

Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración

Eric I. Moreno¹, Gerardo G. Domínguez Lara², Enrique J. Cob Sarabia³, Francisco Duarte Gómez⁴

RESUMEN

La carbonatación del concreto es la segunda causa de corrosión en estructuras de concreto reforzado. La corrosión por la carbonatación tiende a desarrollarse más tarde, el proceso es más lento que la corrosión por cloruros, y conduce a una corrosión uniforme del acero que acelera la formación de grietas y reduce la vida útil de servicio de la estructura. En ambientes tropicales no marinos, la corrosión por carbonatación podría ser el principal mecanismo de corrosión en concreto reforzado. Sin embargo, el proceso de carbonatación natural es muy tardado y un proceso acelerado es necesario para obtener datos en menor tiempo. El objetivo de esta investigación fue el estudio del efecto de la relación agua/cemento en las velocidades de carbonatación de especímenes de concreto utilizando una cámara de aceleración. Se elaboraron probetas de concreto simple y reforzado con cuatro diferentes relaciones agua/cemento. Las mezclas fueron caracterizadas mediante determinaciones de porosidad, esfuerzo a la compresión, y resistividad. La concentración usada en la cámara fue de 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa. Los resultados mostraron una mayor velocidad de carbonatación para concretos con una mayor relación agua/cemento.

Palabras Clave: Carbonatación, Concreto, Corrosión, Prueba acelerada, Vida útil

INTRODUCCIÓN

El acero en estructuras de concreto es protegido del ambiente atmosférico debido a la alcalinidad de la solución del poro ($\text{pH} > 12.5$). Sin embargo, el acero puede corroerse si la protección se pierde. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros —en ambientes marinos— o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO₂ atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto ($\text{pH} \approx 8$; Moreno 2001), desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. La corrosión uniforme, inducida por carbonatación, acelera la formación de grietas si las condiciones adecuadas de temperatura y humedad están presentes. En lugares con clima tropical, como el de la Península de Yucatán, las condiciones atmosféricas pueden fomentar la agresividad del dióxido de carbono (Castro et al. 1997, Veleza et al. 1998).

¹ *Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales, FIUADY*

² *Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Física, FIUADY*

³ *Estudiante de la Maestría en Ingeniería – Construcción, FIUADY*

⁴ *Técnico Académico del Laboratorio de Materiales, FIUADY*

Actualmente se conoce que la carbonatación depende de varios factores (Bakker 1988) como son el tipo y cantidad de cemento, porosidad del material, tipo y cantidad de adiciones de puzolanas (Moreno y Sagüés 1998), etc. Sin embargo, no se han realizado estudios formales de la carbonatación en concretos con agregados calizos de alta porosidad y bajo condiciones tropicales. Debido a esto, no es posible extrapolar la información obtenida en la literatura. Adicionalmente, con el paso del tiempo, la resistencia de diseño de las estructuras de concreto ha aumentado como consecuencia de los avances tecnológicos y de control. Debido a la correlación que existe entre la resistencia a la compresión y la relación agua/cemento, el objetivo de esta investigación fue el estudio del efecto de la relación agua/cemento en las velocidades de carbonatación de especímenes de concreto. Los resultados obtenidos nos permitirán pronosticar el momento en que la protección alcalina se pierde, con lo que se podría programar el

mantenimiento de los edificios en función de su resistencia a la compresión de diseño.

Por otra parte, la carbonatación es un proceso lento. Para poder obtener resultados a corto plazo se requiere acelerar el proceso. Para esto, se construyó una cámara de carbonatación que permita acelerar el proceso. Varios investigadores han utilizado este procedimiento con bastante éxito.

METODOLOGÍA

Probetas de concreto

Se diseñaron cuatro diferentes tipos de mezclas de concreto para su estudio en ambientes acelerados de CO₂, con el fin de determinar sus coeficientes de carbonatación para cada una. Las características del material utilizado para preparar las mezclas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales usados

Material	Propiedad	Proveedor
Cemento	Tipo I, gravedad específica 3.15	CEMEX
Grava	Peso específico: 2.4	MAYUCSA
	Absorción: 5.5%	
	Peso unitario seco: 1,117 kg/m ³	
Arena	Peso específico: 2.44	MAYUCSA
	Absorción: 4.7%	
	Módulo de finura: 2.64	

Las relaciones agua-cemento (a/c en peso) fueron escogidas de acuerdo a las que más se utilizan en el estado de Yucatán. La quinta mezcla fue una repetición de la mezcla de a/c = 0.7 con un revenimiento menor que el usado en las otras cuatro mezclas. La Tabla 2 presenta las características de cada mezcla las cuales fueron obtenidas de acuerdo a las normas establecidas (ASTM) para cada una de las pruebas que se muestran.

Por cada mezcla se elaboraron 12 probetas cilíndricas de concreto simple de 7.5 cm de diámetro y de 15 cm de altura para realizar las pruebas de profundidad de carbonatación, 4 probetas de 10 cm de

diámetro y de 20 cm de altura para determinar la porosidad, y 3 probetas de 15 cm de diámetro y de 30 cm de altura las cuales se utilizaron para determinar el esfuerzo a la compresión.

También se elaboraron por cada mezcla 3 probetas de concreto en forma de prismas de 5 x 10 x 20 cm reforzadas con dos varillas de acero del # 3. Estas probetas se programaron con el fin de monitorear los potenciales de corrosión de las barras embebidas en ellas (Figura 1). Los resultados son publicados aparte (Moreno et al. 2004).

Tabla 2. Características de las mezclas

Mezcla	a/c (en peso)	Revenimiento (cm)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Resistividad (kΩ-cm)	Contenido de aire
0.80	0.8	10	180	5	n.d.
0.70	0.7	10	217	5	2.8%
0.62	0.62	10.5	261	5	2.9%
0.55	0.55	9	309	5	2.9%
0.7*	0.7	5.5	210	4	3.2%

* nd : no disponible

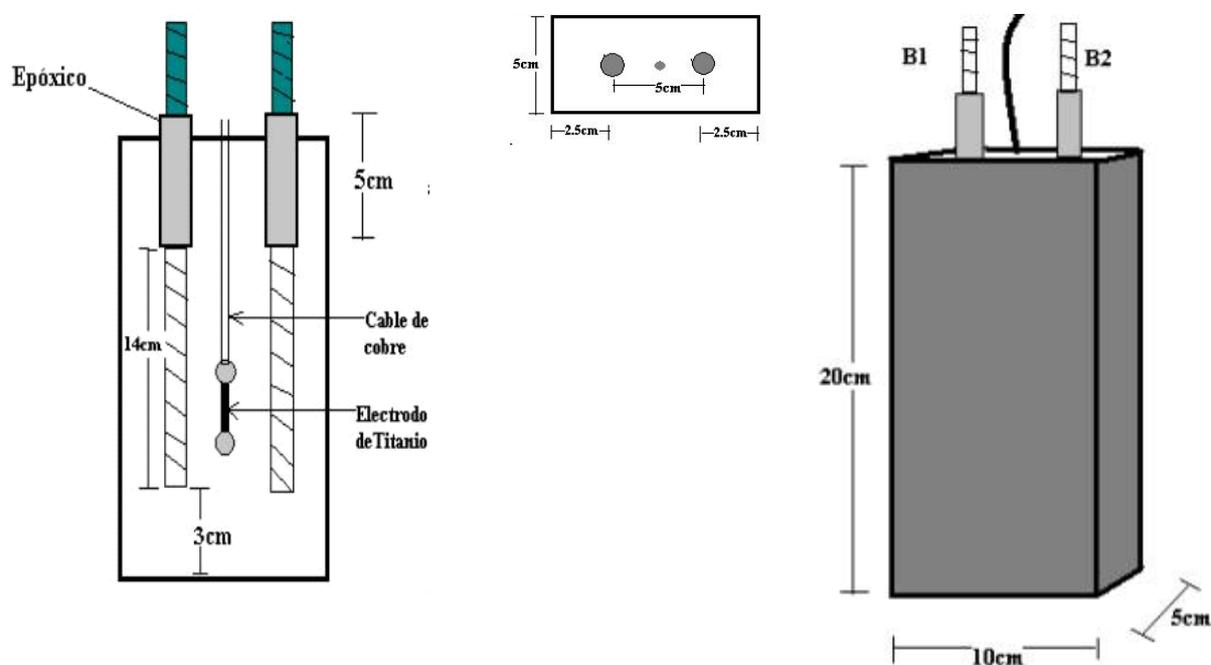


Figura 1. Probetas prismáticas

Cámara de Carbonatación

Con el propósito de acelerar el proceso de carbonatación en el concreto, fue necesario construir una “cámara de carbonatación”, para tener en su interior un ambiente con mayor concentración de CO₂ que en el ambiente normal.

Esta cámara, con dimensiones de 1.22 m de largo, 0.32 m de ancho y 0.45 m de alto, tiene forma de prisma rectangular siendo en su mayor parte de vidrio a excepción de la tapa que es de acrílico con un espesor de 1 cm, la cual se fijó en la cámara mediante

una cinta selladora que evita fugas del interior de la cámara. Esta tapa tiene dos orificios de 5 mm que sirven como salidas de aire y dos orificios más de 19 mm que sirven para poder insertar un medidor de humedad relativa (HR); éstos últimos fueron adecuados con tubo de PVC de 5 cm de largo con rosca y tapón para los casos en los que el medidor de humedad no está colocado. La tapa cuenta con otro orificio de 4 mm que sirve como entrada de aire. Además, en esta tapa se colocaron bornes para conexiones eléctricas, con el fin conectarlos a las barras de refuerzo y al electrodo de titanio de cada

una de las probetas prismáticas de concreto para poder monitorizar el potencial.

Dentro de la cámara se conectó una manguera desde el orificio de entrada de aire hasta la

parte media del fondo de la cámara, en donde se colocó un ventilador y justo por encima de éste, en la parte media superior, se situó un deflector para lograr una mejor distribución del flujo de aire, como se aprecia en la Figura 2.

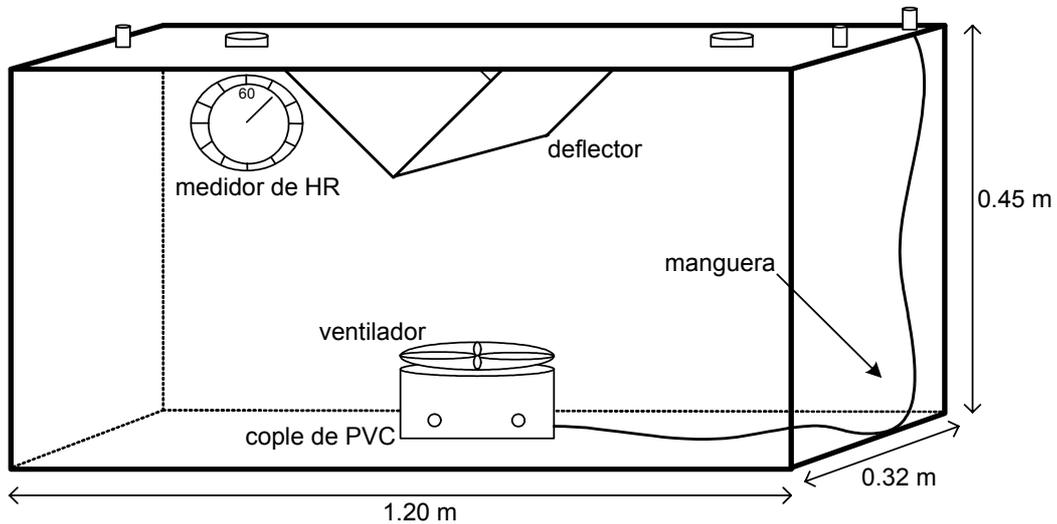


Figura 2. Esquema de la cámara

Para obtener la concentración deseada de CO₂ (alrededor del 4%) y de humedad relativa (al 60%), se mezcló el flujo de CO₂, proveniente de un tanque comercial de 20 kg, con aire a dos niveles de humedad relativa (aire seco y aire húmedo) provenientes de un compresor de aire. Se controló el volumen de los gases (aire y CO₂) por medio de medidores de flujo de distintas capacidades, utilizándose tres de ellos: uno para controlar el

volumen de CO₂ (de menor capacidad) y, los otros dos (de igual capacidad) para aire seco y húmedo. La salida del compresor se dividió en dos flujos, uno en dirección al medidor de flujo de aire seco y otro en dirección a un *humidificador*, el cual es un recipiente de PVC (tubo vertical) cerrado, con agua, que cuenta con dos orificios: uno situado en un costado en la parte inferior y el otro en la parte de arriba, y también cuenta con un burbujeador en el interior (Figura 3).

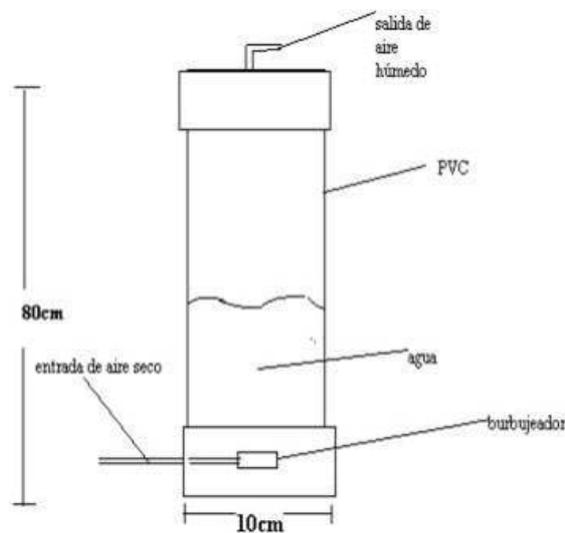


Figura 3. Esquema del humidificador de aire.

El flujo a la salida del humidificador se mezcló junto con el aire seco del compresor y el flujo de CO₂ para dirigirse hacia el interior de la cámara

(Figura 4). Los medidores de flujo de aire seco y húmedo se ajustaron periódicamente para obtener una humedad relativa del 60%, aproximadamente.

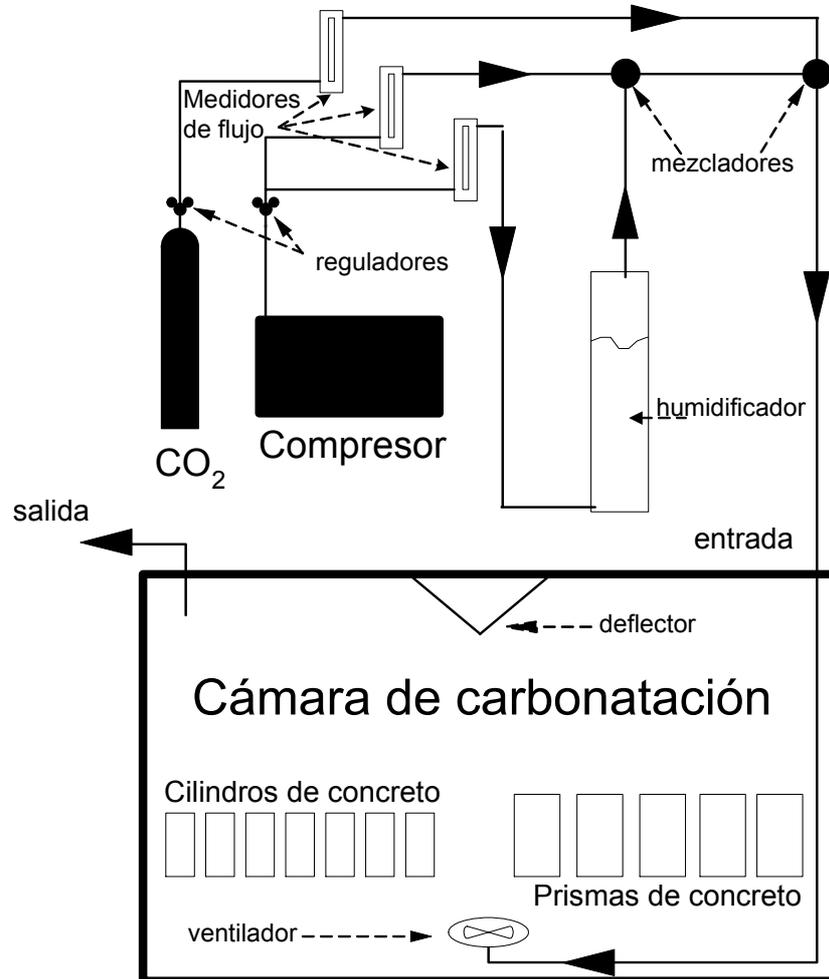


Figura 4. Esquema completo de la cámara.

Los medidores de flujo utilizados fueron: dos medidores de flujo No 14-96 (para aire seco y húmedo) con una capacidad nominal entre 854 y 5940 *ml/min* y un medidor de flujo No 12-10 (para el CO₂) con una capacidad nominal entre 13.1 y 202.1 *ml/min*; antes de ser instalados, fueron calibrados para tener un mayor control del flujo enviado al interior de la "cámara".

Las pruebas aceleradas de carbonatación consistieron en exponer los especímenes de concreto a un ambiente con mayor concentración de CO₂ (4%) que en el ambiente normal (~0.035%).

Se sometieron a este ambiente tres especímenes cilíndricos de concreto de 7.5 cm de diámetro y de 15 cm de altura por cada mezcla; también se colocaron dentro de la cámara las probetas de concreto prismáticas, existiendo tres de éstas por cada mezcla, y debidamente conectadas a los bornes. Todas las probetas se colocaron cuidando que la separación entre ellas fuese suficiente para que el flujo de la mezcla de gas se distribuya por toda la cámara.

Una vez colocados los especímenes en la cámara, se puso a funcionar ésta enviando sólo la mezcla de aire seco y húmedo, para lo cual se habilitaron los medidores de flujo correspondientes.

Se ajustaron los medidores de flujo hasta que la humedad relativa del interior de la cámara se estabilizó a un valor del 60% aproximadamente. Se procuró que la columna de agua del humidificador se mantuviera a una misma altura.

Cálculos para el flujo de CO₂

En el caso del flujo de CO₂, para poder enviar dicho gas a la cámara, fue necesario conocer aproximadamente el equivalente en volumen al número de moles de CO₂ que se requiere por cada espécimen por día dentro de la cámara a un ambiente al 4% de CO₂. Para esto fue necesario conocer el número de moles de Ca(OH)₂ consumidos por espécimen por día, puesto que de acuerdo a la siguiente reacción:



un mol de Ca(OH)₂ reacciona con un mol de CO₂ para producir un mol de CaCO₃. Para conocer la profundidad de carbonatación (x) por día, fue necesario estimar el coeficiente de carbonatación, lo cual se obtuvo con los especímenes de control, obteniéndose un coeficiente de carbonatación por día por mezcla para el ambiente del laboratorio (k_a), para después convertirlo en un coeficiente de carbonatación para un ambiente al 4% de CO₂ con la ayuda de la siguiente ecuación (Moreno 1999):

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (2)$$

donde k₁ y k₂ son los coeficientes de carbonatación para concentraciones distintas de CO₂, C₁ y C₂, y de esa manera conocer la profundidad de carbonatación con:

$$x = k t^{1/2} \quad (3)$$

Teniendo el volumen de concreto para una profundidad de carbonatación por día, se puede conocer la cantidad de cemento contenida en ese volumen y calcular la cantidad de Ca O, puesto que éste representa aproximadamente un 65% del contenido de cemento por mezcla. Conociendo la cantidad de Ca O para cada espécimen se puede obtener el número de moles correspondiente al Ca(OH)₂ y con esto se tiene el número de moles de CO₂ con lo que se puede calcular el volumen de CO₂

requerido para esos especímenes por día. Con esto, ya se puede saber cuanto flujo de CO₂ se necesita enviar por día dentro de la cámara.

Determinación de la profundidad de carbonatación

El dióxido de carbono al penetrar por los poros del concreto reacciona con los constituyentes alcalinos formando carbonatos de calcio y produce una reducción del valor del pH (de un valor de 12.5 a uno por debajo de 9.5, Moreno 2001). El espesor de la capa carbonatada se llama "profundidad de carbonatación" y el procedimiento para determinar dicho espesor está descrito en la Tabla 3. La reducción del pH de la capa carbonatada se hace visible por el cambio de color utilizando un indicador de pH apropiado.

El indicador de pH que más se utiliza es una disolución del 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. Esta solución es incolora en pH inferiores a 8.5. Para valores de pH superiores a 9.5 se torna de color púrpura, entre 8.5 y 9.5 el indicador adquiere una coloración de color rosa al rojo-púrpura según evoluciona el pH desde 8.5 a 9.5.

Medición de la profundidad de carbonatación en los cilindros

Se realizó el procedimiento descrito anteriormente para determinar la profundidad de carbonatación en los cilindros de concreto de 7.5 cm de diámetro y de 15 cm de altura, tanto en los expuestos al ambiente del laboratorio (control) como en los expuestos al ambiente de la cámara, dos cilindros de concreto por mezcla fueron retirados a diferentes intervalos de la cámara de carbonatación y una sección de aproximadamente un tercio de la longitud del cilindro fue cortada utilizando el cincel y el martillo, esta sección se escogió de manera que la influencia axial no afectara en forma significativa la penetración radial. En cada cilindro se tomaron ocho mediciones radiales del frente de carbonatación. La manera en que se escogieron los cilindros de concreto de cada mezcla dentro de la cámara para las mediciones fue de la siguiente manera: para la primera medición se tomaron las secciones 1A y 2A de los cilindros, para la segunda medición se tomaron las secciones 2B y 3A y para la tercera medición se tomaron las secciones 1B y 3B (Figura 5).

Tabla 3. Equipo, procedimiento y criterio para la determinación de la carbonatación

Equipos	Martillo
	Instrumento de medición: regla, vernier (precisión 0.5 mm)
	Cinzel pequeño
Procedimiento	Después de partir cuidadosamente las probetas se procede como sigue:
	1.- Antes de aplicar la fenolftaleína, se limpia el polvo remanente.
	2.- Una vez hecho esto se aplica la fenolftaleína. Se recomienda que sea por atomizador.
	3.- Después de un tiempo de la aplicación se debe detectar el cambio de coloración.
	4.- Entonces se medirá la profundidad con el vernier
Criterio	5.- Para efectuar la medición de la profundidad de la zona incolora desde la superficie se toma el siguiente criterio:
	a) Si la carbonatación presenta un frente homogéneo, la profundidad de carbonatación será la cantidad medida d b) Cuando el frente sea de manera irregular, la medida será una penetración media, d , la penetración máxima $d_{máx}$ y la penetración mínima $d_{mín}$. De igual manera se procederá cuando la carbonatación presente penetraciones singulares.

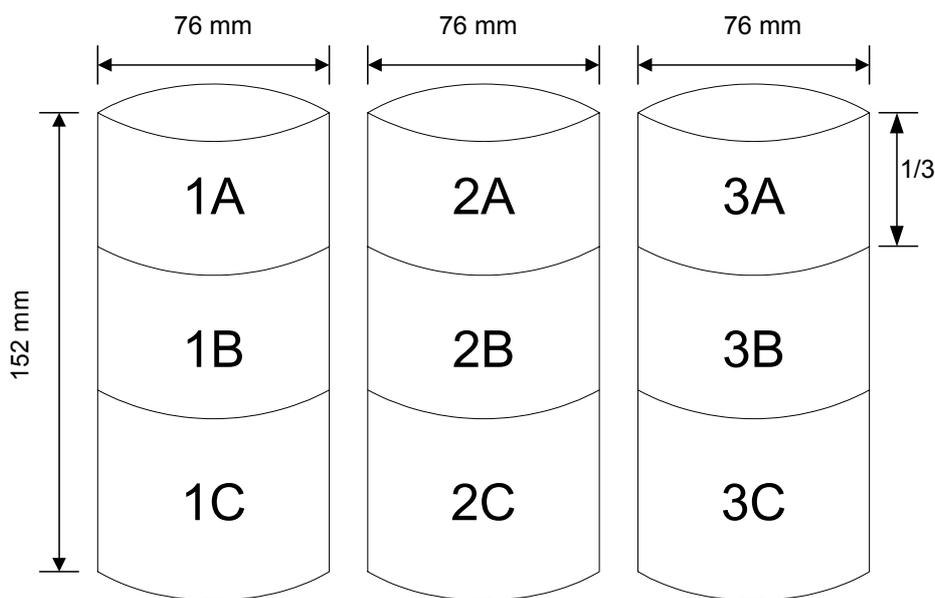


Figura 5. Secciones de cilindros de concreto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los pesos de las probetas.

Durante el período de acondicionamiento de las probetas de concreto, en el ambiente del

laboratorio, se tomaron mediciones de los pesos de los cilindros por cada mezcla para observar la pérdida de masa debido al secado del concreto. La Figura 6 muestra el porcentaje de pérdida de masa por mezcla.

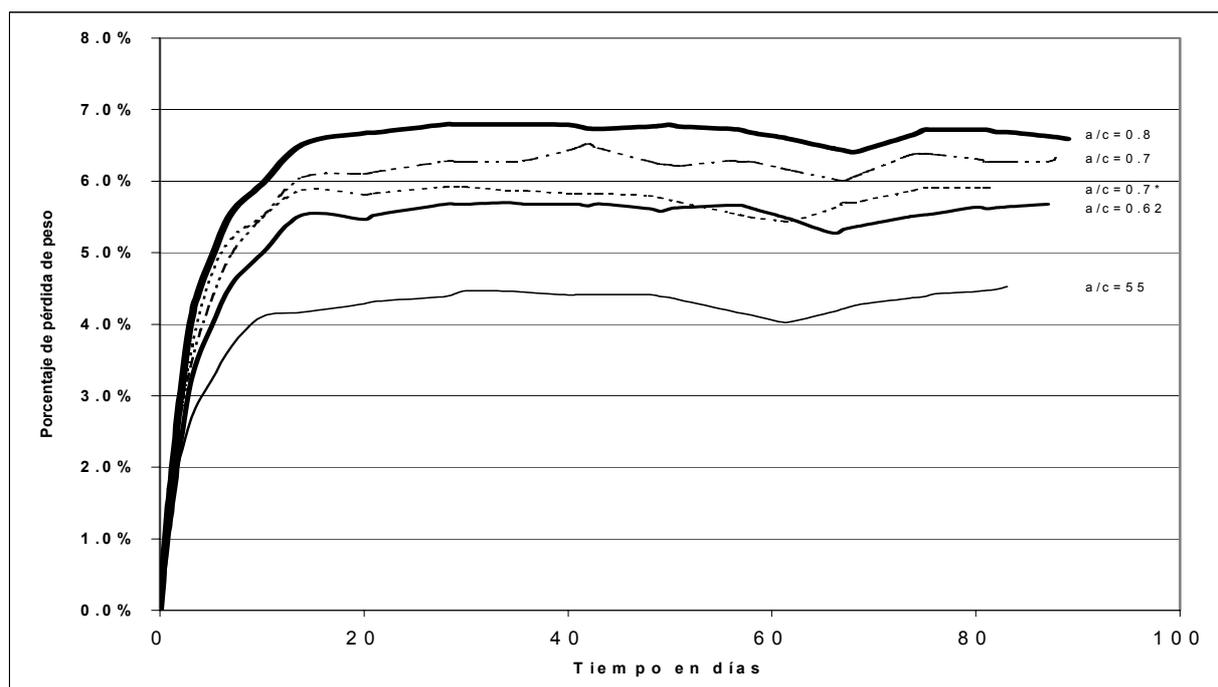


Figura 6. Pérdida de peso de probetas con distinta relación a/c.

Podemos observar que las probetas de las mezclas con relación a/c de 0.8, 0.7, y 0.62 perdieron entre 5% y 7% de su masa desde los primeros 20 días y las probetas de la mezcla de a/c= 0.55 perdieron entre 4% y 5% de masa inicial. El mayor porcentaje de pérdida de masa que se registró, 6.8%, fue para las probetas de la mezcla de a/c=0.8 y el menor porcentaje de pérdida de masa, 4.5%, para las probetas de la mezcla de a/c=0.55, las cuales son las mezclas con mayor y menor relación agua-cemento, respectivamente. Para las probetas de igual relación agua-cemento (a/c=0.7), las de la mezcla con mayor revenimiento (10cm) perdieron más masa que las de la mezcla de menor revenimiento (5.5cm), debido a que un mayor revenimiento representa una mayor cantidad de agua en la mezcla.

En general, se puede observar que la variación del porcentaje de pérdida masa entre las mezclas está relacionada con a/c, ya que se registra mayor porcentaje de pérdida de masa a mayor a/c; esto se puede atribuir a que una mayor a/c representa una mayor cantidad de agua por peso de cemento, y durante el período de acondicionamiento, el agua que no reaccionó con los componentes del cemento se evapora, y por consiguiente hay una disminución en

la masa de los especímenes respecto a su masa inicial. En la Figura 7 se puede observar la pérdida de masa en función de la relación a/c.

Por otro lado, realizando cálculos sobre la hidratación del cemento por cada tipo de mezcla (Neville 1988), para la cantidad de cemento y agua contenidos en una probeta cilíndrica de concreto (7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura), se obtienen los datos de la Tabla 4.

De estos cálculos podemos corroborar que la cantidad de agua capilar varía de acuerdo con a/c: a mayor a/c mayor volumen de agua capilar. Por lo tanto, una mezcla con alta a/c puede perder mayor cantidad de agua que una de menor a/c, y por consiguiente existe un mayor porcentaje de pérdida de masa a mayor a/c. Lo cual explica el orden de las mezclas en las Figuras 6 y 7. Por otra parte, podemos ver, que en el caso de las mezclas de igual a/c (a/c=0.7), un mayor revenimiento representa un volumen mayor de agua capilar que uno de menor revenimiento, y por tanto, una pérdida de masa mayor a mayor revenimiento.

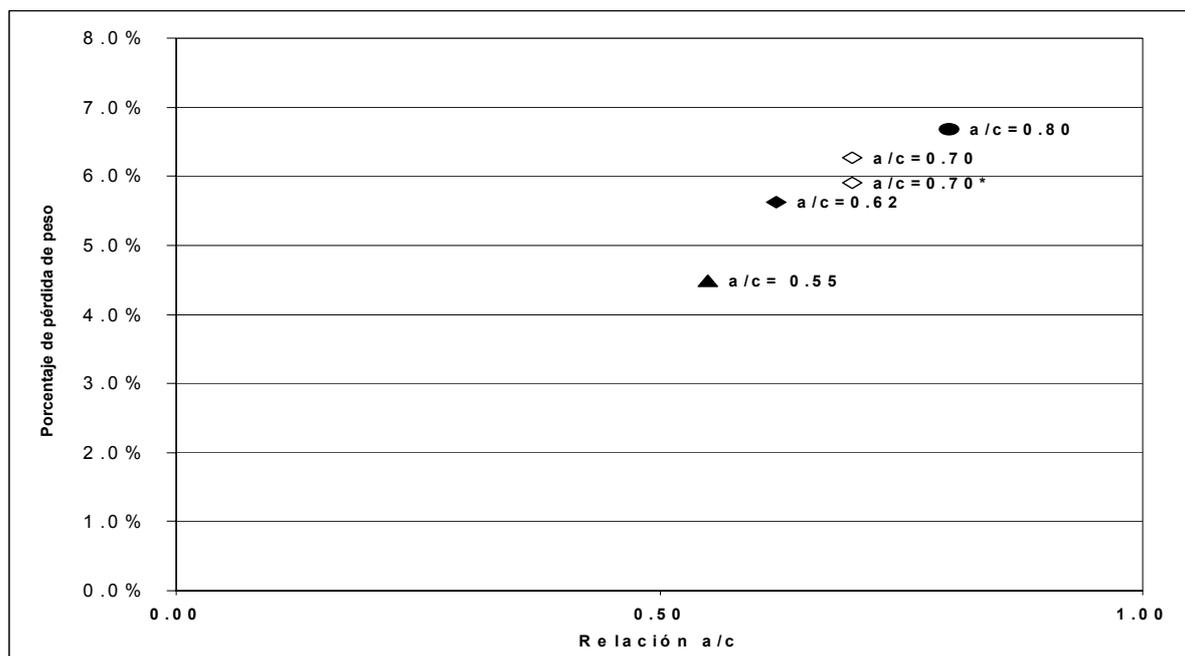


Figura 7. Porcentaje de pérdida de peso para mezclas de distinta relación a/c.

Tabla 4. Proporciones volumétricas de la pasta de cemento. Asumiendo 100% de hidratación, para la cantidad de cemento contenida en una probeta cilíndrica de 7.5 cm de diámetro y de 15 cm de altura

	Mezcla	0.80	0.70	0.7*	0.62	0.55
Productos de hidratación	Volumen de productos de hidratación	95 ml	109 ml	97 ml	125 ml	139 ml
	Volumen del gel de agua	37 ml	42 ml	38 ml	49 ml	54 ml
Porosidad capilar	Volumen de agua capilar	74 ml	62 ml	56 ml	50 ml	37 ml
	Volumen de poros capilares vacíos	11 ml	13 ml	12 ml	15 ml	17 ml

Análisis de la profundidad de carbonatación

Las mediciones del frente de carbonatación de los cilindros de concreto fueron convertidas de mediciones radiales en el cilindro a mediciones del frente de carbonatación tomadas en una superficie plana infinita. Esta conversión se realizó siguiendo el procedimiento especificado por Moreno (1999). Teniendo estos valores se obtuvo el promedio de las mediciones por cada cilindro y luego el promedio de

los dos cilindros. La Tabla 5 muestra los valores de la profundidad de carbonatación de los cilindros (valores convertidos) expuestos a un ambiente acelerado del 4% de CO₂ (dentro de la cámara) para cada una de las mezclas y también para cilindros expuestos al ambiente de laboratorio.

En la Tabla 5 también se muestran las concentraciones efectivas de CO₂ dentro de la cámara durante los períodos de evaluación; esto fue realizado

con la ayuda de un equipo infrarrojo medidor de CO₂ que se colocaba a la salida de la cámara para monitorear la concentración de dicho gas. Debido al periodo de acondicionamiento de los cilindros, éstos sufrieron una carbonatación inicial, la cual se determinó realizando las mediciones del frente de carbonatación en los cilindros de control, expuestos en el ambiente del laboratorio. Estas mediciones se

realizaron el mismo día en que los cilindros se someterían al ambiente acelerado de CO₂ (datos a los 80 días de la Tabla 5), para que, de esta manera, se tenga la profundidad de carbonatación inicial de los cilindros antes de ser expuestos a un ambiente del 4% de CO₂ y así poder conocer el avance durante los periodos de exposición acelerada.

Tabla 5. Profundidad de carbonatación (en mm)

Mezcla	Tiempo	Profundidad				
		control		ambiente al 4% CO ₂		
		día 80	día 121	día 14	día 35	día 49/121
0.80	Esp.1	4.4	6.0	15.5	c.c.	
	Esp.2	4.3	6.7	15.9	c.c.	
	Prom.	4.4	6.3	15.7		
0.70	Esp.1	3.3	4.3	13.9	24.4	c.c.
	Esp.2	3.3	4.6	13.5	24.2	c.c.
	Prom.	3.3	4.5	13.7	24.3	
0.7*	Esp.1	3.2	5.1	14.6	c.c.	
	Esp.2	3.1	4.9	14.3	c.c.	
	Prom.	3.2	5.0	14.4		
0.62	Esp.1	2.1	3.0	10.6	19.9	22.9
	Esp.2	1.8	3.2	10.9	20.4	23.2
	Prom.	1.9	3.1	10.8	20.2	23.1
0.55	Esp.1	1.3	1.9	7.4	14.7	23.3
	Esp.2	1.4	2.2	8.2	14.6	21.4
	Prom.	1.4	2.0	7.8	14.6	22.3[†]
4.1	3.8					

c.c.: completamente carbonatado

[†] Prueba realizada a 121 días

A los 14 días de exposición acelerada, las probetas que registraron mayor profundidad de carbonatación fueron las de la mezcla de mayor a/c (a/c=0.8); se puede observar también que la profundidad de carbonatación aumenta el doble conforme la a/c aumenta de a/c=0.55 a a/c=0.8. También se observa a los 35 días la misma dependencia entre la profundidad de carbonatación y

la a/c. Entre las probetas de igual a/c, se observa a los 14 días que las de la mezcla con menor revenimiento registraron mayor profundidad de carbonatación que las de mayor revenimiento, esto debido a que una mezcla de menor revenimiento contiene una cantidad de cemento menor que una mezcla de mayor revenimiento y, por lo tanto, menor cantidad de productos de hidratación (Tabla 4), por lo que la

profundidad de carbonatación aumenta conforme disminuye el revenimiento.

En la Figura 8 se puede apreciar la profundidad de carbonatación de los cilindros después de haber sido rociados con fenolftaleína al 1% (indicador). Podemos ver que la mayor profundidad

se registra en el cilindro de la izquierda correspondiendo a una probeta de la mezcla de $a/c=0.8$, y la menor profundidad de carbonatación a la derecha correspondiendo a una probeta de la mezcla de $a/c=0.55$, los cilindros del centro corresponden a probetas de las mezclas de $a/c=0.7$ y $a/c=0.62$, de izquierda a derecha, respectivamente.



Figura 8. Cilindros de concreto rociados con fenolftaleína al 1% para indicar la profundidad de carbonatación .

Análisis de los coeficientes de carbonatación.

Con los datos de la Tabla 5 se pudo determinar el coeficiente de carbonatación (k_c) de cada mezcla (Tabla 6). Estos datos se obtuvieron con la ayuda de la ecuación (4), la cual toma en cuenta la profundidad de carbonatación inicial (x_0) mencionada anteriormente para el período de acondicionamiento (Moreno 1999).

$$k_c = \sqrt{\frac{x^2 - x_0^2}{t}} \quad (4)$$

donde “t” es el tiempo de exposición acelerada y “x” es el espesor de la carbonatación al tiempo “t”

Tabla 6 Coeficientes de carbonatación de los especímenes en exposición acelerada (mm/año^{1/2})

Mezcla	k _{4.0} (ambiente al 4% de CO ₂)			k _{prom}
	14 días	35 días	49/121 días	
0.80	77.0	--	--	77.0
0.70	68.0	83.5	--	75.8
0.7*	71.8	--	--	71.8
0.62	54.0	71.2	57.0	61.7
0.55	39.1	51.7	42.8	44.5

De la misma manera que los datos de la Tabla 6, los datos de la Tabla 7 se calcularon con los datos de la Tabla 5 para los especímenes de control y

con la ayuda de la ecuación (4), sólo que tomando la profundidad de carbonatación inicial como cero ($x_0 = 0$.)

Tabla 7 Coeficientes de carbonatación de los especímenes de control (mm/año^{1/2})

Mezcla	k (ambiente de laboratorio)		k _{prom}
	80 días	121 días	
0.80	9.4	10.9	10.2
0.70	7	7.8	7.4
0.7*	6.8	8.7	7.8
0.62	4.1	5.4	4.8
0.55	3	3.5	3.3

Los coeficientes de carbonatación promedio obtenidos de la exposición al 4% de CO₂ pueden ser convertidos en coeficientes de carbonatación atmosférica (k_a) con la ayuda de la ecuación (2), estos datos se muestran en la Tabla 8 para cada mezcla de concreto y tipo de exposición. Se sabe que la concentración atmosférica nominal del CO₂ es de 0.035% aproximadamente, pero para nuestro caso se

utilizó una concentración atmosférica de 0.047% la cual es un promedio de las concentraciones de CO₂ monitoreadas durante el periodo de acondicionamiento de los cilindros, en el ambiente del laboratorio. Durante las pruebas aceleradas hubo variaciones en la concentración de CO₂ por lo que se utilizó la concentración efectiva (Tabla 5).

Tabla 8 Coeficientes de carbonatación atmosférica K_a(mm/año^{1/2})

Mezcla	Especímenes en ambiente acelerado	Especímenes de control
0.80	8.4	10.2
0.70	8.2	7.4
0.7*	7.8	7.8
0.62	6.7	4.8
0.55	4.8	3.3

Podemos observar que, entre los especímenes en ambiente acelerado las mezclas de a/c=0.8, a/c=0.7 y a/c= 0.62 presentaron valores arriba de 6 mm/año^{1/2}, y la mezcla de a/c=0.55 presentó un valor arriba de los 4 mm/año^{1/2}. Entre los especímenes de control, las mezclas de a/c=0.8 y a/c=0.7 presentaron valores por arriba de los 6 mm/año^{1/2}, la mezcla de a/c=0.62 presentó un valor por arriba de los 4 mm/año^{1/2} y la mezcla de a/c=0.55 un valor por arriba de los 3 mm/año^{1/2}. En estudios anteriores se han clasificado concretos expuestos al

exterior como de calidad media los concretos que presentan valores entre 3 mm/año^{1/2} y 6 mm/año^{1/2} y los que presentan valores menores de 3 mm/año^{1/2} son considerados como de alta calidad (Alonso y Andrade 1993). En base a esto podemos decir que, de acuerdo a los especímenes de control, las mezclas de a/c=0.55 y a/c= 0.62 son de calidad media y de acuerdo con los especímenes de exposición al 4% de CO₂ sólo la mezcla de a/c=0.55 sería de calidad media. La diferencia en los resultados de la Tabla 8 con respecto a los especímenes de control puede ser debido a la

mayor humedad relativa del laboratorio que no estaba controlada.

Con los datos de los coeficientes promedio de las Tablas 6 y 7 se realizaron cálculos para obtener la profundidad de carbonatación para cada una de las

mezclas (Tabla 9), en el caso de los especímenes de exposición acelerada de CO₂ (4% de CO₂) la profundidad para una semana de exposición y en el caso de los especímenes de control se calculó la profundidad de carbonatación para un año de exposición.

Tabla 9 Profundidad de carbonatación obtenida para 7 días de exposición acelerada y para un año de exposición en el ambiente normal (mm)

Mezcla	Especímenes de exposición al 4% de CO ₂	Especímenes de control
Tiempo	7 días	1 año
0.80	10.7	10.2
0.70	10.5	7.4
0.7*	9.9	7.8
0.62	8.5	4.8
0.55	6.1	3.3

De estudios anteriores, se ha encontrado que la profundidad de carbonatación en el concreto, para una semana de exposición al 4% de CO₂ es muy similar a la profundidad de carbonatación para un año de exposición al ambiente normal (Ho y Lewis 1987). Por lo que se puede ver de los datos de la Tabla 9, la mezcla de a/c=0.8 presenta valores de profundidad de carbonatación muy similares para 7 días de exposición al 4% de CO₂ y para 1 año de exposición al ambiente normal, pero para las mezclas de a/c=0.55 y a/c=0.62 los valores de profundidad de carbonatación en la exposición acelerada para 7 días son de casi el doble de los valores en exposición al ambiente para 1 año. Comparando las concentraciones de CO₂, podemos ver que la concentración de CO₂ en el ambiente acelerado (4%) es 100 veces mayor que la concentración en el ambiente normal (0.04%), y tomando en cuenta que un año equivale a 52 semanas, podemos deducir mediante la razón 100/52, que una semana (7 días) en ambiente al 4% de CO₂ es equivalente, aproximadamente, al doble que en un año de exposición en ambiente normal (0.04% de CO₂), lo cual se ha observado con las mezclas de a/c=0.62 y a/c=0.55 en la Tabla 9. Las variaciones en las otras relaciones a/c pueden deberse a la humedad relativa, como se mencionó anteriormente.

CONCLUSIONES

Para las condiciones y los materiales usados en esta investigación se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Existe una relación entre la pérdida de masa por secado al ambiente y el tipo de mezcla; a mayor a/c, mayor porcentaje de pérdida de masa.
- En el caso de mezclas con la misma a/c, se observó que, a mayor revenimiento, mayor porcentaje de pérdida de masa.
- La profundidad de carbonatación varió de acuerdo al tipo de mezcla, mayor profundidad de carbonatación conforme aumenta a/c.
- Existe una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento; la profundidad de carbonatación aumenta conforme el contenido de cemento disminuye.
- Entre las mezclas de igual a/c, la profundidad de carbonatación varió en forma inversa al revenimiento; la

profundidad de carbonatación aumenta conforme el revenimiento disminuye.

- Los coeficientes de carbonatación presentaron una variación de acuerdo con la a/c ; a mayor a/c , mayor fue el coeficiente de carbonatación.

- Los resultados obtenidos en ambiente acelerado son comparables con los resultados obtenidos en especímenes de control expuestos al ambiente de laboratorio, respaldando el diseño y funcionamiento de la “cámara de carbonatación”.

REFERENCIAS

1. Alonso C. y Andrade C. (1993). Life time of rebars in carbonated concrete. En Proceedings of the 10th European Corrosion Congress, trabajo No. 165, Barcelona, España.
2. Bakker R. F. M. (1988). Initiation period. En Corrosion of Steel in Concrete, Schiessel P. (editor), p. 22, Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.
3. Castro P., Véleva L. y García J. (1997). Distribución de la humedad relativa y temperatura en concreto expuesto a una atmósfera rural-urbana. En Memorias del XII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, p. 42, México.
4. Ho D. W. S. y Lewis R. K. (1987). Carbonation of concrete and prediction. “Cement and Concrete Research”, 17 (3), 489-504.
5. Moreno E. I. (1999). “Carbonation of Blended-Cement Concretes”, Tesis de Doctorado, University of South Florida, Florida, Estados Unidos de América.
6. Moreno E. I. (2001). Valores de pH de la pasta de cemento puzolánico carbonatado. “Ingeniería —Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán”, 5 (1), 33-38.
7. Moreno E. I. y Sagüés A. A. (1998). Carbonation-induced corrosion on blended-cement concrete mix designs for highway structures. En Memorias del NACE CORROSION/98, trabajo No. 636, Houston, Texas.
8. Moreno E. I., Cob E. y Castro P. (2004). Corrosion rates from carbonated concrete specimens. En Memorias del NACE CORROSION/2004, trabajo No. 439, Houston, Texas.
9. Neville A. (1988). “Tecnología del Concreto”, tomo 1, pp. 45-53, Limusa, México.
10. Véleva L., Castro P., Hernández-Duque G., y Schorr M. (1998). “Corrosion Reviews”, 16 (3), 235.