

Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation

Douglas Linares y Miguel Sánchez*

*Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. *Laboratorio de Electroquímica, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. E-mail: misanche@luz.ve*

Abstract

Carbonation phenomenon produces first neutralization of the cement paste and later reinforcement corrosion in concrete structures. Its reaction mechanism is controlled by diffusional steps, which yield a rate which requires several years to obtain an important extension of the neutralization reaction. The present work describes the construction, operation setting and performance of an equipment that accelerates this reaction rate artificially by mean of increasing the carbon dioxide concentration into a controlled atmosphere. This is the first time that such equipment to control humidity and carbon dioxide concentration (main variables that affect the carbonation phenomena) is fabricated and used in Venezuela.

Key words: Design, construction, diffusional, carbonation, concrete.

Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada

Resumen

La carbonatación es un fenómeno que produce primero la neutralización de la pasta de cemento y posteriormente la corrosión del refuerzo, en estructuras de concreto armado. Su mecanismo de reacción está controlado por un paso difusional, a una velocidad tal que se requieren años para obtener una importante extensión de las reacciones de neutralización en su estado natural. El presente trabajo describe la construcción, puesta en funcionamiento y operación de un equipo que acelera artificialmente esta velocidad de reacción por medio del aumento de la concentración de dióxido de carbono en una atmósfera controlada. En Venezuela es la primera vez que se acomete la construcción de un sistema que permita controlar las variables operacionales que afectan el fenómeno de la carbonatación como son la humedad y porcentaje de dióxido de carbono.

Palabras clave: Diseño, construcción, difusional, carbonatación, concreto.

Introducción

Los procesos de corrosión son aquellos en los que se presenta una oxidación destructiva de metales. Visualmente se puede notar que existe corrosión por el aspecto oxidado que presenta los elementos metálicos, lo que generalmente está asociado con las pérdidas de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, existe también un tipo de corrosión que cuando se inicia no puede verse a simple vista, como es el caso de la corrosión del

acero en el concreto reforzado. Durante la iniciación de la corrosión en este tipo de estructuras, los daños no pueden evaluarse por simple inspección visual, y en consecuencia hay que utilizar para esto otros tipos de ensayos, preferiblemente no destructivos, como por ejemplo las técnicas electroquímicas [1].

Las causas de estos daños son principalmente dos fenómenos naturales: Primeramente la presencia de cloruros en el concreto (que pue-

den haber estado presentes desde la fabricación del concreto, o haberse difundido desde el exterior), los cuales al llegar a las armaduras de acero las despasivan localmente, restándole efectividad a la defensa natural contra la corrosión que le confiere el concreto. En segundo lugar la carbonatación, que es un fenómeno en el cual el CO_2 de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del cemento hidratado y da lugar a una pérdida de la alcalinidad del concreto; esto produce una disminución abrupta de pH que da lugar a la aparición de una región neutralizada, llamada frente carbonatado, que al llegar a la armadura, la despasiva en forma generalizada [2].

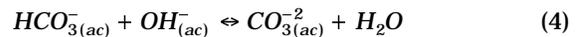
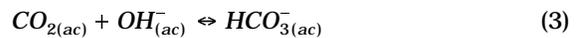
Estos dos fenómenos han sido exhaustivamente estudiados durante años, pero como ambos son procesos controlados por difusión, su estudio requiere de la inversión de mucho tiempo y esfuerzo para la obtención de resultados. Por esto, desde hace algunos años se han hecho muchas investigaciones en equipos para pruebas artificialmente aceleradas de corrosión, con el objeto de obtener información rápida y segura de estos dos fenómenos, pero la mayor parte del esfuerzo se concentra en el estudio del ataque por cloruros restándole importancia al fenómeno de carbonatación [2]. El relativo éxito alcanzado por tales pruebas aceleradas ha motivado a los investigadores a seguir en la búsqueda de nuevos procesos o procedimientos que permitan alcanzar un máximo grado de correlación entre las experiencias realizadas en condiciones controladas en el laboratorio y aquellas llevadas a cabo en ambientes naturales.

El objetivo de este trabajo es proporcionar las bases para el diseño de un sistema artificial controlado que permita en corto tiempo estudiar el fenómeno de carbonatación acelerada y su influencia sobre la corrosión de las armaduras en estructuras de concreto.

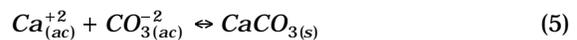
Consideraciones Generales

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso de carbonatación comienza cuando el CO_2 gaseoso de la atmósfera penetra en el concreto, a través de su red de poros, se disuelve en la solución alcalina que llena estos poros y reacciona con los iones calcio (Ca^{++}) presentes en la

misma, formando carbonato de calcio (CaCO_3) (compuesto muy insoluble). El mecanismo de reacción propuesto es [3]:



Así de las ecuaciones (1-4):



Esta reacción remueve los iones calcio (Ca^{++}) de la solución de poro, y el valor del pH disminuye de cerca de 12,5 hasta aproximadamente 8,0. Por esto, la carbonatación también es llamada neutralización [2].

La velocidad de carbonatación es el cambio con el tiempo de la profundidad del frente carbonatado dentro del concreto. La carbonatación bajo condiciones atmosféricas normales está principalmente afectada por el contenido de cemento en la mezcla de concreto, por la porosidad del concreto y por el grado de saturación de agua dentro de los poros del mismo [2, 4].

Como el producto de reacción de la carbonatación es CaCO_3 , cualquier cambio en la concentración de calcio en el cemento afectará la cantidad de carbonato de calcio que se puede formar por unidad de volumen de concreto, la cual está definida como capacidad enlazante. Esta capacidad enlazante es proporcional al contenido de CaO en el cemento [2, 5] y por consiguiente proporcional al contenido de cemento. Así, las estructuras con baja cantidad de cemento por unidad de volumen pueden carbonatarse más rápido que las estructuras con una mayor cantidad [2].

La porosidad del concreto se debe a la cantidad de espacios vacíos por unidad de volumen de concreto, que se forma después que se ha evaporado todo el exceso de agua agregado, o a consecuencia de aire atrapado durante el vaciado. De modo que no es sorprendente que mientras mayor es la relación de agua a cemento (a/c) en la

mezcla de concreto, mayor será la porosidad resultante del mismo, y mayor también el camino libre para la difusión del CO_2 al interior de la masa del concreto, resultando en un incremento de la velocidad de penetración del frente de carbonatación [6].

La humedad o saturación de agua juega un papel opuesto en la carbonatación del concreto. Una abundancia de agua puede inhibir el proceso de carbonatación por la disminución del coeficiente de difusión efectiva de gases en el concreto [2, 7]. Mientras que muy poca agua puede prevenir el proceso de carbonatación debido a la falta de medio acuoso para la reacción. Algunos investigadores han determinado un rango entre 50% a 70% de humedad relativa como el más propicio para la rápida carbonatación [5].

Modelo matemático del proceso de carbonatación

La mayoría de las ecuaciones que describen el progreso de la carbonatación del concreto como función del tiempo, están basadas en la primera ley de Fick [7, 8], la cual puede ser usada para describir cualquier proceso de naturaleza difusional:

$$x_c = k \cdot t^{1/2} \quad (6)$$

Donde x_c es profundidad de carbonatación, t es el tiempo y k , está definido como el coeficiente de carbonatación [2]:

$$k = \left[\frac{2 \cdot D \cdot C_s}{M} \right]^{1/2} \quad (7)$$

donde D es el coeficiente de difusión efectiva del CO_2 , C_s es la concentración de CO_2 sobre la superficie externa del concreto (en moles por unidad de volumen de aire), y M es el número de moles de CO_2 necesarios para carbonatar un volumen unitario de concreto.

Este resultado indica (bajo las suposiciones realizadas anteriormente), que la distancia del frente carbonatado x_c es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Mediciones experimentales de muchos autores [7, 9] han demostrado la validez del modelo propuesto, aun a altas concentraciones de CO_2 [2].

Cambios en la concentración de dióxido de carbono [2]

Cuando un elemento es sometido primero a un ambiente de una concentración C_{s1} , y luego esta concentración cambia a C_{s2} , la ecuación (6) predice:

$$(x_{c2}^2 - x_{c1}^2) = k^2(t_2 - t_1) \quad (8)$$

Esta ecuación puede utilizarse como primera aproximación para estimar el nuevo coeficiente de carbonatación de datos experimentales [7], simplemente como la relación de diferencias de profundidad a tiempo:

$$k = \frac{(x_{c2}^2 - x_{c1}^2)^{1/2}}{T_c^{1/2}} \quad (9)$$

donde:

$(x_{c2}^2 - x_{c1}^2)$: es la distancia alcanzada por el frente carbonatado entre t_1 y t_2 .

$T_c = (t_2 - t_1)$: es la duración del periodo de estabilización.

Con este valor inicial de k , se utiliza la ecuación (6) para estimar el tiempo necesario (t_1) para que el frente carbonatado alcance la posición de la barra dentro del concreto (x_c), resultando:

$$t_1 = \frac{x_c^2}{k^2} \quad (10)$$

Este tiempo de exposición, puede ser correlacionado con el cambio en la concentración de CO_2 en el medio, aplicando las ecuaciones (7) y (9) como sigue:

Para una concentración inicial C_{s1} :

$$T_1 = k_1(x_c^2 - x_0^2) \quad (11)$$

donde $k_1 = 1/k^2$, y para la concentración C_{s2} :

$$T_2 = k_2(x_c^2 - x_0^2) \quad (12)$$

donde $k_2 = 1/k^2$. Resolviendo para la misma profundidad ($x_c^2 - x_0^2$):

$$(x_c^2 - x_0^2) = \frac{T_1}{k_1} = \frac{T_2}{k_2} \quad (13)$$

Sustituyendo k por la ecuación (7) y simplificando:

$$T_1 = T_2 \frac{C_{s2}}{C_{s1}} \quad (14)$$

lo cual quiere decir, que el tiempo de exposición es inversamente proporcional a la relación de concentración de CO_2 en ambos ambientes [10].

Efectos de corrosión sobre los refuerzos en concreto carbonatado

La carbonatación del concreto no puede por si sola promover la corrosión apreciable de los refuerzos de acero [11]. Las velocidades de corrosión del acero en concreto carbonatado sin la presencia de otros contaminantes son pequeñas, en el orden de $0,02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ siempre y cuando la humedad relativa externa sea baja ($\leq 50\%$) [11]. Para que se produzcan altas velocidades de corrosión en concreto carbonatado (por ejemplo $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), es necesario una humedad relativa por encima de 50% [12]. Otras investigaciones [13] llegaron a la conclusión que un factor controlante de la velocidad de corrosión bajo carbonatación del concreto es la resistividad ohmica del mismo (la cual es muy sensible a la humedad relativa), mientras que es independiente del tipo de mortero y del contenido de aditivos minerales. En otra investigación sobre concreto carbonatado [14], se encontró una velocidad de corrosión baja ($i_{\text{corr}} \approx 0,03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) en elementos almacenados a 55% de HR, corrosión severa ($i_{\text{corr}} \approx 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a 75% HR y un poco mayor a 95% ($i_{\text{corr}} \approx 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Los ensayos de carbonatación acelerados se basan en la aplicación de la ecuación (6), que relaciona la profundidad de penetración de la carbonatación (x_c) con el tiempo (t). Si se expone un determinado espécimen de concreto a la atmósfera natural, donde la concentración de CO_2 en promedio es $0,035\%$ molar [2], se obtendrá un tiempo $t_{x(0,035\%)}$ necesario para alcanzar la penetración a una profundidad x , si el mismo espécimen se expone a una concentración exterior de CO_2 mucho mayor (por ejemplo 4% molar), el tiempo necesario para alcanzar esta misma profundidad de carbonatación será 100 veces menor que el anterior ($t_{x(4\%)} \approx 100 \cdot t_{x(0,035\%)}$), tal como lo predice la ecuación (14) [2]. Investigaciones realizadas usando un ambiente a 4% [6] y 7% de CO_2

[9], concluyeron que aun a estas altas concentraciones la profundidad de carbonatación mantiene su relación proporcional con la raíz cuadrada del tiempo. Sin embargo, otras investigaciones realizadas con altas concentraciones de CO_2 [15], advierten que se deben tomar precauciones cuando se extrapolen los resultados de pruebas aceleradas a ambientes atmosféricos normales.

Diseño de la Cámara de Carbonatación

Las pruebas de carbonatación acelerada requieren un sistema capaz de simular y mantener condiciones estables y constantes en el tiempo de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono que reaccione con el concreto, de manera que se puede estudiar el efecto sobre la armadura a dichas condiciones. Además debe disponer de una fuente de aire comprimido, una torre de humidificación, un soporte para los especímenes, así como sistemas de control de flujo y presión, etc.

Requerimientos generales

El diseño (incluyendo el tamaño) y la construcción detallada del aparato son únicos y dependen de los requerimientos en cada caso. Dado el desconocimiento de información en cuanto a este sistema de carbonatación, se tomó como referencia la norma ASTM B117, que se aplica a cámaras de niebla salina. Del mismo modo el material de construcción seleccionado debe ser resistente al medio corrosivo, y el tamaño de la cámara se establece en función del número y tamaño de los especímenes a ser probados.

La cámara de carbonatación permite evaluar diferentes factores inherentes al diseño de la mezcla del concreto, como son: la relaciones de agua/cemento (a/c), tipos de agregado tanto fino como grueso (ajustados a las normas COVENIN 0263-78, COVENIN 0268-78, AASHTO T85, ASTM C29-91, ASTM C127-88(93), ASTM C128-93), cambios en el tipo de material cementante utilizado (ASTM C-150), así como también, la adición de aditivos químicos a la mezcla (ASTM C 618-98, ASTM C 1240-98). También se puede evaluar en esta cámara la efectividad de cualquier nuevo material o procedimiento que ofrezca protección adicional contra la corrosión por car-

bonatación del concreto, entre los cuales se puede mencionar el reemplazo de acero de refuerzo por materiales más resistentes a la corrosión, aplicación de recubrimientos a la barra, y/o concreto, inhibidores de corrosión, etc.

Si no está especificado de otra forma, los especímenes deberán estar apoyados y orientados en una dirección tal que no haya obstáculos que impidan el libre flujo de la masa gaseosa dentro de la cámara, garantizando la uniformidad de la concentración de CO_2 en cualquier punto de la superficie exterior de estos especímenes. Se evitará el contacto de un espécimen con otro y con cualquier otro material que pueda alterar la condición anteriormente descrita. Los soportes sobre los que van colocados los especímenes serán contruidos de cualquier material inerte al medio corrosivo, siempre y cuando se tome en cuenta las sollicitaciones mecánicas a las cuales será sometido y el libre movimiento del flujo (sin direcciones preferenciales).

Abastecimiento de aire

El abastecimiento de aire comprimido para todo el sistema tiene que estar libre de aceites y otras impurezas, y mantenidos a una presión de operación que garantice el máximo tiempo de residencia posible de la masa de gas dentro de la cámara, y que supere la caída de presión del gas en el sistema de humidificación. Las pruebas experimentales indican que el rango de valores de 103,3-110,3 KPa (15-16 psia) cumplía los requerimientos antes mencionados.

Condiciones internas

La concentración deseada de CO_2 dentro de la cámara se obtiene mediante la mezcla de dióxido

de carbono (comercialmente puro) y aire, proveniente de la torre humidificadora. Se utilizan dos medidores de flujo para controlar el volumen de cada gas que pasa al interior de la cámara. A partir del compresor, se pasa aire seco (normalmente a 33% HR) a través de ésta, la cual se diseñó por separado. Correlaciones para el diámetro y la altura de la misma se encuentran en la literatura [16] como una función del flujo de aire y tiempo de residencia, sin embargo se puede proceder en forma empírica fijando el flujo de aire seco, y variando la altura del líquido en la columna hasta que la humedad del gas de salida alcance el valor deseado (70%HR, $Y=0,0182 \text{ KgH}_2\text{O/Kg gas seco}$, $y=0,0283 \text{ molH}_2\text{O/mol Aire húmedo}$). Un balance de masa por componentes, tal como aparece esquematizado en la Figura 1, permite conocer exactamente el flujo molar de cada una de las especies químicas gaseosas:

En la Tabla 1 se resumen los valores de flujo de cada componente a la entrada y a la salida de la cámara. Suponiendo condiciones de estado estacionario (el concreto no absorbe agua porque está en equilibrio con la masa gaseosa interna, y la velocidad de reacción de la carbonatación es tan lenta que se puede suponer constante la concentración de CO_2) Resolviendo para CO_2 , resulta: $x = 4,167$ moles.

Esta clase de control indirecto de composición a través del flujo es eficiente, pero no es suficiente para asegurar el funcionamiento de la cámara. De esta manera es necesario un monitoreo de la composición de los gases de salida.

El volumen total de la cámara también es una variable fundamental para establecer condiciones de operación. Se diseñará la cámara de carbonatación para acomodar 48 especímenes de concreto que ocupan un volumen aproximado

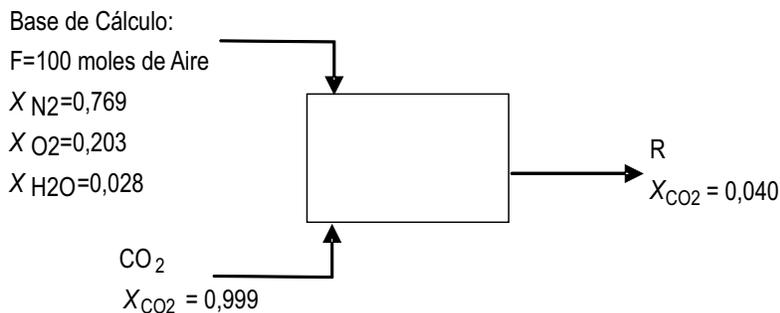


Figura 1. Esquema de los componentes en la cámara de carbonatación.

de 200.000cm³, el criterio de dimensionamiento varía mucho para esta clase de equipos [16], pero en promedio, se establece que el volumen ocupado por el gas no debe ser menor de 2,5 veces el volumen del sólido, es decir, la cámara no deberá tener un volumen total inferior a 700.000cm³.

Para calcular el valor de las corrientes de flujo de gases, es necesario tomar en cuenta el tiempo de residencia del aire tanto dentro de la cámara misma, como dentro de la torre de humidificación, pues a un flujo muy alto de aire no hay tiempo suficiente de contacto aire/agua para que el primero salga a la humedad deseada. Se estimó experimentalmente, que un valor aceptable de flujo a las condiciones de presión establecidas anteriormente estaría ubicado entre 1100-1300 mL/min.

De la Tabla 2 se puede observar que dependiendo del tiempo de residencia seleccionado se puede obtener una gran cantidad de condiciones de flujo equivalentes.

La velocidad de flujo de los medidores de Aire y CO₂ se obtienen del balance de masa (Tabla 1), utilizando correlaciones generalizadas para gases a bajas presiones [16], estos flujos deben ser ajustados periódicamente para obtener

un 65% ± 5% de humedad relativa y un 4% ± 0,5% de CO₂ dentro de la cámara. La humedad relativa y la temperatura se miden dentro de la cámara utilizando un higrómetro digital. Adicionalmente se coloca en el exterior un equipo similar, con el objeto de determinar si los cambios de temperatura y/o humedad en el ambiente pueden afectar las condiciones dentro de la cámara. La concentración del CO₂ se comprueba por muestreo del gas de salida, utilizando una variante del método de Pettenkoffer [2] para análisis de CO₂ a altas concentraciones.

Períodos de prueba

Cada probeta elaborada para ensayos de carbonatación debe pasar por tres periodos específicos de exposición, que dependerán de los materiales utilizados en su elaboración, o en función a los objetivos de la investigación:

- Proceso de Curado: En este proceso se pierde agua tanto por las reacciones de hidratación en la pasta del cemento como por evaporación, esta agua debe ser reemplazada inmediatamente mediante un rocío continuo. La extensión de este periodo varía dependiendo del objetivo para el cual se elabo-

Tabla 1
Balance de moles para el proceso de carbonatación

	Entrada	Salida	Fracción molar a la salida
Nitrógeno	76,9	76,9	76,9/(100+x)
Oxígeno	20,3	20,3	20,3/(100+x)
Agua	2,80	2,80	2,8/(100+x)
CO ₂	x	x	x/(100+x)=0,040
Moles totales	100+x	100+x	

Tabla 2
Valores de las corrientes de flujo operacional para la cámara de carbonatación

	Aire	CO ₂	Aire	CO ₂	Aire	CO ₂
Tiempo de Residencia (min)	1500	1500	2000	2000	2500	2500
Flujo molar (mol/min)	0,0667	0,00278	0,05	0,00208	0,04	0,00167
Flujo Volumétrico (mL/min) (30°C y 1 Atm)	1665,23	69,06	1248,93	51,80	999,14	41,44

ró la probeta, pero se recomienda sin embargo para estudios de carbonatación [17] un periodo de curado de 3 a 7 días.

- Aclimatación: Luego del curado es necesario aclimatar las probetas a las condiciones de exposición dentro del laboratorio (65% HR, 27°C), este proceso tiene como propósito obtener un concreto mas maduro (con un mayor grado de hidratación) que aquellos expuestos a atmósferas normales, se logra con esto un equilibrio estable de las condiciones de humedad relativa y temperatura entre el exterior y el interior de los poros de concreto. Algunos autores recomiendan [2], que este periodo sea por lo menos de 100 días antes de la exposición a altas concentraciones de CO_2 . Al final del mismo se procede a la evaluación de la profundidad de carbonatación inicial.
- Exposición en Cámara: El período de exposición, es tiempo necesario (T) para que el frente de carbonatación alcance una profundidad lineal (x_c), a una mayor concentración de CO_2 en el medio ($C_s = 4\%$ molar en este caso). Este periodo es variable para cada mezcla de concreto y dependerá de la constante de carbonatación k , según la ecuación (9) y de los parámetros medidos del período anterior, ecuación (14).
- Al finalizar el periodo de exposición acelerada, se cierra la alimentación de CO_2 permitiendo a la cámara alcanzar condiciones

normales de concentración. La profundidad del frente de carbonatación en el concreto ha alcanzado la superficie de la barra. Sin embargo a la humedad relativa utilizada para acelerar el proceso de carbonatación (65%), no hay suficiente agua dentro del concreto para desarrollar una velocidad de corrosión significativa [7, 18], Se prolonga entonces la exposición, a 90% de HR permitiendo así que suficiente electrolito esté presente dentro de la red de poros del concreto para que ocurra esta corrosión.

Construcción de la Cámara de Carbonatación

Construcción del gabinete

Para la construcción de la cámara de carbonatación se empleó como base de refuerzo, un armazón de acero inoxidable 304 (ancho 150 cm, alto 70 cm y profundidad 70 cm). Las caras fueron hechas con las láminas de plexiglás (lucite) espesor 0,63 cm. Los rectángulos principales son de 150×70 cm, mientras que para las cubiertas laterales fueron de 70×70 cm. Las láminas de plexiglás se encuentran unidas con un pegamento en base acrílico (metil-metacrilato), ajustadas mediante tornillos a la armazón de acero inoxidable. La parte frontal cuenta con dos puertas herméticas en plexiglás reforzadas con acero inoxidable (Figura 2a).

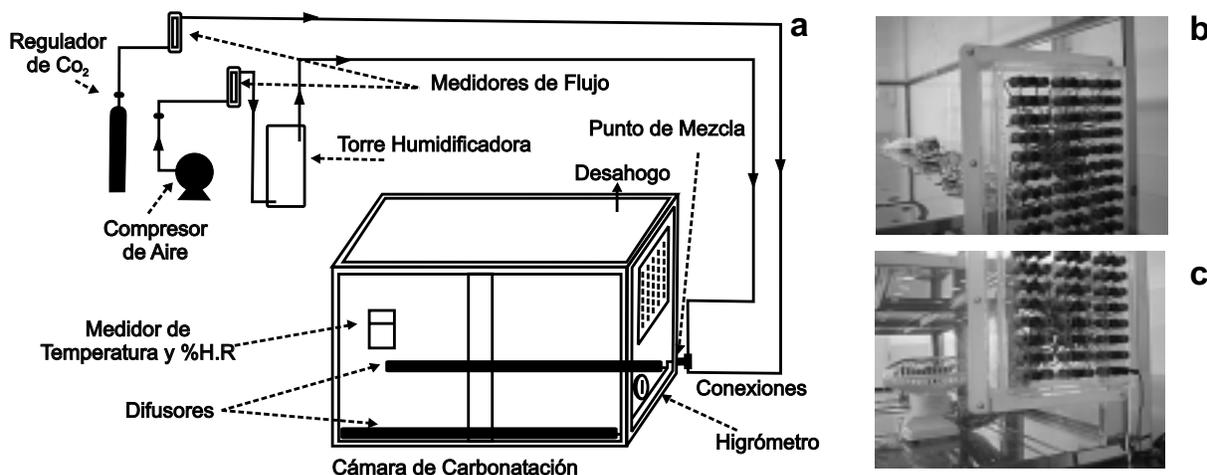


Figura 2. a) Ensamblaje de la Cámara de Carbonatación. b) Conexiones exteriores para medidas de potencial. c) Dispositivo de ventilación.

Dispositivos de distribución de gas de entrada y salida

El flujo de aire se controla mediante un sistema de triple válvula a la salida del compresor, una válvula primaria check de seguridad para presiones dentro del equipo, otra de compuerta, de 1,27cm justo después de la válvula check, y una tercera de aguja, con reducción de 1,27cm a 0,64cm, para el control de flujo volumétrico que sale del compresor. El caudal de flujo se mide a través de un rotámetro calibrado para un flujo de aire de 1250 mL/min (27°C y 1 Atm), y este flujo pasa luego a la torre de humidificación, donde se expande y se enriquece hasta la humedad especificada. El aire húmedo pasa luego directamente de la salida de la torre, a la entrada de gases, ubicada detrás de la cámara de carbonatación. En la parte posterior de la cámara se colocó un dispositivo de expansión en forma de T de acero inoxidable, con conexiones para manguera de 0,64cm la cual sirve de mezclador de las corrientes de entrada de CO₂ y aire húmedo. En la parte superior se instaló una válvula de bola de acero inoxidable con conexiones de 0,64cm de diámetro, la cual sirve como desahogo y toma de muestra de la mezcla de salida para la medición del contenido de CO₂. La distribución de la mezcla a través del recipiente se realiza a través de unos difusores colocados a lo largo del interior de la cámara; los difusores consisten en cuatro tubos de acero inoxidable de 0,64cm de diámetro, los cuales fueron agujereados en toda su extensión para lograr la distribución homogénea del gas, igualmente en el interior de la cámara se colocó un dispositivo de ventilación, que ayuda a mantener las condiciones homogéneas de composición y humedad en todo el volumen del recipiente (Figura 2c).

Construcción de la torre de humidificación

La torre de humidificación consiste solamente en un recipiente en el cual se hace burbujear aire a través de un lecho de empaques que está completamente cubierto por agua. Puede ser de la forma y dimensiones que se desee, y comercialmente en el mercado existen varios modelos disponibles. Para el caso de la cámara de carbonatación se escogió fabricar dicha torre, utilizando materiales transparentes, para tener un control visual exterior del nivel de líquido dentro de

la misma. El recipiente se construyó de plexiglás de base cuadrada 18x18cm, con una altura máxima de columna de agua de 60 cm. Aunque para propósitos prácticos de mantener una humedad relativa de 65% ± 5% a un caudal de flujo establecido según balance de masa de 1250 mL/min, fue suficiente con mantener una altura efectiva constante de 7,8cm de agua. El aire seco entra por el fondo de la torre a una presión suficiente para vencer la caída de presión de la columna de líquido, burbujea a través de unos difusores, y sale por el tope de la misma a la humedad requerida.

Otros elementos

La cámara posee en su interior una serie de conexiones eléctricas que permiten la realización de pruebas electroquímicas sobre cualquiera de los 48 especímenes de concreto que fuera diseñado para este propósito, sin necesidad de abrir el equipo, de modo que las condiciones internas no varíen. En la cara lateral derecha de la cámara está instalado un panel con terminales eléctricos tipo banana estándar, identificados para cada electrodo bajo estudio (Figura 2b), al cual llegan las respectivas conexiones del interior, para lo que se utiliza conductor de cobre 18 AWG.

Preparación de los especímenes para su evaluación

Para las medidas de profundidad de carbonatación se prepararon probetas cilíndricas de 7,6cm de diámetro por 20,3cm de altura. Las probetas se construyeron con una mezcla base pobre en cemento (Pórtland Tipo I) de aproximadamente 225 Kg/m³, a diferentes relaciones agua/cemento (0,5 y 0,65), para estudiar el efecto de la alta porosidad en el concreto (4 de cada mezcla). Se seleccionó para el proceso de curado un corto período de tiempo (7 días) para desfavorecer la ocurrencia de reacciones de hidratación [2, 17]. Adicionalmente (para estudios electroquímicos), se prepararon con las mismas mezclas, especímenes rectangulares de concreto de 5,1×10,2×20,3 cm.

Resultados

Respuesta funcional

En la Tabla 3, se muestran algunos valores del estado estacionario de la cámara de carbona-

Tabla 3
Resultados de Estado Estacionario para una Prueba simulada del Periodo de Exposición

Variable	Valor
Capacidad de la Cámara V (m ³)	0,735
Temperatura Interior promedio (°C)	27 (Ambiente)
Presión de Salida del Compresor (KPa)	≈ 105 ± 1%
Presión de Salida de CO ₂ (KPa)	≈ 103 ± 1%
Presión de salida de la torre (KPa)	≈ 103 ± 1%
Presión de Salida de la Cámara (KPa)	≈ 101 ± 1%
Flujo promedio de entrada de Aire (mL/min)	1228,9 ± 4%
Flujo promedio de entrada de CO ₂ (mL/min)	51,79 ± 4%
Porcentaje de CO ₂ prom. medido en la cámara (m ³ CO ₂ /m ³ gas)×100	4,32 ^(*)
Porcentaje de saturación prom. de aire a dentro de la cámara (% HR)	67,3 ± 5%
Capacidad de la torre (m ³)	0,01944
Altura del nivel efectivo del agua en la torre de humidif (m)	0,078 ± 10%

(*) Equivalente a 4,11% molar.

tación durante una corrida corta de simulación del período de exposición acelerado (1 semana).

Tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 3, es posible hacer modificaciones en el diseño de uno o más componentes de la cámara, para optimizar el rendimiento global.

Velocidad de carbonatación

El proceso de aclimatación se seleccionó de 200 días. Las primeras medidas de la profundidad de carbonatación se realizan sobre las probetas cilíndricas expuestas al aire del laboratorio el día 100, tomando como resultado el promedio de por lo menos diez mediciones en diferentes posiciones angulares, sucesivas mediciones se realizan hasta alcanzar los 200 días de edad, tal como se muestra en la Figura 3. Medidas representativas de estos resultado se reportan en la Tabla 4.

La carbonatación natural encontrada en los especímenes de concreto sobrepasa las expectativas para estos tipos de mezcla. Los ensayos de resistencia a la compresión revelaron un concreto de baja calidad (15 MPa) en ambos casos. Pruebas adicionales ratifican este hecho al encontrarse valores de porosidad mayores de 26%. Criterios de evaluación [8] clasifican de inadecuados esta clase de mezclas, razón por la cual

Tabla 4
Profundidad de carbonatación promedio (cm) para las mezclas bajo estudio

Edad (días)	A/c = 0,65	A/c = 0,5
100	2,11	1,04
200	2,98	1,49

se carbonatan fácilmente estos concretos, en particular para los primeros 100 días.

En la Tabla 5, se reportan los valores de coeficiente de carbonatación encontrados de los datos experimentales a partir de la ecuación (9).

Estos coeficientes son indicativos de la porosidad de las mezclas de concreto utilizadas, ya que son fácilmente carbonatables. La red CYTED, establece un rango permitido de coeficientes de carbonatación, hasta de 6 mm/año^{1/2}, valor que es ampliamente sobrepasado por ambas mezclas, lo que resalta la susceptibilidad a la carbonatación de las mismas.

Tomando en cuenta que las barras para las probetas de ensayos electroquímicos están ubicadas a una profundidad promedio 25,4 mm, y utilizando la ecuación (10), se calcula el tiempo para que la carbonatación llegue a esa profundidad, como se puede observar en la Tabla 6.

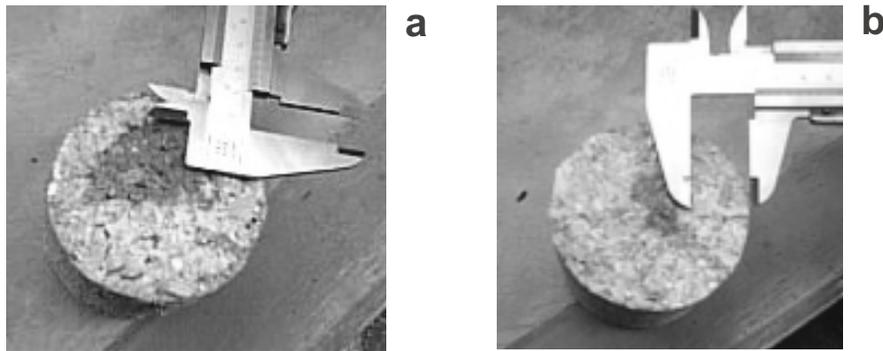


Figura 3. Medidas de profundidad de carbonatación para probetas de 200 días de edad (a) a/c=0,5. (b) a/c=0,65.

Tabla 5
Coeficientes de carbonatación calculado k (mm/año^{1/2})

Edad (días)	A/c = 0,65	A/c = 0,5
100	40,31	19,87
200	41,66	21,91
Promedio	40,99	20,89

Tabla 6
Tiempo estimado (días) para que la carbonatación alcance una profundidad de x_c 25,4 mm a una concentración de 0,04% molar CO₂

	A/c = 0,65	A/c = 0,5
t_x (días)	146	581

Tabla 7
Tiempo estimado (días) para que la carbonatación alcance una profundidad de x_c 25,4 mm a una concentración de 4% molar en CO₂

	A/c = 0,65	A/c = 0,5
t_x (días)	1,46	5,81

De esta tabla, se obtienen valores de T_1 que corresponden a una concentración normal de Dióxido de Carbono en la atmósfera (0,04% Molar). Tomando estos valores, por medio de la ecuación (14), se puede hacer una estimación de la duración del período de exposición en cámara, donde la concentración de CO₂ es aproximada-

mente 100 veces mayor, según se muestra en la Tabla 7.

Se observa un tiempo de exposición acelerada 100 veces menor comparado con el tiempo normal de carbonatación. Estos resultados son, lógicamente los esperados en teoría

Se escoge sin embargo un periodo de exposición de una semana, para garantizar que la carbonatación ha ocurrido en forma suficientemente extensa. Y al final de este período se hace una nueva medición de profundidad de carbonatación, resultando en una carbonatación completa del espécimen hasta 30 mm (máxima profundidad medible con las probetas cilíndricas).

Conclusiones

1. Aunque no existen especificaciones técnicas de diseño para esta clase de equipo, la cámara de carbonatación construida ofrece un adecuado funcionamiento, con materiales económicos y fácil operación.
2. El equipo permite un aumento de la velocidad de carbonatación a través del control de dos de sus variables críticas, como lo son: la concentración de dióxido de carbono, y la humedad relativa.
3. Se demostró la efectividad del sistema de carbonatación acelerada sobre probetas de concreto de alta porosidad, ya que la profundidad de penetración del frente carbonatado fue mucho mayor luego de un corto periodo de exposición a altas concentraciones de CO₂, que las observadas sobre las mismas probetas en condiciones controladas normales.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) por el financiamiento del Proyecto N° 02861-97, base fundamental para la elaboración de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Millard, S.G., Gowers K.R., and Bungey, J.H. "Rapid Method of Assessing Corrosion Rates of Steel in Concrete Structures", Corrosion 95, Paper 525, 1995.
2. Moreno, E.I. "Carbonation of Blended Cement Concretes", PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, (1999).
3. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N.. "A Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation." *AI-ChE Journal*, Vol. 35, No. 10 (1989), 1639-1650
4. Bakker, R. F. M.. "Initiation Period of Corrosion Steel in Concrete", RILEM Report 60-CSC, P. Schiessl ed., London, (1988), 22-55.
5. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N.. "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation." *ACI Mats. J.*, Vol. 88 No. 4, (1991) 363-373.
6. Ho, D. W. S., and Lewis, R. K.. "Carbonation of Concrete and its Prediction." *Cement and Concrete Research*, Vol. 17 No. 3, (1987) 489-504.
7. Tuutti, K.. "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, (1982).
8. CYTED - DURAR "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". Reporte Final, Red Durar, CYTED, Maracaibo, (1997).
9. Ohga, H., and Nagataki, S. (1989). "Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash". Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114, American Concrete Institute, Vol. 1., Detroit, 275-294.
10. Moreno, E. I. "Accelerated Carbonation-Induced Corrosion of Reinforcing Steel Bars in Blended-Cement Concrete". M.S. Thesis, University of South Florida, Tampa, (1996).
11. González, J. A., and Andrade, C. "Relaciones Cuantitativas entre la Carbonatación del Hormigón y la Corrosión de las Armaduras." *Corrosion Protection*, Vol 11, (1980), 15-24.
12. Alonso, C., and Andrade, C.. "Corrosion Behavior of Steel During Accelerated Carbonation of Solutions which Simulate the Pore Concrete Solution." *Mat. Constr.*, Vol. 37, No. 206, Madrid, (1987), 5-16.
13. Alonso, C., and Andrade, C. "Life Time of Rebars in Carbonated Concrete." 10th European Corrosion Congress, Barcelona, No. 165, (1993).
14. Dhir, R. K., Jones, M. R., and McCarthy, M. J.. "Pulverized-Fuel Ash Concrete: Carbonation-Induced Reinforcement Corrosion Rates." *Proc. Instn. Civ. Engrs Structs & Bldgs*, No. 94, (1992), 335-342.
15. De Ceukelaire, L., and Van Nieuwenburg, D.. "Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete." *Cem. Concur. Res.*, Vol. 23 No. 2, (1993), 442-452
16. Treybal, R.. "Operaciones de Transferencia de Masa", McGraw-Hill ed., 2da Edición, México D.F., (2000).
17. FDOT "Section 400-Concrete Structures". Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Tallahassee, (1996), 302-333.
18. González, J. A., Andrade, C. and Escudero, M. L. "Corrosión en Hormigón: Corrosión de las Armaduras por Carbonatación del Hormigón". *Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección*, Vol. 15 No. 4, (1984) 11-19.

Recibido el 25 de Febrero de 2002

En forma revisada el 13 de Febrero de 2003