

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL AVANCE DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO EN AMBIENTE NATURAL Y ACELERADO

STUDY OF CARBONATION BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE IN NATURAL AND ACCELERATED CONDITIONS

Aldo R. Campos Silva¹, G. Fajardo², J. M. Mendoza-Rangel²

Recepción: 29 de abril de 2015

Aprobación: 12 de agosto de 2016

Publicación: 30 de octubre de 2016

RESUMEN

Antecedentes: La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado puede ser afectada por la corrosión del acero de refuerzo debido a la carbonatación. Bajo la hipótesis que el concreto seguirá un desempeño equivalente in situ, un índice de durabilidad puede ser obtenido cuando el concreto se somete a pruebas aceleradas de carbonatación. Este trabajo tuvo por objetivo establecer una predicción confiable a partir de correlaciones entre las pruebas de carbonatación de concretos expuestos en ambientes acelerados y naturales.

Métodos: Especímenes prismáticos de concreto de 50 x 50 x 250 mm elaborados con dos tipos de cemento CPO y CPC (respectivamente, cemento portland ordinario y cemento portland compuesto) y tres distintas relaciones a/c (0.6, 0.7 y 0.8) fueron analizados. Una serie de especímenes fueron sometidos a carbonatación acelerada en una atmósfera de 3, 4, 5 o 6 % de CO₂ y 50 – 60% de RH a 30°C. Otra serie fueron expuestos en dos zonas urbanas dentro del área metropolitana de Monterrey. El avance de la carbonatación fue monitoreado regularmente en todos los ambientes de exposición y fue comparado con las predicciones obtenidas a partir de los datos del ambiente acelerado.

Resultados: Todos los especímenes mostraron una mayor profundidad de carbonatación, en comparación con las predicciones sugeridas en la literatura científica, por lo cual la aplicación de la ecuación basada en la raíz cuadrada del tiempo debe revisarse, el fenómeno de carbonatación es un proceso más complejo que el que pudiese describirse mediante este método.

Conclusiones:

Los resultados mostraron que existe una alta correlación para la predicción basada en una tendencia lineal del avance de carbonatación a partir de pruebas aceleradas.

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

ABSTRACT

Background: The durability of reinforced concrete structures can be affected by corrosion of reinforcing steel due to carbonation. Under the assumption that the concrete will have a behavior equivalent in situ, an index of durability can be obtained when the concrete is exposed to accelerated carbonation tests. The aim of the present work was establish a reliable prediction from correlations between tests of carbonation of concrete exposed to accelerated and natural environments.

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. C.P. 66455, México, Tel. (81) 8346-3197, arcscampos@gmail.com

² Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. C.P. 66455, México, Tel. (81) 8329-4000 Ext. 7282, gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx; jmmr.rangel@gmail.com

Methods: Prismatic concrete specimens 50 x 50 x 250 mm elaborated with two types of cement OPC and PCC (respectively, ordinary Portland cement and Portland cement composite) and three different water/cement ratios (0.6, 0.7 and 0.8) were tested. A set of specimens were exposed to accelerated carbonation in an environment of 3, 4, 5 or 6% CO₂ and 50 - 60% RH at 30 °C. Another set were exposed in two urban areas in the metropolitan area of Monterrey. The carbonation progress was monitored regularly in every environment of exposure and then was compared with predictions obtained from the results of the accelerated environment.

Results: All specimens analyzed in this research showed a greater depth of carbonation, compared with predictions suggested in the scientific literature, so the application of the equation based on the square root of time should be reviewed, the phenomenon of carbonation is a more complex process than could be described by this method.

Conclusions: The results showed a good correlation to the prediction based on a linear trend carbonation progress from accelerated tests.

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

RESUMO

Antecedentes: A durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser afetada pela corrosão do aço de reforço devido à carbonatação. Sob a hipótese de que o concreto seguirá um desempenho equivalente in loco, um índice de durabilidade pode ser obtido quando o concreto é submetido a testes acelerados de carbonatação. Este trabalho teve como objetivo estabelecer uma previsão confiável de correlações entre os testes de carbonatação do concreto exposto em ambientes acelerados e naturais.

Métodos: Espécimes prismáticos de concreto de 50 x 50 x 250 mm elaborados com dois tipos de cimento CPO e CPC (respectivamente, cimento Portland comum e cimento Portland composto) e três diferentes relações a /c (0.6, 0.7 e 0.8) foram analisadas. Uma série de amostras foram submetidas a carbonatação acelerada em uma atmosfera de 3, 4, 5 ou 6% de CO₂ e 50 - 60% de RH a 30° C. Outras séries foram expostas em duas zonas urbanas na área metropolitana de Monterrey. O progresso da carbonatação foi monitorado regularmente em todos os ambientes de exposição e foi comparado com as previsões obtidas a partir dos dados do ambiente acelerado.

Resultados: Todas as amostras apresentaram uma maior profundidade de carbonatação, em comparação com as previsões sugeridas na literatura científica, de modo que a aplicação da equação baseada na raiz quadrada do tempo deve ser revisada, o fenômeno de carbonatação é um processo mais complexo do que o que poderia ser descrito mediante este método.

Conclusões: Os resultados mostraram que existe uma alta correlação para a previsão baseada em uma tendência linear do avance de carbonatação a partir de testes acelerados.

Palavras chave: concreto, aço, corrosão, carbonatação, durabilidade.

1. INTRODUCCIÓN

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre espontáneamente en miles de estructuras de concreto en el mundo. En el concreto que no contiene acero de refuerzo se trata de un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado con varillas de acero, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia el interior de la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión (Parrot et al, 1987). La carbonatación es una reacción química la cual sucede entre la portlandita (Ca(OH)₂) y el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (Neville et al, 1993). La portlandita, está presente como producto de la hidratación de los componentes del cemento portland (CP) como el silicato tricálcico (C₃S) y silicato dicálcico (C₂S) (Neville et al, 2007). Esta reacción puede ser escrita de forma simplificada como:



La carbonatación disminuye el pH del concreto de valores mayores a 12.5 (típico de concretos sanos o recientemente elaborados) a valores entre 8 y 9 unidades (Moreno et al., 1999). Una vez que el pH ha disminuido, el ambiente que rodea al refuerzo de acero pierde sus propiedades protectoras (capa de óxido pasivo), y se desencadena la corro-

sión del acero (Moreno et al., 2000). En ambientes tropicales no marinos, la carbonatación del concreto es el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado (Serrano et al., 2006).

Los principales compuestos del CP sin hidratar son los óxidos: de calcio (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y de fierro (Fe_2O_3) (Moreno et al., 2000). Dichos compuestos varían ampliamente y cuando la proporción de CaO decrece en el CP, produce como consecuencia que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que se forma como producto de la hidratación del CaO también disminuya (Montemor et al., 2002). En los concretos realizados con CP, solamente importa la carbonatación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sin embargo, cuando el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ llega a consumirse, la carbonatación del silicato cálcico hidratado, C–S–H, es también posible (Neville et al., 2007). Ha sido encontrada, la existencia de una mayor profundidad de carbonatación cuando la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es menor (Bier et al., 1987). Además los investigadores concluyen que existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento. La profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye (Moreno et al., 2004) (Figura 1). Esto adquiere mayor importancia, debido a que el concreto se puede fabricar usando un rango amplio de contenidos de CP, además del uso de materiales supplementarios en adición o sustitución del CP.

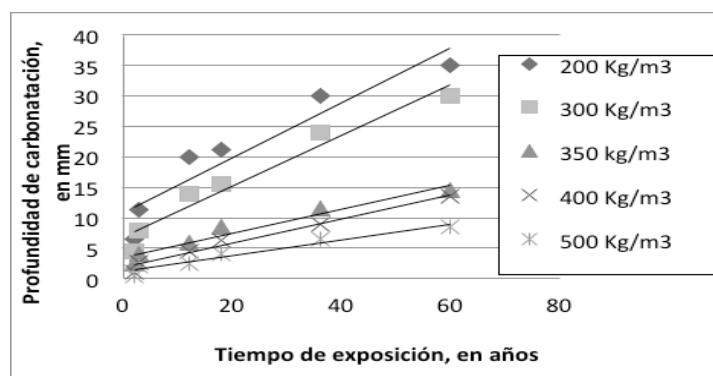


Figura 1: Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos de cemento por Kg/m^3 (Uller et al., 1998; Moreno et al., 2004)

La relación a/c determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. Así, la relación a/c y el grado de compactación afectan al volumen de vacíos en el concreto, y por ende el volumen de aire del concreto (Neville et al., 2007). El efecto de la relación a/c en el concreto ha sido descrito por diversos investigadores los cuales concluyen, que la relación a/c es el principal parámetro que afecta el avance de la carbonatación en el concreto (Haque et al., 1996). En la Figura 2 se puede observar dicho comportamiento.

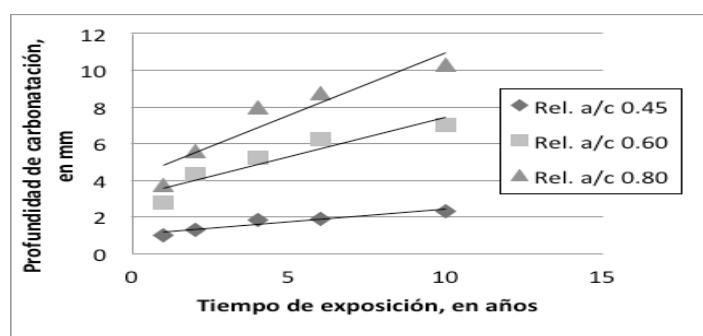


Figura 2: Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c (Uller et al., 1998; Moreno et al., 2004)

La humedad relativa (HR) ambiental es un factor importante para la progresión de la carbonatación, con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% (Tuutti et al., 1982), a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono. En la Tabla 1, se muestran los valores que favorecen el avance de la carbonatación.

Tabla 1: Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación (Tuutti et al., 1982).

Humedad Relativa en % (H.R.)	Proceso de Carbonatación
H.R. > 70	Evita el ingreso de CO ₂
50 < H.R. <70	Avanza rápidamente
H.R. < 50	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO ₂

El contenido de CO₂ en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar. Existen grandes diferencias de una zona urbana a una zona rural, siendo mayores las concentraciones en la primera. No obstante para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña concentración de CO₂, que normalmente se encuentra en la atmósfera en una concentración promedio de 0.03% en volumen (300 ppm) (Montani et al., 2000). Las mayores profundidades de carbonatación han sido encontradas en zonas de mayor concentración de CO₂, como lo pueden ser algunas zonas urbanas y/o industriales (Khunthongkeaw et al., 2006).

Varios investigadores han estudiado el proceso de carbonatación del concreto y coinciden en que se trata de un proceso que tiene buena repetitividad pero baja reproducibilidad (Sanjuán et al., 2003). En la literatura, se pueden encontrar estudios que han intentado relacionar el avance de la carbonatación en condiciones naturales vs. aceleradas utilizando diferentes enfoques. Sanjuán et al. (2003), han establecido una relación obtenida mediante el seguimiento del avance de la carbonatación en tiempos relativamente cortos y considerando el ambiente natural como aquel del laboratorio. Khunthongkeaw et al. (2006), obtuvieron una ecuación que permite estimar una predicción del avance de la carbonatación natural utilizando pruebas aceleradas, considerando parámetros ambientales. El estudio fue llevado a cabo utilizando especímenes de concreto con características similares (relación a/c y contenido de cemento) sin embargo carece de representatividad al tener concretos de características similares, lo cual les conduce a que sus resultados de predicción puedan ser calculados utilizando un solo parámetro ambiental para todos sus concretos y que estos tengan buena confiabilidad.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se llevó a cabo una comparación del avance de la carbonatación en ambiente natural y contralado en el laboratorio utilizando especímenes de concreto fabricados con tres diferentes relaciones a/c. Diferentes ambientes dentro de la zona metropolitana de Monterrey fueron considerados incorporando algunas variaciones de las condiciones ambientales para cada una de ellas. Como resultado de esta relación, se obtuvo una predicción involucrando factores atmosféricos de ambos ambientes.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. EL CEMENTO

La investigación se realizó con dos tipos de cemento de mayor venta comercial en nuestro país. El primero es un cemento Portland ordinario que posee una resistencia a la compresión mínima nominal a los 28 días de 40 MPa (CPO 40) y el segundo es un cemento portland compuesto, el cual obtiene una resistencia mínima nominal a la compresión a los 3 días de 20 MPa y a los 28 días de 30 MPa (CPC 30R). Ambos cementos cumplen con la especificación NMX-C-414-ONNCCE. En la Tabla 2, se muestra la composición química de ambos cementos.

Tabla 2: Composición química de los cementos utilizados

Compuesto	Valores obtenidos en %	
	CPO 40	CPC30R
Óxido de Aluminio, Al_2O_3	2.88	3.30
Óxido de Calcio, CaO	62.43	60.20
Óxido Férrico, Fe_2O_3	2.90	1.55
Oxido de Magnesio, MgO	1.10	1.50
Óxido de Potasio, K_2O	0.33	0.33
Óxido de Sodio, Na_2O	0.13	0.33
Dióxido de Silicio, SiO_2	25.68	21.30
Pérdida por ignición	1.55	8.20

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

El agregado grueso que se utilizó fue un agregado comercialmente disponible en la región con tamaño máximo de 3/8", estando éste dentro de los requerimientos granulométricos de la Norma ASTM C 33. Como agregado fino el material utilizado fue la denominada arena No. 4.

2.3. EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

Se realizaron en total 110 especímenes de concreto de 50 x 50 x 250 mm: 55 especímenes de concreto con CPC30R y 55 especímenes con CPO 40. En cuanto a la relación a/c, se seleccionaron las más usadas en el común de las estructuras, eligiendo 0.6, 0.7 y 0.8. Estos especímenes fueron expuestos a 6 diferentes ambientes: 4 en laboratorio y 2 naturales (representativos de una zona metropolitana del noreste del país). En la tabla 3, se muestra el proporcionamiento utilizado en el diseño de los concretos de esta investigación. La tabla 4 presenta la nomenclatura usada para identificar a los diferentes especímenes de concreto.

Tabla 3: Proporcionamiento de las mezclas utilizadas

Tipo de concreto	Contenido de cemento, kg/m^3	Contenido de agua como agua total, l/m^3	Agregado grueso, kg/m^3	Agregado fino, kg/m^3
CPO 0.6	330	201.59	735.96	1112.50
CPO 0.7	330	233.47	700.01	1059.10
CPO 0.8	330	265.75	664.05	1005.30
CPC 0.6	330	201.05	738.16	1116.38
CPC 0.7	330	232.05	702.91	1063.16
CPC 0.8	330	265.39	666.92	1008.33

Tabla 4: Nomenclatura de los especímenes de concreto

Nombre	Características
CPO 0.6	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.6
CPO 0.7	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.7
CPO 0.8	Cemento CPO 40 con relación a/c de 0.8
CPC 0.6	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.6
CPC 0.7	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.7
CPC 0.8	Cemento CPC 30 R con relación a/c de 0.8

2.4. PRE-ACONDICIONAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES

Las mezclas de concreto fueron sometidas a un curado estándar vía húmeda en un cuarto a 23+2 °C, con una HR de 90±5 % y durante 28 días. Después los especímenes fueron colocados dentro de una cámara ambiental durante 24h a 40 °C con la finalidad de retirar el exceso de humedad interna de los especímenes debido al proceso de curado.

2.5. LA EXPOSICIÓN A CARBONATACIÓN ACELERADA

Los especímenes fueron colocados en una cámara de carbonatación marca Fisher modelo ISOTEMP 40369. Se seleccionaron cuatro ambientes controlados, entre los cuales solo se varió la concentración de CO₂ en 3%, 4%, 5% y 6%. La HR en el interior de la cámara se mantuvo en un rango de 60 - 70% y una temperatura de 30°C para cada uno de los ambientes durante todo el periodo de prueba. Algunos especímenes de cada tipo de concreto fueron retirados regularmente de la cámara de carbonatación con el objetivo de determinar la profundidad de carbonatación a 3, 7, 14 y 28 días.

**Figura 3: Cámara de carbonatación acelerada**

2.6. LA EXPOSICIÓN A CARBONATACIÓN NATURAL

Otra serie de especímenes elaborados con concretos similares fueron expuestos en dos ambientes naturales representativos dentro de la zona metropolitana de Monterrey. La medición de la profundidad de carbonatación se realizó a 0, 95, 170, 246 y 270 días de exposición. Con los datos obtenidos se realizó la proyección a 365 días. A continuación se describen los sitios de exposición natural:

- Norte: La exposición se realizó en la azotea del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (expuesto aproximadamente a 10 m de altura con respecto al nivel del suelo), ubicado en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, al Norte de la zona metropolitana de Monterrey.



Figura 4: Norte de la zona metropolitana de Monterrey.
Fuente: Google Earth

- Centro: Los especímenes de concreto fueron colocados dentro de las instalaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental de Nuevo León (SIMA), organismo creado para medir las condiciones meteorológicas en la zona metropolitana de Monterrey, eligiéndose la estación “Obispado” ubicada en el centro de Monterrey. La zona de exposición es un lugar residencial ubicado en la calle 5 de Mayo, a un costado de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, las vialidades importantes alrededor de la zona son: Av. Venustiano Carranza y la calle George Washington.



Figura 5: Centro de la zona metropolitana de Monterrey.
Fuente: Google Earth.

2.6.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Aunado a la medición de la profundidad de carbonatación llevada a cabo sobre los especímenes de concreto, se realizaron mediciones puntuales de la temperatura ($T+0.5^{\circ}\text{C}$), la humedad relativa ($\text{HR}+5\%$) y la concentración de CO_2 (+1 ppm) con la ayuda de un termo-higrómetro portátil como una forma de caracterización de las condiciones meteorológicas en las dos zonas de exposición seleccionadas. Estos parámetros también fueron medidos en otros tres ambientes

dentro de la zona metropolitana de Monterrey con la finalidad de determinar las diferencias existentes (microclimas). En complemento, se solicitó la información de las condiciones meteorológicas de los lugares de exposición, esto a través del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA-Nuevo León). Los parámetros fueron registrados y relacionados con el avance de la carbonatación en los concretos. En lo que respecta a la concentración de CO₂ se sabe que la existencia de microclimas dentro de una misma zona metropolitana ha sido un fenómeno descubierto por varios investigadores (Moreno et al., 1999 y Yoon I. et al., 2007). Por tal motivo, la información que se muestra a continuación representa diferentes zonas de nuestra localidad. Las mediciones de concentración de CO₂ fueron obtenidas periódicamente a razón de tres veces por semana entre las 10:00 y las 20:00 horas, en todas las zonas de exposición. Las variaciones de las condiciones atmosféricas se encuentran implícitas en los datos obtenidos.

Tabla 5: Características de las zonas de medición

Zona	Características de la zona
Norte	Lugar ubicado dentro de la ciudad Universitaria de la UANL, rodeada de avenidas principales.
Centro	Zona habitacional rodeada por avenidas principales.
Zona habitacional	Zona habitacional rodeada por avenidas principales.
Simón Bolívar y Leones	Avenidas principales de la ciudad de Monterrey.
Unidad médica de la UANL	Lugar ubicado dentro de una zona habitacional.
Simón Bolívar y Madero	Avenidas principales de la ciudad de Monterrey.

2.7. SEGUIMIENTO DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN

Para el seguimiento del avance de la carbonatación se utilizaron tres réplicas por cada tipo de concreto (mezcla) fabricado. En cada réplica se procedió a la obtención de una muestra de concreto. Para ello primeramente se practicó una ranura en la periferia del espécimen a una distancia de aproximadamente 40 mm a partir de uno de los extremos del espécimen con el objetivo de guiar la fractura. Posteriormente, con la ayuda de un cincel y martillo se golpea en la periferia de la ranura hasta obtener la muestra deseada. Finalmente, se procede a rociar sobre la superficie de la muestra con una solución de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico. La fenolftaleína presenta un rango de viraje de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando un color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10.0 unidades de pH. Por lo tanto, la prueba de la fenolftaleína sólo nos indica cuando el concreto tiene un pH menor de 8.2 o mayor de 10.0 (Moreno et al., 2006). La medición se realizó como se muestra en la figura 6, obteniendo un promedio del espesor alrededor de la muestra.

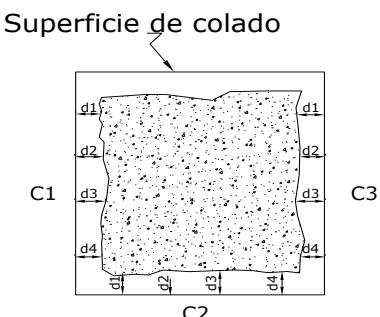


Figura 6: Medición profundidad de carbonatación

La profundidad promedio de carbonatación para la cara 1 (C1), se obtiene a través de la siguiente ecuación.

$$C1 = \frac{d1+d2+d3+d4}{4} \quad (2)$$

Donde:

$C1$ = Profundidad de carbonatación promedio para la cara 1.

$d1,d2,d3$ y $d4$ = Mediciones puntuales de la profundidad de carbonatación.

En el caso de la profundidad de las caras $C2$ y $C3$, se realiza el mismo proceso de la ec. 2, obteniendo el promedio de las mediciones puntuales en cada cara.

La profundidad de carbonatación del espécimen, se obtiene mediante la ecuación 3.

$$X = \frac{C1+C2+C3}{3} \quad (3)$$

Donde:

X = Profundidad promedio de carbonatación.

$C1,C2$ y $C3$ = Profundidad de carbonatación promedio para las diversas caras del espécimen.

3. RESULTADOS

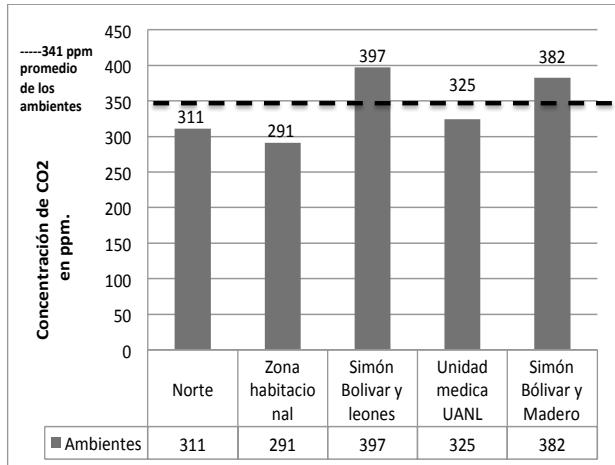
3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se utilizaron 4 cilindros de 150x300 mm para cada tipo de mezcla, con el fin de obtener la resistencia a la compresión, de acuerdo a la Norma ASTM C 192. En la tabla 6 se muestran los resultados de resistencia a la compresión obtenidos a 28 días para los diferentes concretos fabricados.

Tabla 6: Resistencia a la compresión a los 28 días

Nombre	Resistencia a la compresión, kg/cm ²
CPO 0.6	440
CPO 0.7	341
CPO 0.8	234
CPC 0.6	285
CPC 0.7	249
CPC 0.8	227

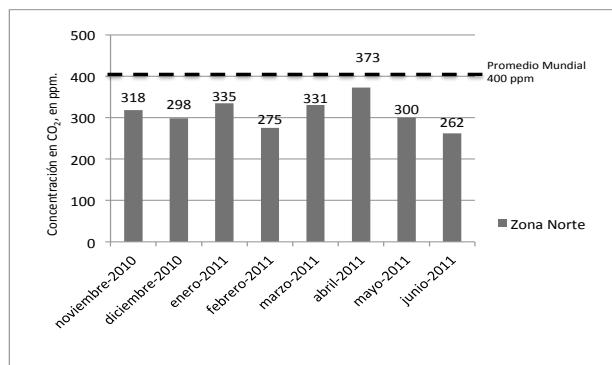
De manera general, de los resultados se observan diferencias principalmente atribuibles al tipo de cemento usado (CPO y CPC) en la elaboración de los especímenes. En efecto, como es sabido, estos cementos cuentan con una composición química y resistencia mecánica nominal diferente. No obstante, estas diferencias permiten ampliar el estudio ya que es bien conocido que la carbonatación es un proceso difusivo, es decir, depende del grado de porosidad y de la interconexión de los poros. Por su lado, la porosidad está directamente relacionada con la resistencia a la compresión de un concreto, por lo que se infiere la existencia de una amplia gama de porosidades en esta investigación.

**Figura 7: Concentración de CO₂, diferentes ambientes**

La concentración de CO₂ promedio de los diferentes ambientes contemplados fue de 341 ppm, el cual es representado en la gráfica con una línea horizontal.

3.2.1. LA CONCENTRACIÓN DE CO₂ EN LAS ZONAS DE EXPOSICIÓN

Relacionar las condiciones ambientales prevalecientes con el proceso de carbonatación permite asociar las causas que afectan el proceso con su avance. Por tal motivo, una especial atención fue puesta en la concentración de CO₂ prevaleciente en las zonas de exposición de los especímenes de concreto. En la Figura 8, se muestran las concentraciones promedio por mes en la zona de exposición Norte.

**Figura 8: Concentración de CO₂, Zona Norte**

Los valores obtenidos fluctúan de un valor mínimo de 262 ppm en el mes de junio de 2011, a un valor máximo de 372 ppm en el mes de Abril del mismo año. En promedio, durante el periodo de estudio se obtuvo un valor de 312 ppm. No obstante, estos valores permanecen por debajo del promedio mundial y de otros valores registrados en la literatura, como es el caso de Seúl en Corea del Sur en donde se registró en 1996 un valor máximo de 430 ppm (www.meteor.go.kr, 1996).

3.3. LA HUMEDAD RELATIVA

En la Figura 9 y 10, se muestran respectivamente los valores de HR promedio mensual para la zona de exposición Norte y Centro. La información mostrada representa los valores para el periodo de estudio que corresponden a cada zona.

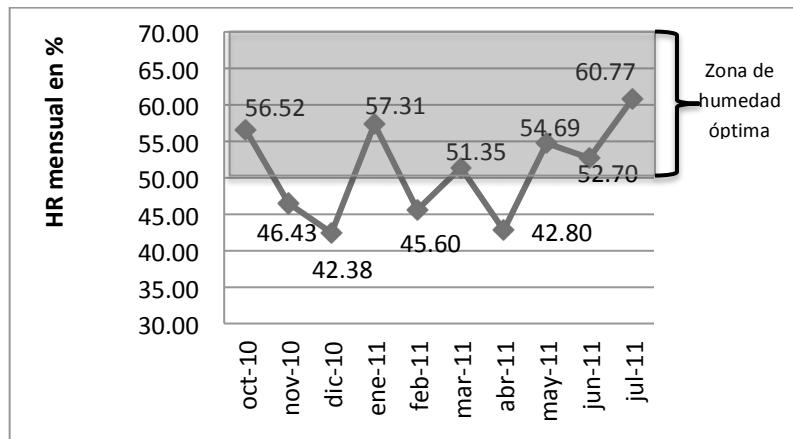


Figura 9: Humedad Relativa promedio mensual en la zona de exposición Norte

La zona de exposición Norte presenta un valor máximo de 60.77% y un valor mínimo de 42.38% con una variación de 18.39%. Por su parte, en la zona de exposición Centro los especímenes tuvieron un menor tiempo de exposición, en el cual las variaciones entre el valor máximo y mínimo fueron de 13.8%. Las variaciones de las Zonas Norte y Centro no fueron significativas y todo caso se encontraron dentro o muy cerca de la región que indica la HR óptima para el avance de la carbonatación, al menos para nuestro periodo de exposición.

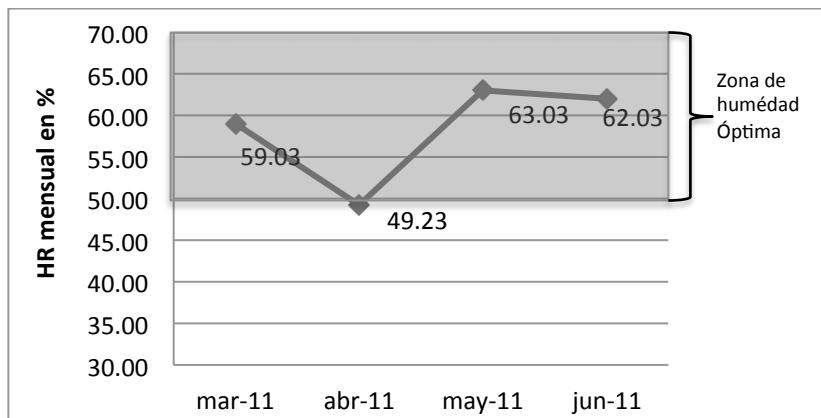


Figura 10: Variación de la HR para la zona de exposición Centro.

En lo que respecta a las diferencias entre las dos zonas de exposición encontramos una divergencia promedio de 7.95%, siendo mayor la HR en la zona Centro del área metropolitana de Monterrey. Los valores de HR mensual para la zona Norte se mantuvieron la mayor parte del tiempo en el rango óptimo de 50-70% (Tuutti et al., 1982). Para la zona Centro todos los valores se mantuvieron en el rango ideal que favorece la carbonatación del concreto.

3.4. LA TEMPERATURA

En la Figura 11 y 12, se presentan los valores de Temperatura (promedio, máxima y mínima) respectivamente para la zona de exposición Norte y Centro.

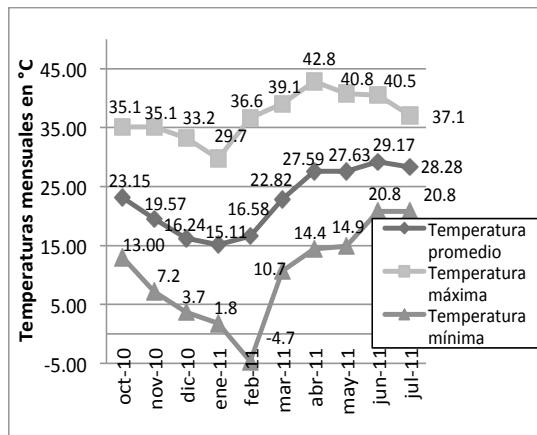


Figura 11: Temperatura promedio mensual, mínima y máxima en la zona Norte

La temperatura promedio mensual en la zona Norte tiene un mínimo de 15.1°C y un máximo de 29.1°C, por lo cual la diferencia es de 14.0°C. En lo que respecta a la temperatura mínima registrada fue de -4.7°C y la temperatura máxima fue de 42.8°C, existiendo una variación de 47.5°C, en el tiempo de exposición.

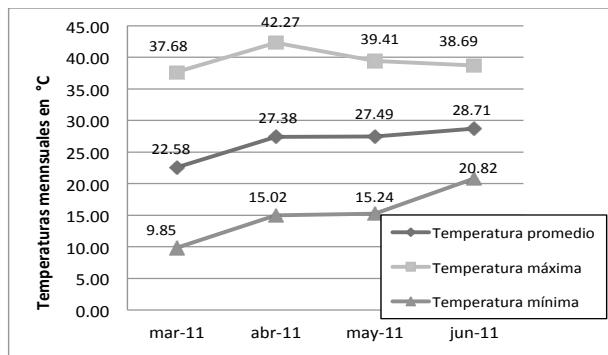


Figura 12: Temperatura promedio mensual, mínima y máxima en la zona Centro.

En la zona Centro, se registraron los siguientes valores, en lo que respecta a la temperatura promedio, la mínima presentó un valor de 22.5°C y la máxima un valor de 28.7°C, existiendo una diferencia de 6.1°C. Los valores registrados mínimos y máximos fueron de 9.8°C a 42.2°C respectivamente, existiendo una diferencia entre ambas de 32.4°C. La diferencia entre las dos zonas de exposición en todas las temperaturas promedio mensuales fue muy similar, siendo la mayor diferencia entre éstas de 1.8°C para la temperatura máxima para el mismo mes de exposición. Es posible constatar que existen grandes variaciones en los valores de temperatura en cada zona, lo cual dificulta la utilización de un valor fijo con el objetivo de relacionar los valores ambientales para predecir la velocidad de carbonatación.

3.5. LA VELOCIDAD DEL VIENTO

En la Figura 13 y 14, se presentan los valores de velocidad de viento respectivamente para la zona de exposición Norte y Centro.

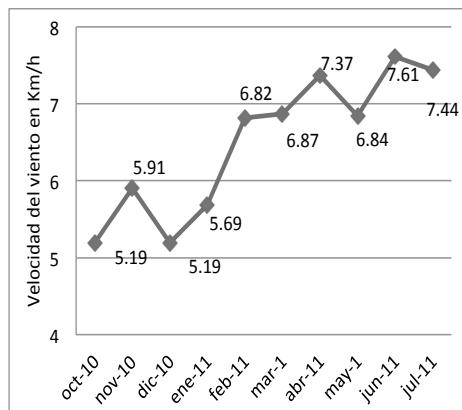


Figura 13: Velocidad del viento en la zona Norte

Los valores de velocidad promedio fluctúan de un mínimo de 5.19 km/h a un valor máximo de 7.61 km/h.

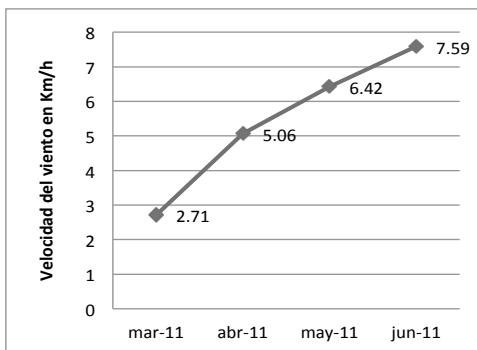
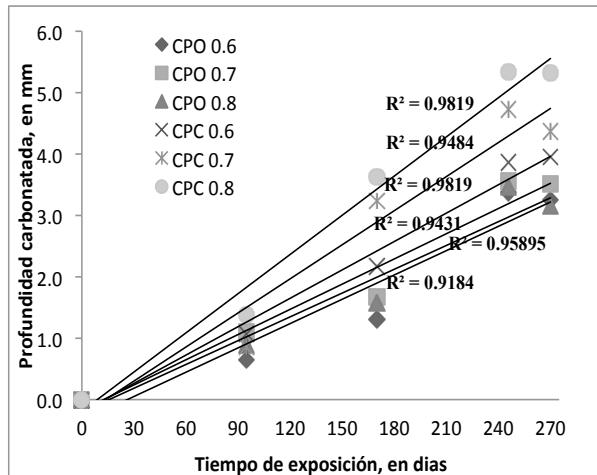


Figura 14: Se presentan los valores de la velocidad de viento en la zona de exposición Centro

Para la zona Centro, la velocidad del viento presentó un mínimo de 2.71 km/h y un valor máximo de 7.59 km/h. Los valores de mayor velocidad del viento han sido referenciados por investigadores como (Moreno et al., 2009), los cuales han encontrado que donde existen vientos predominantes, los valores de profundidad de carbonatación han sido mayores.

3.6. LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN CONDICIONES NATURALES

La progresión de la carbonatación en las estructuras de concreto depende de varios factores, entre los cuales se encuentran las condiciones ambientales que envuelven a las estructuras. La profundidad de carbonatación obtenida en los especímenes de concreto expuestos en las zonas Norte y Centro, evidencian el comportamiento de este fenómeno para las condiciones ambientales prevalecientes en dichas zonas. En la Figura 15 se presenta la profundidad de carbonatación obtenida a diferentes tiempos en los especímenes expuestos en la zona Norte.

**Figura 15: Profundidad de carbonatación vs tiempo, en condiciones naturales, Zona Norte**

Se constata que el avance de la carbonatación presentó una tendencia lineal para los distintos tipos de concretos utilizados y para los períodos de exposición comprendidos en esta investigación. En la Tabla 7, se presentan los resultados de la profundidad de carbonatación obtenidos en diferentes tiempos de exposición la zona Norte (Azotea del Instituto de Ingeniería Civil). Debido a que los especímenes de la zona Centro no pudieron ser expuestos al mismo tiempo que los de la zona Norte, los resultados no fueron ajustados a una predicción lineal.

Tabla 7: Profundidad de carbonatación en mm, para especímenes ubicados en la zona Norte y Centro

Zona Norte	Profundidad de carbonatación, mm					
Tiempo (días)	CPO 0.6	CPO 0.7	CPO 0.8	CPC 0.6	CPC 0.7	CPC 0.8
170	1.9	2.2	2.0	2.4	2.9	3.4
270	3.2	3.5	3.3	4.0	4.7	5.6
365	4.5	4.8	4.5	5.4	6.5	7.6
Zona Centro						
168	2.4	2.4	2.8	3.0	3.7	4.9

Como esperado, la profundidad de carbonatación varió en función de la resistencia a la compresión de los concretos. Se constató una diferencia de hasta 41% menos en un concreto con una resistencia a la compresión de 440 kg/cm² (CPO 0.6) comparado con un concreto de 234 kg/cm² (CPC 0.8). Esto debido principalmente al que el concreto CPO 0.6 posee una matriz más densa en comparación al concreto CPC 0.8, lo cual dificulta que el proceso difusivo del fenómeno de carbonatación avance más rápidamente en el primero.

En cuanto a las variables ambientales, las que presentaron mayor diferencia comparándose entre las dos zonas de exposición, fueron la HR y la velocidad del viento, lo cual propició un avance de carbonatación distinto para el mismo período de exposición entre ambas zonas.

3.6.1. LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN CONDICIONES ACELERADAS

En la Figura 16, se presenta el comportamiento obtenido en el proceso de avance de la carbonatación para ambientes con una concentración 100 veces mayor que el ambiente natural promedio.

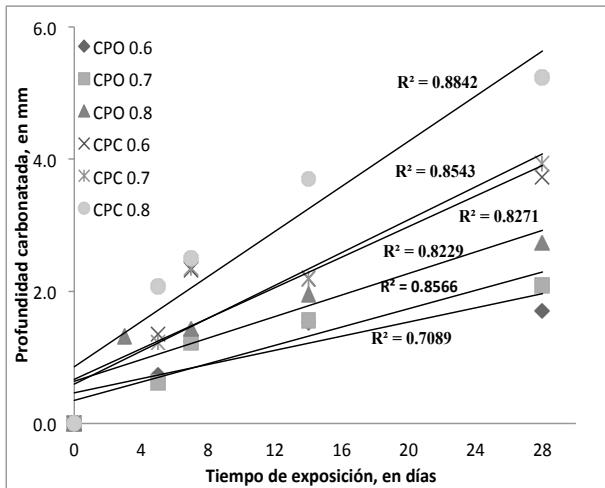


Figura 16: Profundidad de carbonatación vs tiempo, para un ambiente con una concentración de 3% de CO₂

Se puede observar que el comportamiento es lineal al igual que en un ambiente natural, al menos para los tiempos previstos en esta investigación.

3.7. RELACIÓN ENTRE EL AVANCE DE LA CARBONATACIÓN EN MEDIO NATURAL Y ACELERADO

La búsqueda de una relación que permita predecir el comportamiento de un determinado concreto en condiciones naturales a partir del comportamiento en un medio acelerado ha sido objeto de varias investigaciones. Con el objetivo de aportar datos experimentales que permitan realizar una predicción confiable para al menos los tiempos de exposición que se incluyen en la investigación se llevó a cabo una comparación del avance de la carbonatación en los diferentes medios aquí descritos. En la Figura 17, se presenta la profundidad de carbonatación obtenida en ambiente natural (95, 170, 246, 270 y 365 días) con su correspondiente en ambientes acelerados (28 días a una concentración de 3% de CO₂) para un mismo tipo de concreto (cemento CPO y distintas relaciones a/c de 0.6, 0.7 y 0.8).

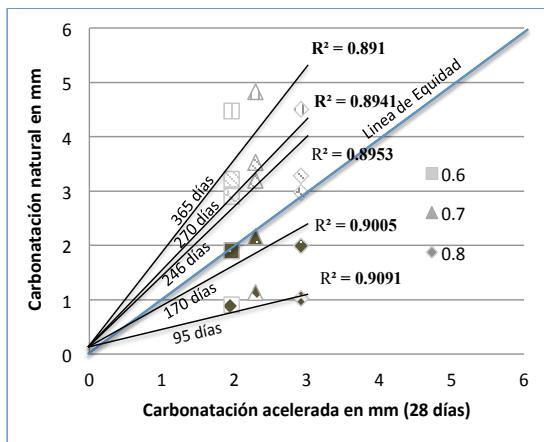


Figura 17: Carbonatación natural vs carbonatación acelerada para una concentración de 3% de CO₂, para especímenes realizados con cemento CPO (Relación a/c de 0.6, 0.7 y 0.8)

El comportamiento lineal obtenido bajo nuestras condiciones experimentales demuestra la influencia del ambiente y del periodo de exposición, descartando que la pendiente obtenida sea afectada por el tipo de concreto. Esto debido a que cada punto representa una relación a/c (diferente resistencia a la compresión) y los puntos se ajustan dentro de una tendencia lineal.

3.8. PREDICCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN

Ha sido determinado por varios autores que la tasa de carbonatación varía de acuerdo a la ley de la raíz cuadrada del tiempo, como lo indica la ec. 4.

$$X = K \sqrt{t}. \quad (4)$$

Donde:

X = profundidad de carbonatación en mm para un tiempo “ t ”.

K = Es un factor que agrupa parámetros concernientes al tipo de concreto y a las características climatológicas.

t = tiempo de exposición.

3.8.1. PARÁMETRO A.

Este parámetro se define como la pendiente resultante de la relación entre la profundidad de carbonatación natural vs. la profundidad de carbonatación acelerada. La cual es dependiente de los factores ambientales y del tiempo de exposición. Algunos investigadores han propuesto a esta pendiente de la siguiente forma (Khunthongkeaw et al., 2006):

$$A=m\sqrt{t} \quad (5)$$

A = Es la pendiente de relación, adimensional.

m = Factor ambiental, adimensional.

t = Tiempo de exposición el cual varía a la raíz del tiempo, adimensional.

En esta investigación se descartó que A tuviera una variación de la forma descrita anteriormente. Debido a que la carbonatación acelerada y natural presentaron ambas un comportamiento lineal, al menos para los tiempos de exposición utilizados en esta investigación, debido a ello se propone que A , tenga también un comportamiento lineal:

$$A=mt \quad (6)$$

A = Es la pendiente de relación, adimensional.

m = Factor ambiental, adimensional.

t = Tiempo de exposición el cual varía de forma lineal, adimensional.

Nota: Los valores son adimensionales debido a que representan la relación existente entre un ambiente acelerado y uno natural de carbonatación.

3.8.2. FACTOR AMBIENTAL, M

Para esta investigación, se propone el uso de un factor ambiental m el cual establece una relación entre las condiciones naturales y aceleradas para especímenes similares. Debido a que las condiciones aceleradas son controladas, con la ayuda de este factor sería posible determinar cualitativamente, si el entorno se convierte en más agresivo, al menos para especímenes con similar tipo y contenido de cemento. Con la ayuda de la ec. 6, y conociendo el valor del parámetro A y el tiempo t , se obtiene un valor que solo representa la relación entre ambiente natural y acelerado (factor ambiental m). El parámetro A es la pendiente del ensayo acelerado vs natural, Khunthongkeaw et al. (2006) propone que esta pendiente depende del ambiente y de la raíz cuadrada del tiempo de exposición. En nuestro caso hemos utilizado el tiempo lineal debido a que representa el mejor ajuste para nuestro tiempo de exposición. En la Tabla 8 se presentan los diferentes factores ambientales para los especímenes realizados con cemento CPO y CPC.

Tabla 8: Valores obtenidos de Factor ambiental, m, para los especímenes realizados con cemento CPO y CPC, en años

Factor ambiental (m), en años				
Concentración de CO ₂	3%	4%	5%	6%
CPO	1.653	0.609	0.482	0.794
CPC	1.395	0.703	0.566	0.888

El factor ambiental, m, establece una relación de un tipo de concreto expuesto a carbonatación en condiciones aceleradas y naturales. Por tal motivo dichos valores son comparables para similares tipos de concreto expuestos en las mismas condiciones aquí establecidas.

3.8.3. PREDICCIÓN UTILIZANDO LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO

A partir del análisis anterior se determinó que la pendiente de relación entre los ambientes naturales y acelerados no depende del tipo de concreto, resulta consecuente descartar este parámetro del factor K propuesto en la ley de la raíz cuadrada del tiempo. Por lo cual se propone la siguiente ecuación (ec. 7) (Khunthongkeaw et al., 2006):

$$X=X_a A \sqrt{t} \quad (7)$$

X = La profundidad de carbonatación, en mm, para un tiempo t, en años.

X_a = La profundidad de carbonatación, en mm, para un ambiente acelerado para un periodo de 28 días de exposición.

A = Es la pendiente de relación, la cual es dependiente de las condiciones ambientales.

t = Tiempo, en años, de exposición al ambiente natural.

3.8.4. PREDICCIÓN LINEAL

Otra ecuación entonces es formulada con el objetivo de representar el comportamiento lineal presente en las primeras etapas del proceso de carbonatación (nomenclatura similar a la ec. 7).

$$X=X_a A t \quad (8)$$

3.9. VERIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE PREDICCIÓN

Las ecuaciones 7 y 8 fueron alimentadas con los valores de la profundidad de carbonatación obtenidos a partir de los ensayos en exposición natural. En la Figuras 18 y 19, se presenta la predicción de la profundidad de carbonatación obtenida respectivamente, para la ecuación basada en la raíz cuadrada del tiempo y en el comportamiento lineal, para especímenes realizados con CPO y CPC.

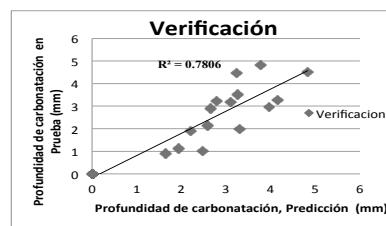


Figura 18: Profundidad de carbonatación obtenida experimentalmente vs. la profundidad de carbonatación de predicción basada en la raíz del tiempo a una concentración de 3% de CO₂

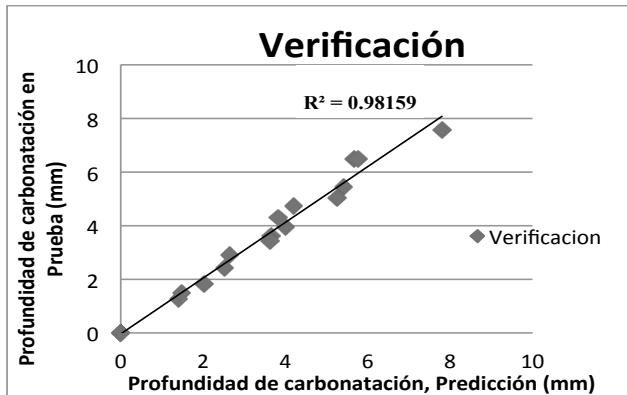


Figura 19: Profundidad de carbonatación obtenida en prueba vs la profundidad de carbonatación de predicción lineal a una concentración de 3% de CO₂ (CPC Relación a/c 0.6, 0.7 y 0.8)

Se constata que la predicción obtenida con la ecuación basada en la raíz cuadrada del tiempo presentó una mayor dispersión resultando en una pobre correlación comparada con la predicción obtenida con la ecuación basada en la tendencia lineal (Fig. 18). Dicho comportamiento se presentó para todos los ambientes de exposición, lo cual demostró que el comportamiento aceptado generalmente en la literatura y basado en la raíz cuadrada del tiempo debe revisarse al menos para períodos cortos de exposición.

Los resultados obtenidos a través de la presente investigación permiten establecer que es posible predecir con una alta correlación la profundidad de carbonatación natural a partir de ensayos acelerados. Sin embargo, esta correlación solo puede ser válida para las condiciones experimentales aplicadas en esta investigación. Por lo tanto, se asevera importante ampliar la matriz experimental con una mayor variedad de tipos de concretos que permita contar con relaciones del avance de carbonatación con el ambiente de exposición.

4. COMPARATIVA ENTRE LAS PREDICCIONES

En la Tabla 9 se presenta el comportamiento del coeficiente K, de los concretos fabricados, calculado con la ayuda de la ec. 4 (considerando \sqrt{t}) para una concentración de CO₂ de 3% y a diferentes tiempos de exposición en el medio acelerado. Para efectos de comparación, se presentan también los resultados de la conversión del Kpromedio en el coeficiente atmosférico correspondiente (indicado como "Conversión" en la Tabla 9) utilizando para ello la ecuación propuesta por Moreno et al. (1999).

Tabla 9: Coeficiente de carbonatación K, en mm/año^{0.5}

Tipos de Concreto	K, mm/año ^{0.5}						
	Para 3% de CO ₂						
	Conversión						
Concreto	3 días	7 días	14 días	28 días	Promedio	(Moreno, 1999)	Natural
CPO 0.6	8.2	9.0	7.8	6.2	7.8	0.80	3.11
CPO 0.7	6.8	8.8	8.0	7.5	7.8	0.80	3.58
CPO 0.8	14.6	10.3	10.0	9.9	11.2	1.14	3.32
CPC 0.6	14.8	16.8	11.2	13.4	14.1	1.44	4.01
CPC 0.7	13.5	17.0	11.2	14.2	14.0	1.43	4.76
CPC 0.8	22.9	18.0	18.9	18.9	19.7	2.01	5.65

De manera general, se constatan valores muy diferentes entre ambos coeficientes lo cual demuestra que el uso de la ley de la raíz cuadrada del tiempo para nuestros tiempos de exposición no es adecuada.

En la tabla 10, se presenta la predicción de la profundidad de carbonatación obtenida utilizando la ecuación basada en la raíz cuadrada del tiempo (ec. 4) y las propuestas en esta investigación (ec. 7 y 8). Se reportan también los valores de la profundidad de carbonatación obtenida mediante la aplicación de la fenolftaleína (prueba de campo).

Tabla 10: Comparativa de Profundidad de carbonatación

Tipos de Concreto	Tiempo de exposición natural	Prueba de Campo	Predicción (ec. 4)	Predicción (ec.7)	Predicción lineal (ec. 8)
	(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
CPO 0.6	95	0.6	0.5	1.7	0.8
	170	1.3	1.7	2.2	1.5
	246	3.4	3.5	2.7	2.2
	270	3.3	4.2	2.8	2.4
	365	*4.5	7.8	3.2	3.2
CPO 0.7	95	1.1	0.5	1.9	1
	170	1.7	1.7	2.6	1.8
	246	3.6	3.5	3.1	2.6
	270	3.5	4.3	3.3	2.8
	365	*4.8	7.8	3.8	3.8

* Valor calculado con la tendencia de la profundidad de carbonatación (no experimental).

La comparativa entre las predicciones muestra un mejor fiabilidad de la predicción lineal (ec. 8) para representar los valores reales obtenidos mediante la prueba de carbonatación, que aquellas utilizando las predicciones obtenidas mediante la ecuaciones 4 y 7. Se obtuvo una tendencia similar con los otros tipos de concreto analizados.

La predicción del avance de la carbonatación mediante la ecuación 4 ha sido utilizada durante muchos años. Como es sabido, esta ecuación está basada en la representación del avance de la carbonatación mediante un proceso puramente difusivo. De tal manera que el coeficiente K de dicha ecuación, es un valor que involucra de manera implícita a las condiciones de exposición y a las propiedades del concreto a través del tiempo, permitiendo una simplificación de la predicción. Sin embargo, ha dificultado la comprensión del fenómeno debido a que las variaciones en las condiciones de exposición en medios naturales son inevitables, como se ha puesto en evidencia en este trabajo (Fig. 17). Es así que, el uso de ecuaciones que permitan realizar predicciones que consideren las variaciones en las condiciones de exposición, adquieren mayor relevancia si se consideran los escenarios ambientales previstos por el IPCC (2007), los cuales sugieren cambios importantes en la concentración de CO₂, períodos de lluvia y temperatura.

4. CONCLUSIONES

Es posible obtener relaciones aceptables entre el proceso de carbonatación en un medio natural con respecto a un medio acelerado, para especímenes realizados con similar contenido y tipo de cemento.

El parámetro A depende de las condiciones y tiempo de exposición de los especímenes.

La predicción basada en la tendencia lineal presenta una menor dispersión y una mayor correlación con los datos obtenidos de forma experimental en comparación con la predicción basada en la raíz del tiempo. Esto aplicándose al menos a los períodos de exposición, ambiente y tipos de concreto concernientes a esta investigación.

La predicción basada en la raíz del tiempo, no resultó confiable para nuestros períodos de exposición (1 año). Se sugiere su aplicabilidad para tiempos de exposición mayores a 1 año.

AGRADECIMIENTOS

A la memoria del Dr. Eric Iván Moreno (12/febrero/1963 - 06/julio/2015), académico e investigador, por su invaluable contribución al conocimiento del fenómeno de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado y por su incansable motivación para la formación de futuros investigadores en nuestro país. A la Secretaría de Desarrollo Sustentable del gobierno del estado de N.L., por facilitar el uso de instalaciones para colocar las muestras en la estación de monitoreo SIMA. Al Dr. Gerardo Manuel Mejía Velázquez por la atención prestada para la realización de esta investigación. Especialmente se agradecen los apoyos otorgados para el desarrollo de este proyecto CONACYT Ciencia Básica CB-2007/82464 y PAICYT CA1499-07. Por último, se quisiera agradecer a instituciones como SIMA y CONAGUA para los que sin su apoyo en este proyecto no sería posible al menos en los términos en que es presentada.

REFERENCIAS

- Bier, Th. A., (1987), "Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste", Materials Research Society Symposium, 85, pp.385 -392.
- Haque, M. N., y H. Al-Khaiat, (1996), "Carbonation of concrete structures in hot dry coastal regions", Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 2, pp. 123-129.
- IPCC, (2007), Cambio climático 2007: "Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático", Directores: Pachauri, R.K. y A. Reisinger, IPCC, Ginebra, Suiza, pp. 104.
- Khunthongkeaw, J., S. Tangtermsirikul y T. Leelawat, (2006), "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete", Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 20, pp. 744-753.
- Montani, R., (2000), La carbonatación, enemigo olvidado del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, diciembre, México.
- Montemor M.F., M. P. Cunha, M. G. Ferreira y A. M. Simoes, (2002), "Corrosion behavior of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides", Cement and Concrete Composites, Vol. 24, No. 1, pp. 45-53.
- Moreno E. I., (1999), "Carbonation of blended cement concretes", Disertación Doctoral, University of South Florida.
- 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, Vol. 4, No. 2, pp. 43-48.
- Moreno, E. I., G. G. Domínguez, E. J. Cob y F. Duarte, (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, Vol. 8, No. 2, pp. 117-130.
- Moreno, E. I. (2006), "Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación", Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 10, No. 3, pp.5-12.
- Moreno, E. I., F. Ayuso-Blanco, A. A. Torres-Acosta y O. Troconis-Rincó, (2009), "Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (Proyecto DURACON)". Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 13 No. 3, pp. 53-60.
- Neville, A.M. y J. J. Brooks, (1993), Concrete technology, Longman Group UK Ltd.

Neville, A. M., (2007), Tecnología del concreto, Cemento Portland, IMCYC, Cuarta edición, México.

Parrot, L. J., (1987), A Review of Carbonation in Reinforced Concrete, Cement and Concrete Association, Building Research Establishment.

Serrano, D. y E. I. Moreno, (2006), “Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado”, Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 10, No. 2, pp. 37-45.

Tuutti, K., (1982), Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Suecia.

Uller L., O. Trocónis y P. Helene, (1998), Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Red Iberoamericana DURAR, CYTED, pp. 43.

Yoon, I. O. Copuroglu y K. Park, (2007), Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, Atmospheric Environment, Vol. 41, No. 34, pp. 7274-7285.