación en los parámetros de las vigas, debido que la resistividad del medio cambió. Bajo la nueva condición, la estabilidad de la capa pasiva disminuye y se activa el proceso de oxidación del acero de refuerzo. En la Figura 10, Icorr vs Ecorr, se define un incremento en la icorr, desde valores superiores a $0,1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta cercanos a $1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dentro de la zona de despasivación a corrosión acelerada [8, 19] y si-

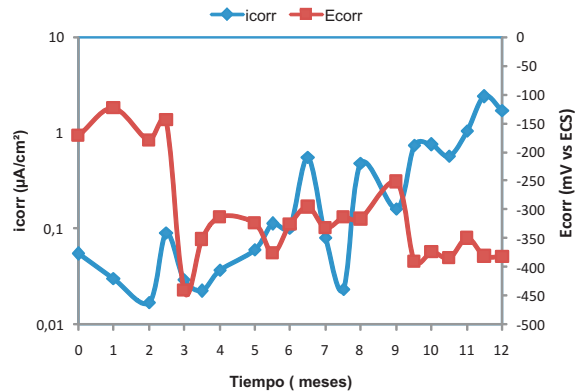


Figura 10. Gráfica de Ecorr vs icorr.

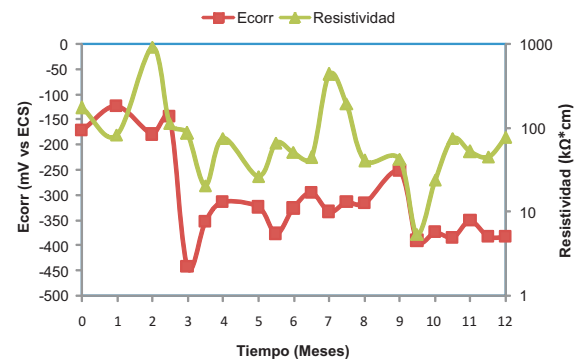


Figura 11. Gráfica de Ecorr vs ρ .

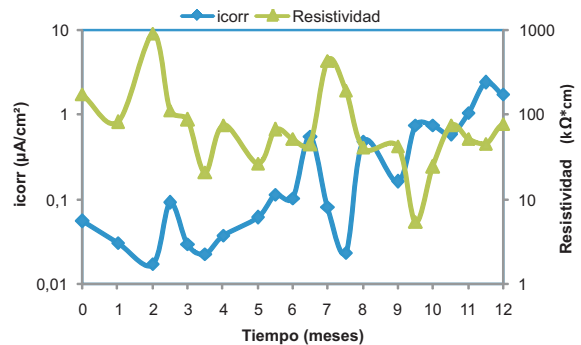


Figura 12. Gráfica de icorr vs ρ .

multáneamente Ecorr disminuye a valores menores a -350 mV vs ECS ; en ambos casos, la barra se encuentra en condiciones de corrosión. En la Figura 11, Ecorr vs resistividad, la tendencia de ambas variables es a disminuir con el transcurso del tiempo. Después de incrementar la humedad relativa, la trayectoria a la disminución de los parámetros es más definida. En similitud con los anteriores gráficos, en Resistividad vs icorr se aprecia el efecto de la disminución de la resistivi-

dad en concordancia con el aumento en la velocidad de corrosión.

El proceso de carbonatación de la pasta de concreto de las vigas con acero de refuerzo a cuatro meses de iniciado el ensayo, alcanzó todas las barras de acero en las vigas con relación a/c 0,69, tal como se puede apreciar en la Tabla 3. Sin embargo, al analizar tanto el E_{corr} como la I_{corr} , se observa que no tiene un efecto significativo en la variación de estos parámetros electroquímicos. La interfase acero-concreto fue afectada desde la activación en las primeras 10 semanas y el efecto de "pasividad" registrado posteriormente indica el efecto de la Polarización por Resistencia debida a la baja humedad interna la cual desaparece al aumentar la humedad relativa externa. En contraparte, la variación de humedad relativa sí refleja cambios en E_{corr} e I_{corr} , lo que permite aseverar que la interfase es más sensible al cambio del llenado de los poros que al de pH. En esta secuencia, se corrobora que se deben reunir las condiciones necesarias para la activación del acero y que la variable controlante del proceso de activación es la conductividad del medio. Moreno *et al.* [18] reportan un comportamiento similar en una cámara de ensayo acelerado, en la que se inició con una HR que favorecía la carbonatación de las muestras y posteriormente se incrementó la HR para favorecer la activación de las barras de acero.

Exposición natural

La Figura 13 presenta la relación del E_{corr} con la i_{corr} . La Figura 14 presenta la relación del E_{corr} con la ρ . La Figura 15 presenta la relación del i_{corr} con la ρ .

Se observa que en la época de mayor precipitación pluvial (a partir del mes 8) y con porcentajes de humedad relativa promedio entre el 60 y el 80%, propiciaron el entorno idóneo para el desencadenamiento del proceso de oxidación en el acero de refuerzo de las vigas expuestas. Al igual que para las vigas colocadas en cámara de carbonatación, es factible afirmar que el parámetro controlante es la resistividad del concreto, que es función directa de la cantidad de agua en los poros y está condicionada por la humedad relativa del medio, tanto en condiciones naturales como en cámara con parámetros controlados. Al respecto, Alonso y Andrade [19] mencionan a la re-

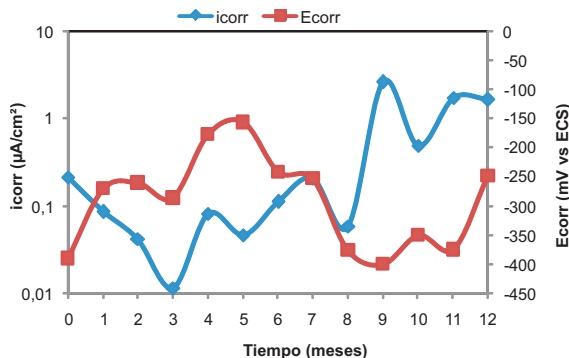


Figura 13. Relación del E_{corr} con la i_{corr} .

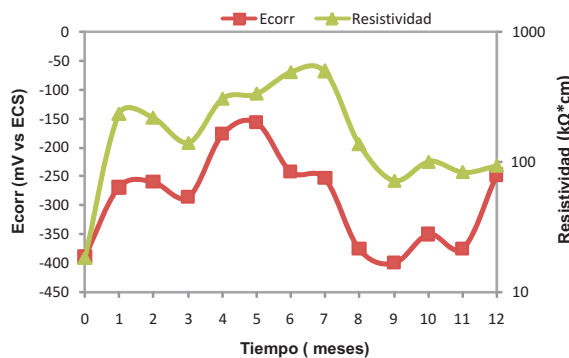


Figura 14. Relación del E_{corr} con la ρ .

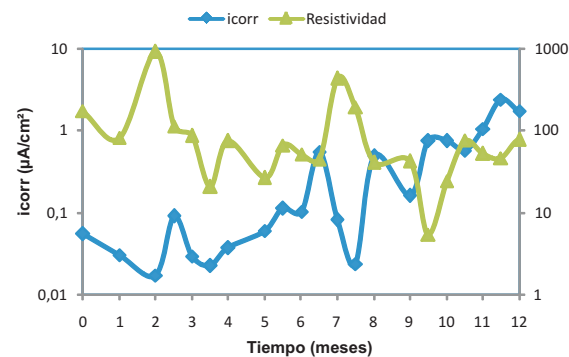


Figura 15. Relación del i_{corr} con la ρ .

sistividad como mecanismo controlante, con mayor efecto que el tipo de mortero y el contenido de adiciones minerales. La Figura 16 muestra la relación de la humedad relativa con la resistividad del concreto y las variables electroquímicas. Es conveniente resaltar la definición de 3 zonas de actividad del refuerzo embebido como función de la humedad relativa del medio, tanto en la CCA como en exposición natural.

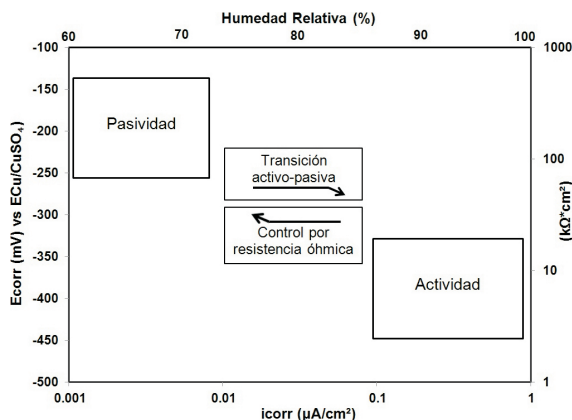


Figura 16. Relación de variables electroquímicas en función de la humedad relativa.

Conclusiones

La relación agua/cemento es determinante en el avance de la carbonatación. Es evidente que a mayor relación a/c, la carbonatación avanza con mayor rapidez, tanto en medio natural como en la cámara de carbonatación acelerada.

En ambos medios de exposición, la variación de los valores de la constante de la ecuación cinética (k) en función del tiempo, es indicio de la heterogeneidad del concreto.

La humedad relativa tiene un efecto directo sobre el llenado de poros y por lo tanto en la resistividad de la pasta de concreto, aunque, en contraposición, la acción del viento dominante sobre el mecanismo de secado superficial es un parámetro que retarda el proceso de carbonatación. A pesar de ello, la humedad relativa es el parámetro con mayor influencia en la resistividad del concreto y las variables electroquímicas de la interfase acero-concreto, definiendo regiones de pasividad, transición pasiva-activa, activa y control por resistencia óhmica.

Referencias bibliográficas

1. Thiery, M., Dangla, P., Villain, G., Platret, G.: "A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO_2 - H_2O -ions transfers and chemical reactions", 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, TT1-58. LYON [France] 17-20 April 2005.
2. Saetta A. V., Vitaliani, R. V. "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II. Practical applications", Cement and Concrete Research Vol. 35 (2005) 958-967.
3. Troconis de Rincón O. et al. "Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries: DURACON project/CYTED, Corrosion Science Vol. 49, N° 7 (2007) 2832-2843.
4. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation." ACI Materials Journal, Vol. 88 N° 4, (1991) 363-373.
5. Thiery, M., Dangla, P., Villain, G., Platret, G., Massieu, E., Druon, M. & Baroghel-Bouny, V.: "Atmospheric modelling of cement based materials", BLPC, 252, (2004).
6. Moreno E., Sagües A. A. "Carbonation-induced corrosion in belnded-cement concrete mix designs for highway structure." Corrosion/98, Paper 636, Houston, Texas.
7. Pruckner F. "Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete Measurement and Interpretation" Thesis submitted for the degree of Doctor rer. nat. at the University of Viena, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, May 2001.
8. Moreno, E. I., Cob E., Castro-Borges, P. "Corrosion rates from carbonated concrete specimens", Corrosion NACE 2004, No. 04439.
9. Gutiérrez, G. and Winant, C. D. " Seasonal patterns of winds stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico". Journal of Geophysical Research, Vol. 101, N° 8 (1996) 127.
10. Moreno, E. I., Domínguez, L. G., Cob S. E., Duarte, G. F. "Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración", Ingeniería 8-2 (2004) 117-130.
11. NMX-C-111-ONNCCE Industria de la construcción. Agregados para concreto hidráulico. Especificaciones y métodos de prueba, 2006.

12. ACI 211 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) Reapproved 2002.
13. NMX-C-157-ONNCCE-2006. Industria de la construcción. Concreto. Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión, 2006.
14. ASTM C 642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete- American Society for Testing and Materials. EUA. 1994.
15. NMX-C-083-ONNCCE Industria de la construcción. Concreto. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. Método de prueba, 2006.
16. RILEM Committee CPC18, Measurement for Hardened. Concrete Carbonated Depth, TC14 -CPC (1988).
17. Hussain, R. R. and Ishida T.: "Critical Carbonation Depth for Initiation of Steel corrosion in Fully Carbonated Concrete and Development of Electrochemical Carbonation Induced Corrosion Model", International Journal of Electrochemical Science, Vol. 4 (2009) 1178-1195.
18. Moreno, E. I., Solís, R. G., Cob E.: "Reinforcing steel corrosion in houses due to concrete carbonation in urban tropical environments", Corrosion NACE 2003, No. 03280.
19. Alonso, C., and Andrade, C. "Life Time of Rebars in Carbonated Concrete." 10th European Corrosion Congress, Barcelona, No. 165, (1993).

Recibido el 28 de Marzo de 2012

En forma revisada el 20 de Mayo de 2013