



Revista CENIC. Ciencias Químicas

ISSN: 1015-8553

juan.araujo@cnic.edu.cu

Centro Nacional de Investigaciones Científicas  
Cuba

Chávez-Ulloa, Emilio; Pérez López, Tezozomoc; Reyes Trujeque, Javier; Corvo Pérez, Francisco;  
Osorno Carrillo, José B.

Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada

Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 41, 2010

Centro Nacional de Investigaciones Científicas

La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620500029>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

**Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada.**

**Carbonation of concrete in natural atmosphere and accelerated carbonation chamber.**

Emilio Chávez-Ulloa<sup>a</sup>, Tezozomoc Pérez López<sup>a</sup>, Javier Reyes Trujeque<sup>a</sup>, Francisco Corvo Pérez<sup>a</sup>, José B. Osorno Carrillo<sup>b</sup>.

<sup>a</sup>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. e-mail: tezperez@uacam.mx.

<sup>b</sup>Instituto Tecnológico de Campeche, Carretera Campeche–Escarcega km 9, Código Postal 24500, Lerma, Campeche.

## **Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada.**

### **Abstract**

Construction industry contributes with about 7% of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emitted into the atmosphere. Cement manufacturing process requires high fossil fuel consumption and release CO<sub>2</sub> during the burning of limestone (CaCO<sub>3</sub>). Atmospheric CO<sub>2</sub> has concentration of about 0.03% in rural clean environments. CO<sub>2</sub> reacts with water vapor to decrease their pH until 5.6. Because of concrete allows the ingress of CO<sub>2</sub>, it reacts with the alkalis produced during cement hydration. It causes the decrease of concrete pH below 9. Since carbonate ion replaces alkalis, the process is named carbonation that is a manner to monitoring the concrete deterioration exposed to natural environment. Concrete beams with 0.64 and 0.45 water cement ratio (w/c), were exposed to natural marine environment at San Francisco de Campeche City test site. Also an accelerated assay was carried out in a carbonation chamber. The carbonation depth was monitored over the fresh face of cross sections cut at 3, 6 9 and 12 months of exposure by spraying acid-base indicators (timolftaleína and phenolftaleína). The w/c ratio plays a determinant role over the advance of carbonation, in both natural weathering and accelerated essays. It is remarkable the importance of the carbonation advance measurements like a parameter on durability of concrete structures.

**Keywords:** carbonation, concrete, CO<sub>2</sub>, natural exposure, accelerated carbonation chamber .

### **Resumen.**

La industria de la construcción contribuye con cerca del 7% del CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera, destacando que el cemento en su proceso de fabricación desprende el CO<sub>2</sub> como producto de la calcinación del CaCO<sub>3</sub> y del consumo de combustibles fósiles. En ambiente natural, el CO<sub>2</sub> se disuelve en la disolución al interior del sistema de poros del concreto, reaccionando con los álcalis presentes y disminuyendo el pH hasta valores menores a 9. Dado que el ión CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> sustituye a los álcalis, al proceso se le denomina carbonatación. En el presente trabajo, fueron expuestas vigas de concreto simple en medio marino tropical en la ciudad de San Francisco de Campeche y en una cámara de carbonatación acelerada, con el fin de determinar el avance de la reacción de carbonatación. Para ello se realizaron cortes de sección transversal y mediante la aplicación de indicadores ácido-base (timolftaleína y fenolftaleína), se determinó la profundidad de carbonatación a los 3, 6, 9 y 12 meses de exposición. De los resultados, se deduce la notoria la influencia de la cantidad de cemento con respecto al agua en la fabricación de las mezclas sobre el fenómeno de carbonatación. A su vez, el ensayo acelerado aporta información del deterioro del concreto por exposición en CO<sub>2</sub> en menor tiempo. Se resalta la importancia de la fabricación correcta de estructuras de concreto para incrementar su durabilidad y hacerlas menos vulnerables al efecto de la carbonatación inducida por el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera.

**Palabras clave:** carbonatación, concreto, CO<sub>2</sub>, exposición natural, cámara de carbonatación acelerada.

## Introducción

### Carbonatación.

Recientemente, se ha señalado al CO<sub>2</sub> como uno de los gases de efecto invernadero, siendo notable el incremento en la emisión por actividades industriales a partir del siglo XX. La carbonatación es un proceso químico en el cual el CO<sub>2</sub> atmosférico (~ 0.03 % en volumen), producto de la respiración de seres vivos y actividad humana principalmente, difunde y penetra en los poros capilares del concreto donde se combina con el agua presente formando ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), el cual reacciona con los hidróxidos alcalinos de sodio, potasio y calcio, formando carbonatos<sup>(1)</sup>.

El proceso global de la carbonatación consiste en seis etapas, que se resumen en la Tabla 1. La etapa (a) corresponde a la absorción de CO<sub>2</sub> en la disolución poro contenida al interior del concreto, con la formación de la especie H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Las reacciones (b) y (c) están relacionadas con la disociación del H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y el consumo de iones OH<sup>-</sup>, que origina la disminución del pH de la disolución poro. La disolución de Ca(OH)<sub>2</sub> (d) permite mantener un pH elevado, cercano a 12.4 en la disolución poro. De esta manera, se asume que los iones calcio resultantes de la disolución de Ca(OH)<sub>2</sub>, precipitan al combinarse con iones carbonato para formar CaCO<sub>3</sub> (e). La etapa (f) corresponde a la disociación del agua. Dado que las etapas (a), (c), (e) y (f) son instantáneas, los pasos controlantes del proceso son la disolución de Ca(OH)<sub>2</sub> (d) y la disociación de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (b). En consecuencia, las reacciones (a), (c), (e) and (f) se encuentran en equilibrio, mientras que (b) y (d) siguen las leyes cinéticas de reacción<sup>(2)</sup>.

Tabla 1. Etapas del proceso global de la carbonatación.

Reacciones	Ecuaciones de equilibrio
(a) CO <sub>2</sub> (g) + H <sub>2</sub> O ↔ H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>1</sub> = [H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ]/[CO <sub>2</sub> ]
(b) H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + OH <sup>-</sup> ↔ HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> = [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]/[[H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ][OH <sup>-</sup> ]]
(c) HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + OH <sup>-</sup> ↔ CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + H <sub>2</sub> O	K <sub>3</sub> = [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]/[[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ][OH <sup>-</sup> ]]
(d) Ca(OH) <sub>2</sub> ↔ Ca <sup>2+</sup> + 2OH <sup>-</sup>	K <sub>4</sub> = [Ca <sup>2+</sup> ][OH <sup>-</sup> ] <sup>2</sup>
(e) Ca <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ↔ CaCO <sub>3</sub>	K <sub>5</sub> = 1/ [[Ca <sup>2+</sup> ][CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]]
(f) OH <sup>-</sup> + H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ↔ 2H <sub>2</sub> O	K <sub>6</sub> = [OH <sup>-</sup> ][H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ]

Debido a la porosidad del concreto y a las condiciones de humedad relativa en el medio ambiente de exposición, los poros pueden estar en diferentes condiciones de llenado. En el caso de saturación del poro el transporte de CO<sub>2</sub> ocurre por difusión, siendo muy lento el avance, del orden de 10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s<sup>(3)</sup> 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, la cantidad de agua retenida en los poros no es suficiente para que la carbonatación ocurra. La condición más favorable para el avance de la carbonatación se presenta cuando la humedad relativa del medio se encuentra en el intervalo de 60 a 75%; en este 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<sub>2</sub> de la atmósfera puede ingresar a mayor profundidad y reaccionar con los álcalis presentes<sup>(4)</sup>.

La pasta cementosa del concreto presenta varias fases, principalmente formadas de silicatos de calcio hidratados (C-S-H). La presencia de CO<sub>2</sub> también afecta la estabilidad de estos compuestos y favorece su descomposición produciendo CaCO<sub>3</sub> y sílica-gel residual<sup>(2)</sup>. Aunque la reacción no afecta la alcalinidad de la disolución poro debido a que la solubilidad de los C-S-H es pequeña comparada con la del Ca(OH)<sub>2</sub>, si pueden fijar considerable número de moléculas de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, esta reacción secundaria no debe ser minimizada, ya que estos compuestos dan estabilidad mecánica a la pasta de concreto<sup>(5)</sup>.

La principal consecuencia de la carbonatación es la caída abrupta del pH alcalino de la solución-poro del concreto que disminuye desde un valor promedio de 12.5 hasta un valor cercano a 8.3 en zonas completamente carbonatadas, aunque se sabe que este fenómeno tiene varias etapas con valores de pH entre 11.3 y 9.5<sup>(5)</sup>.

De acuerdo a lo anterior, cuando el avance del frente de carbonatación alcanza el acero de refuerzo, la película pasiva que lo protege pierde estabilidad termodinámica dando inicio al proceso de corrosión<sup>(6)</sup>. La ruptura y destrucción de la película protectora de óxidos implica la pérdida de la pasividad y el incremento en la velocidad de corrosión<sup>(7)</sup>.

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. Investigaciones recientes confirman que la relación agua/cemento es uno de los factores que inciden directamente en el proceso de carbonatación. En este sentido, se sabe que el aumento en la relación agua/cemento incrementa la profundidad de carbonatación<sup>(8)</sup>.

### **Materiales y Métodos**

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, proveniente de un banco de materiales de Sabancuy, Campeche. Se empleo cemento Portland Tipo I, de marca comercial.

Para la caracterización de agregados se realizaron las siguientes pruebas: absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría. Se realizaron de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas NMX C-111<sup>(9)</sup>.

Para el concreto, después de 28 días de curado, se midieron los siguientes parámetros: contenido de aire en el concreto fresco compactado (normas NMX C 157<sup>(10)</sup> y ASTM C 231<sup>(11)</sup>). La absorción y vacíos de acuerdo a la norma ASTM C 642, <sup>(12)</sup>; resistencia a la compresión (normas NMX C 83<sup>(13)</sup>, NMX C 159<sup>(14)</sup>, ASTM C 39<sup>(15)</sup> y ASTM C 192<sup>(16)</sup>).

El proporcionamiento de la mezcla, se realizó siguiendo procedimientos establecidos por las Normas NMX C 159<sup>(14)</sup> y ASTM C-1017<sup>(17)</sup>.

### **Desarrollo experimental.**

Se construyeron 12 vigas de concreto simple (15 x 15 x 60 cm), de las cuales se elaboraron 6 vigas de concreto con relación agua cemento (a/c) 0.49 y 6 vigas de concreto con relación a/c 0.69, en la Figura 1 se observa la elaboración de las vigas de concreto simple. Para la fabricación de las vigas, el concreto se elaboró con la proporción de materiales que se muestra en la Tabla 2. Cabe mencionar que previo al cálculo de estas proporciones, se realizaron en los agregados pruebas de absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas NMX C-111<sup>(9)</sup>. La relación a/c empleada para la elaboración de la mezcla, se eligió considerando las características de absorción que presentó el agregado grueso proveniente de la trituración de roca caliza.



Figura 1 Elaboración de vigas de concreto simple.

Tabla 2. Proporción de materiales empleados para la elaboración del concreto.

Contenido en Kg/cm <sup>3</sup>	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

### Exposición de las muestras

#### a) Exposición natural.

6 vigas de concreto simple, de las cuales 3 vigas de concreto con relación a/c 0.49 y 3 vigas de concreto con relación a/c 0.69, se expusieron en un medio marino tropical, en el Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP) ubicado sobre la línea de costa de la Ciudad de San Francisco de Campeche(Figura 2 a y b).

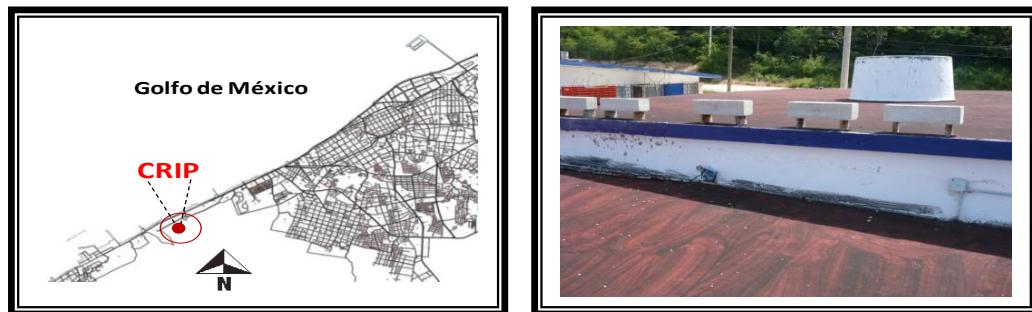


Figura 2 a) Ubicación de la unidad de muestreo en el Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP), en San Francisco de Campeche, México. b) Unidad de exposición de vigas de concreto en el CRIP.

#### b) Exposición acelerada.

6 vigas de concreto simple, de las cuales 3 vigas de concreto con relación a/c 0.49 y 3 vigas de concreto con relación a/c 0.69, con las dimensiones previamente descritas, se colocaron en una cámara de carbonatación acelerada (CCA), (Figura 3).



Figura 3 Cámara de carbonatación acelerada.

La cámara de carbonatación acelerada contaba 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 CO<sub>2</sub> que permitía mantener dentro de la cámara una concentración constante.

La finalidad de establecer esta cámara de carbonatación acelerada fue obtener información anticipada que aproximará los datos que se obtuviera en el sitio de exposición del medio ambiente natural, controlando en este caso las variables ambientales que mayor efecto puedan tener en este proceso como son la temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>. Estos parámetros fueron registrados de manera permanente empleando sensores de temperatura y humedad relativa (HOBO ware Pro V2) y CO<sub>2</sub> (Telaire 7001). Cabe mencionar que el porcentaje de CO<sub>2</sub> que se mantuvo en el interior de la cámara fue 100 veces mayor al existente en un ambiente natural.

c) Determinación del frente de carbonatación.

Para determinar el avance del frente de carbonatación en el concreto se utilizó un método de vía húmeda basado en indicadores ácido-base. El procedimiento consistió en realizar un corte transversal a la viga de aproximadamente 5 cm de espesor y a continuación se atomizó la cara interna con los indicadores fenolftaleína y timolftaleína. Posteriormente se realizaron tres mediciones por cada lado de la muestra empleando una regleta y se obtuvo un valor promedio para cada relación a/c (Figura 4 a y b).



a)



b)

Figura 4 a) Prueba de avance de carbonatación con soluciones de fenolftaleína y timolftaleína  
b) Medición del avance del frente de carbonatación.

## Resultados y discusión.

### Propiedades físicas.

La Tabla 3 muestra los valores de las propiedades de los concretos después de 28 días para cada relación a/c ensayada. Como se puede observar, la relación a/c de 0.49 presenta mejores propiedades físico-mecánicas, destacando una menor absorción de agua y porosidad, lo que le confiere una menor capacidad de penetración de CO<sub>2</sub> con respecto a las formulación a/c 0.69. Así mismo, por los valores de contenido de aire, absorción y porosidad, se considera que el concreto presentará una baja permeabilidad a los agentes externos como humedad, gases e iones cloruro, de particular agresividad para integridad del concreto.

Tabla 3. 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 <sup>2</sup> )	Contenido de aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	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

### Condiciones de exposición.

- a) Registro de condiciones micro-ambientales dentro de la CCA.

Las Figuras 5 y 6, muestran las variaciones de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la cámara de carbonatación acelerada, así como registros de humedad relativa en el interior y exterior de la cámara. Cabe mencionar que a partir del sexto mes, se incrementó de manera artificial los niveles de humedad relativa con el fin de observar el efecto sobre el avance del frente de carbonatación.

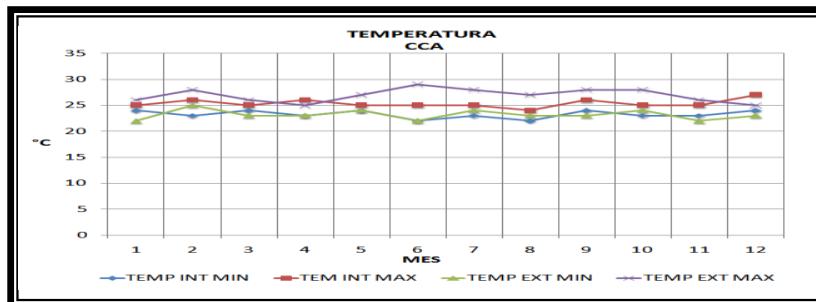


Figura 5 Gráfica de registros de temperatura máximas y mínimas en la Cámara de Carbonatación Acelerada tanto en su interior como exterior.

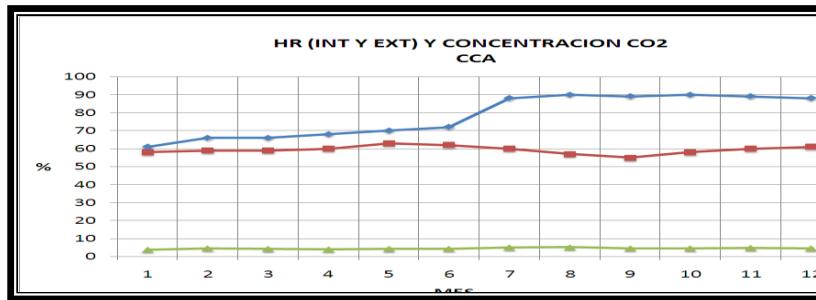


Figura 6 Gráfica de registros de humedad relativa interior, exterior y concentración de CO<sub>2</sub> en la Cámara de Carbonatación Acelerada.

b) Registro de los parámetros ambientales en el medio natural.

Las Figuras 7-11, muestran los registros de temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial y velocidad de vientos durante el periodo julio 2008-enero 2010, proporcionados por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional/ Comisión Nacional del Agua de la ciudad de San Francisco de Campeche. Los datos indican valores promedios de humedad relativa y temperatura respectivamente. Los valores promedio máximo de humedad relativa coinciden con el inicio de la temporada de lluvias (mes de julio) y con la presencia de frentes fríos provenientes del norte. Estos frentes arrastran humedad de las cálidas aguas del Golfo de México y la descargan en las zonas costeras, donde es frecuente la aparición de nieblas matinales durante el invierno. Por otra parte, durante el periodo reportado se observan ciclos de precipitación pluvial con máximos entre los meses julio-noviembre que coincide con la temporada de huracanes tropicales, y mínimos durante diciembre-junio, que se considera el periodo de estiaje. Respecto al régimen de vientos, las Figura 10, muestra las rosas de los vientos correspondientes a tres periodos del año, que marcan las variaciones climáticas en la ciudad de San Francisco de Campeche: la temporada de secas o estiaje, la temporada de lluvias y la temporada de frentes fríos. Por otra parte, la Figura 11, muestra los valores de velocidad de viento promedio durante el periodo reportado. Se observa que los vientos dominantes son procedentes del este y noreste, por lo cual la carga de humedad que adquieren del mar, se descarga en las zonas costeras del Caribe mexicano y su trayectoria terrestre en la Península de Yucatán <sup>(18)</sup>.

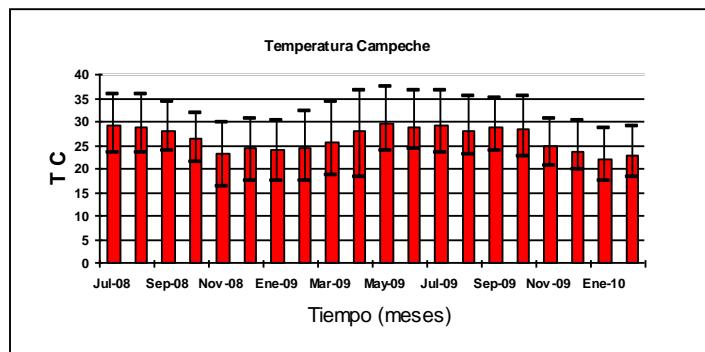


Figura 7. Gráfica de registros de temperatura en la ciudad de San Francisco de Campeche, Camp.

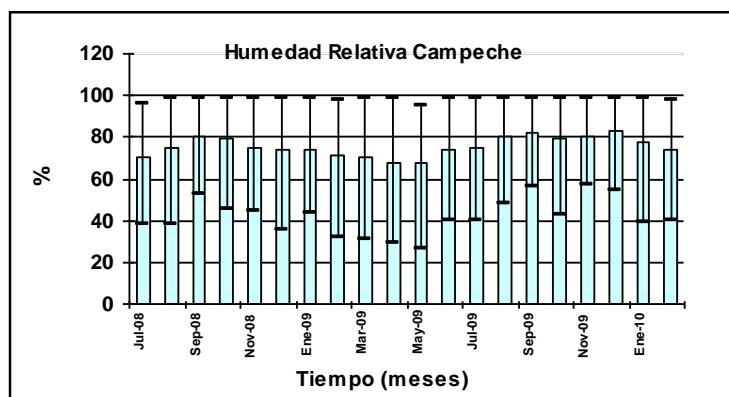


Figura 8 Gráfica de registros de humedad relativa en la ciudad de San Francisco de Campeche, Camp.

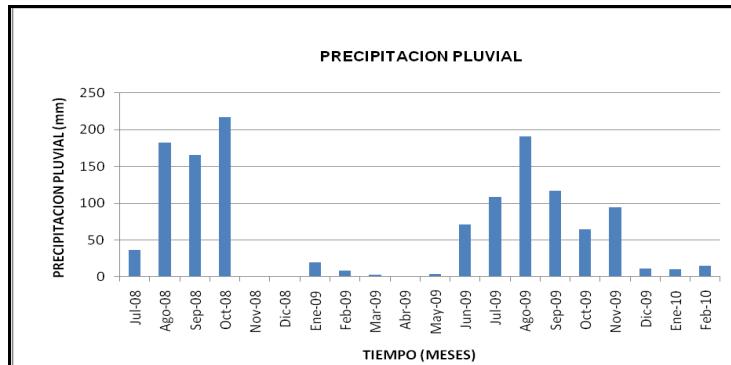


Figura 9 Gráfica de registros de precipitación pluvial en la ciudad de San Francisco de Campeche, Camp.

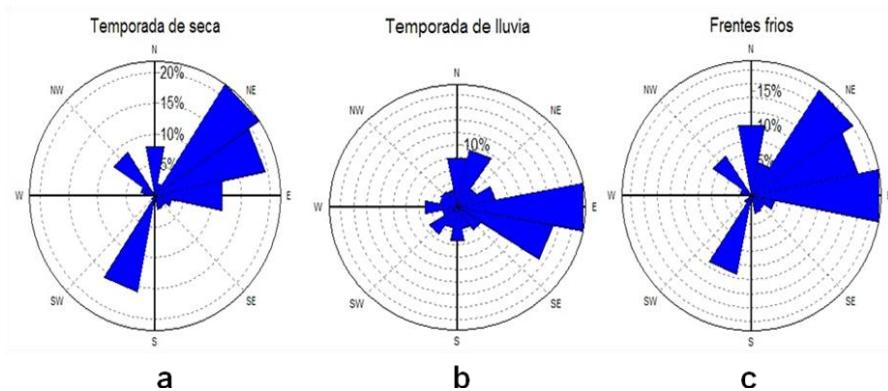


Figura 10 Regímenes de vientos en San Francisco de Campeche durante Noviembre 2006-Noviembre 2007. (a) Temporada de seca (marzo – junio), (b) Temporada de lluvia (julio – octubre), (c) temporadas de frentes fríos (noviembre – febrero) <sup>(18)</sup>.

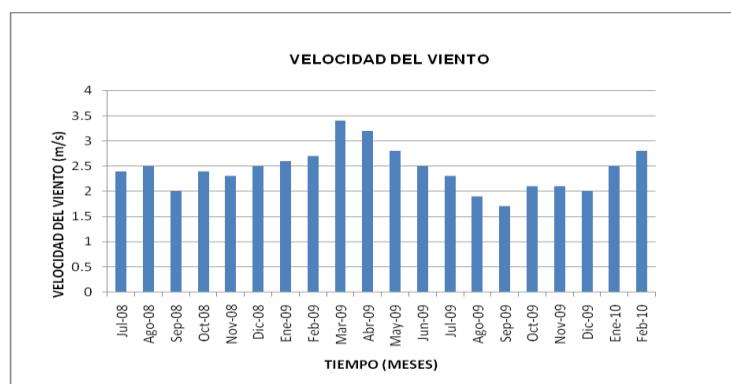


Figura 11 Gráfica de registros de velocidad de viento en la ciudad de San Francisco de Campeche, Camp.

c) Tasas de carbonatación.

La Tabla 4 muestra los resultados de la medición del avance del frente de carbonatación medido en las muestras preparadas con diferentes relaciones a/c, durante los ensayos de carbonatación en condiciones de exposición natural y acelerada. Los resultados indicaron que la relación a/c 0.69 mostró mayores tasas de carbonatación después de un año de exposición con respecto a la relación a/c 0.49 (Figuras 12 y 13). La carbonatación resulta mayor en las caras expuesta a la dirección del viento dominante, con respecto a las caras resguardadas en exposición natural. Los resultados indican que después de un año de exposición en la cámara de carbonatación, la viga con mayor relación a/c se carbonató totalmente (75 mm) derivado de las condiciones micro-ambientales artificiales que se propiciaron en su interior (Figura 12). Por otra parte, las vigas expuestas en el medio natural mostraron tasas de carbonatación acorde a las condiciones ambientales en el sitio de exposición (Figura 13). Los avances del frente de carbonatación resultaron más significativos en la época de estiaje, en la cual las condiciones permitían que la estructura de concreto se mantuviera parcialmente humectada, favoreciendo el ingreso de CO<sub>2</sub> y la reacción de neutralización.

En investigaciones relativas a la velocidad de avance del frente de carbonatación, se utiliza la ecuación:

$$e = kt^{1/2}$$

Donde:

e es el espesor de concreto carbonatado, a partir de la superficie

k es una constante que relaciona al tiempo con el avance de la carbonatación

t es el tiempo de exposición.

Se observa que la k no mantiene un valor fijo como era de esperarse lo que revela que las condiciones de exposición y la heterogeneidad propia del concreto son determinantes para el proceso de carbonatación.

Tabla 4. Resultados del avance del frente de Carbonatación.

ESTACION	TIEMPO DE EXPOSICION (año)	MEZCLA REL. A/C=0.69				MEZCLA REL. A/C= 0.49			
		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA	
		e <sub>CO2</sub> (mm)	K (mm/año <sup>0.5</sup> )	e <sub>CO2</sub> (mm)	K (mm/año <sup>0.5</sup> )	e <sub>CO2</sub> (mm)	K (mm/año <sup>0.5</sup> )	e <sub>CO2</sub> (mm)	K (mm/año <sup>0.5</sup> )
CRIP	0.25	10	20	4	8	5	10	3	6
	0.50	18	25.46	8	11.31	10	14.14	5	7.07
	0.75	30	34.64	20	23.09	18	20.79	15	17.32
	1.00	40	40	30	30	24	24	20	20
CCA	0.25	40	80	35	70	20	40	17	34
	0.50	60	84.85	56	79.20	35	49.50	32	45.25
	0.75	75	86.60	72	83.14	45	51.96	43	49.65
	1.00	75	75	75	75	60	60	58	58

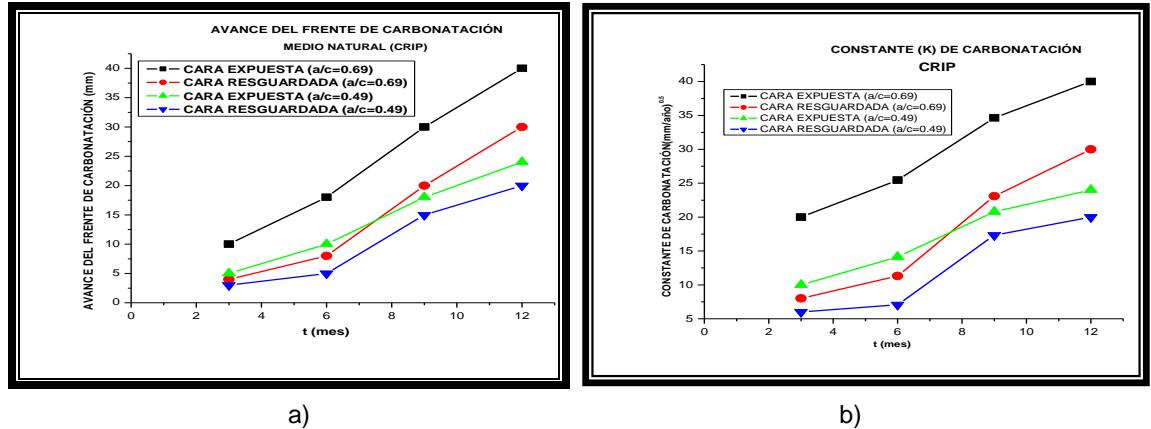


Figura 12 a) Gráfica del avance del frente de carbonatación en vigas expuestas en medio natural.  
b) Gráfica de la constante de carbonatación en vigas expuestas en medio natural.

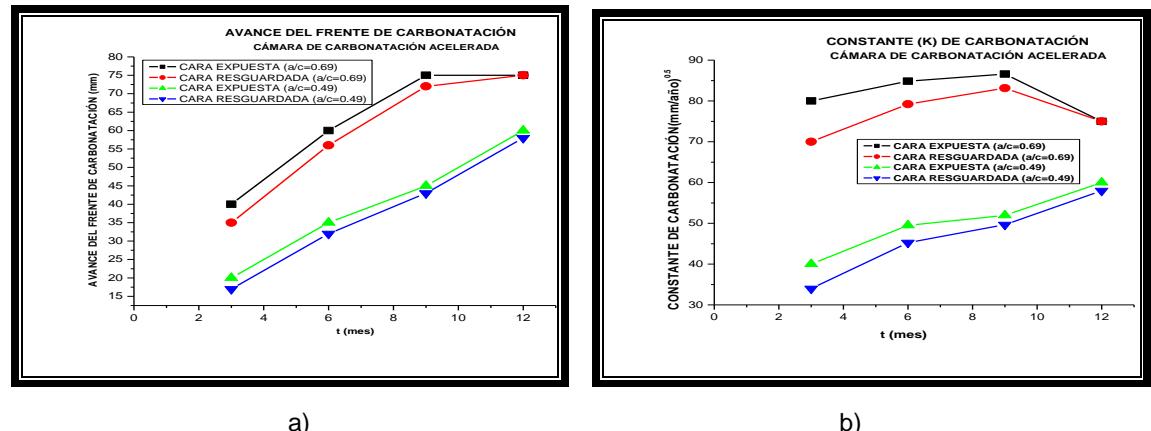


Figura 13 a) Gráfica del avance del frente de carbonatación en las vigas expuestas en cámara de carbonatación acelerada b). Gráfica de la constante de carbonatación en vigas expuestas en cámara de carbonatación acelerada.

### Efecto de la dirección del viento

El avance de la carbonatación es más pronunciado en la cara expuesta, alineada a la dirección del viento dominante, que en la cara resguardada, en la contracara de la probeta. La diferencia del avance de carbonatación que se aprecia en las caras de las vigas expuestas en medio natural es consecuencia de su interacción con el viento. En la cara expuesta es más factible que el agua contenida en los poros sea retirada por el establecimiento del equilibrio con la humedad relativa atmosférica y posterior transporte durante el movimiento del viento, originando un secado en la cercanía de la superficie.

### Conclusiones

Se determinó que los factores principales en el proceso de carbonatación son la porosidad del concreto y de la humedad relativa del medio ambiente. Así mismo la relación  $a/c$  repercutió en el proceso del avance del frente de carbonatación en el concreto elaborado con agregados calcáreos.

El uso de ensayo acelerado mediante cámara de carbonatación es una herramienta importante que permite aproximar en períodos cortos las condiciones del avance de la neutralización del concreto originados por el CO<sub>2</sub>, cuya medición ensayos naturales abarcaría tiempos prolongados.

#### Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo del Fondo Nacional de Ciencia Básica SEP-CONACyT a través del proyecto: "Estudio del proceso de corrosión de concreto reforzado elaborado con agregados calcáreos en exposición en ambiente marino tropical y ensayo acelerado de carbonatación", clave CB-2008-01000000000101891.

#### Referencias bibliográficas.

- 1) F.G. da Silva, P. Helene, P. Castro Borges, J.B.L. Liborio "Sources of variations when comparing concret carbonation results." Journal of materials in civil engineering, 2009
- 2) M.Thiery, P. Dangla, G. Villain, G. Platret, "A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-ions transfers and chemical reactions", 10DBMC International Conférence On Durability of Building Materials and Componen. LYON [France] 17-20 April 2005.
- 3) Anna V. Saetaa, Renato V. Vitaliani. "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II. Practical applications", Cement and Concrete Research 35 (2005) 958–967
- 4) O. Trocónis de Rincón "Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries: DURACON- ALCONPAT-2009.
- 5) Erick M., Sagües A. A. "Carbonation-induced corrosion in belnded-cement concrete mix designs for highway structure." Corrosion/98, Paper 636, Houston, Texas
- 6) Thiery, M., Dangla, P., Villain, G., Platret, G., Massieu, E., Druon, M. & Baroghel-Bouny, V. 2004, 'Atmospheric modelling of cement based materials", BLPC, 252.
- 7) Franz Pruckner. "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) Tsuyoshi Maruya, Kailin Hsu, Hitoshi Takeda and Somnuk Tangtermsirikul. "Numerical Modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement." Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 147- 160, 2003.
- 9) NMX-C 111.- Concreto.- Agregados para concreto hidráulico.
- 10) NMxC157.- Determinación del contenido de aire del concreto.
- 11) ASTM C 231- Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.- EUA. 1999.
- 12) ASTM C 642.- Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1994.
- 13) NMX-C 83 - Concreto-Resistencia a la compresión
- 14) NMX-C159.- Concreto – Elaboración y curado en el laboratorio
- 15) ASTM C 39 / C 39M.- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens .- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 2001.
- 16) ASTM C 192 / C 192M.- Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.- American Society for Testing and Materials.-EUA.- 2000.
- 17) ASTM C 1017 / C 1017M.- Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete.- American Society for Testing and Materials- EUA.- 1998.
- 18) Ortega Miss Magaly. "Caracterización de hidrocarburos alifáticos y análisis de la variación espacio-temporal de partículas atmosféricas en la Ciudad de San Francisco de Campeche". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche, México (2008).