

# MÉTODO ELECTROQUÍMICO PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN POR CO<sub>2</sub> SOBRE EL DETERIORO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO EN LA COSTA DEL PACÍFICO COLOMBIANO

## *ELECTROCHEMICAL METHOD TO EVALUATE THE CO<sub>2</sub> CONTAMINATION EFFECT ON DEGRADATION OF CONCRETE REINFORCEMENT STRUCTURES IN COLOMBIAN PACIFIC COAST*

Hugo Armando Estupiñán Durán<sup>1</sup>  
 Darío Yesid Peña Ballesteros<sup>2</sup>  
 Custodio Vásquez Quintero<sup>3</sup>  
 Elkin Fernando Mejía Chaparro<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Grupo de Investigaciones en Corrosión, Universidad Industrial de Santander (UIS).  
 km 7 vía Refugio, Guatiguará-Piedecuesta, Santander-Colombia  
 dociq11@uis.edu.co<sup>1</sup>, dypena@uis.edu.co<sup>2</sup>, icorros@uis.edu.co<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Armada Nacional de Colombia ARC-Colciencias

Estupiñán, H., Peña D., Vásquez, C. y Mejía, E. 2008. Método electroquímico para evaluar el efecto de la contaminación por CO<sub>2</sub> sobre el deterioro de estructuras de concreto reforzado en la costa del Pacífico colombiano. Boletín Científico CCCP, (15):23-31.

**Nota aclaratoria:** Este trabajo hace parte del proyecto de investigación titulado “Desarrollo metodológico electroquímico de un modelo de predicción de la corrosividad de estructuras de concreto de las costas del Pacífico colombiano”, financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y la Armada Nacional de Colombia (ARC).

### RESUMEN

Se desarrolló un método electroquímico para evaluar el efecto de la carbonatación proveniente del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico sobre el deterioro de estructuras de concreto en la costa del Pacífico colombiano, específicamente sobre la penetración y el coeficiente efectivo de difusión del ión cloruro en probetas de concreto fabricadas con cemento Portland tipo I y relaciones de agua/cemento: 0.4, 0.5 y 0.6. Probetas con 28 días de curado se expusieron a carbonatación acelerada para obtener dos frentes diferentes de carbonatación: 5 mm (frente A) y 10 mm (frente B). El ensayo se desarrolló en un ambiente de 25 % CO<sub>2</sub> y humedad relativa 55 a 65 %. La profundidad de penetración del frente carbonatado fue determinada con fenoltaleína y ambas zonas, con carbonatación y sin ella, fueron caracterizadas mediante DRX y SEM. Se realizaron ensayos de Prueba Acelerada de Migración de Cloruros (ACMT, por sus siglas en inglés), Prueba Rápida de Penetración de Cloruros (RCPT, por sus siglas en inglés) y ensayo de penetración de cloruros por inmersión, con el fin de evaluar el ingreso del ión cloruro (Cl<sup>-</sup>) a través de la matriz cementicia y determinar el coeficiente efectivo de difusión en este concreto. Se realizaron pruebas de colorimetría y titulación potenciométrica. Se observó una influencia marcada en la capacidad de penetración del ión cloruro a través de la matriz cementicia, con relación a la carga pasante. Se corroboró mediante comparación de cargas obtenidas de los métodos ACMT y RCPT, la influencia de la temperatura en la capacidad difusiva de los iones.

**Palabras clave:** Carbonatación, coeficiente efectivo de difusión, ión cloruro, concreto, CO<sub>2</sub>, método electromecánico, ACMT, RCPT.

### ABSTRACT

A electrochemical method to evaluate the carbonatation effect from CO<sub>2</sub> atmospheric on degradation of concrete structures in Colombian pacific coast, mainly, on the penetration and the effective diffusion coefficient of chloride ion in concrete specimens made with Portland cement type I, with water/cement relationships: 0.4, 0.5 and 0.6. Samples with 28 days of curing were exposed to accelerated carbonation for two different fronts of carbonation: 5 mm (Face A) and 10 mm (Face B). The tests were carried out in an atmosphere of 25% CO<sub>2</sub> and relative humidity between 55-65%. The penetration depth of the front was determined with phenolphthalein and carbonated and non carbonated samples, were characterized by XRD and SEM. Accelerated Chloride Migration Test (ACMT), Rapid Chlorides Penetration Test (RCPT) and penetration chlorides tests by immersion, in order to determine the income of the Cl<sup>-</sup> ion through the cement matrix and determine the effective diffusion coefficient of this type of concrete. Beside, colorimetric and potentiometric titration tests were carried out. There was a marked influence on the ability of chloride ion penetration through the cement matrix, in relation to passing current charge. It was corroborated by comparison of current charges calculated of the methods RCPT and ACMT, the influence of temperature on the diffusive capacity of the ions.

**KEY WORDS:** Carbonation, effective diffusion coefficient, chloride ion, concrete, CO<sub>2</sub>, electromechanical method, ACMT, RCPT.

## INTRODUCCIÓN

El principal daño que presenta el concreto reforzado es el ocasionado por la corrosión que genera inconvenientes en la durabilidad de la estructura, altos costos de reparación y problemas de seguridad (Cornelius, 2004). En el concreto reforzado, el proceso de corrosión puede ser ocasionado por reacciones electroquímicas y químicas, como también por difusión de sustancias agresivas en su interior. Los dos factores principales que causan la corrosión en el concreto reforzado son el ión cloruro y la carbonatación. El ión  $\text{Cl}^-$  puede estar presente desde la preparación del concreto o incluirse por difusión desde el exterior. Estos iones alcanzan el refuerzo de acero, ocasionan su despasivación y minimizan la protección que el concreto ofrece al metal. La carbonatación se produce por la reacción del  $\text{CO}_2$  atmosférico con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto; esta reacción produce pérdida de la alcalinidad y la aparición de un frente carbonatado (zona neutralizada) que despasiva el acero.

El concreto es un material muy poroso que permite la penetración del  $\text{CO}_2$  del aire. Cuando esto sucede, se produce la reacción del  $\text{CO}_2$  con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) del hormigón (portlandita) y los compuestos hidratados del cemento, formándose carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Cuando todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), presentes en los poros, han sido carbonatados, el valor del pH disminuye por debajo de 9 (Sánchez de Rojas, 2004).

Este proceso se caracteriza por la presencia de un frente carbonatado, el cual separa zonas de un pH diferente, una zona de  $\text{pH} < 9$  y otra con  $\text{pH} > 12$ . Este frente puede medirse con fenolftaleína sobre la superficie del concreto, lo cual indica una coloración púrpura en la zona no carbonatada y sin ésta en la zona carbonatada. El avance de la carbonatación es un proceso lento, cuya velocidad se atenúa con el tiempo, ajustándose a una ley parabólica del tipo:

$$X_c = K_c \cdot (t)^{0.5} \quad (1)$$

Donde,

$X_c$  es la profundidad de la capa carbonatada en mm.  
 $K_c$  es la constante de carbonatación en  $\text{mm/año}^{0.5}$   
 $t$  es la edad del hormigón.

Con el aumento de la relación agua/cemento (a/c) se producen condiciones en los concretos más permeables que favorecen el proceso de carbonatación. En cuanto a la humedad en hormigones secos o completamente saturados, no es posible que se produzca carbonatación. Si el poro está completamente seco, el  $\text{CO}_2$  difunde, pero no ocurre carbonatación, debido a la ausencia de la humedad; si los poros se encuentran saturados de agua, los niveles de carbonatación son extremadamente bajos, debido a la baja difusión del  $\text{CO}_2$  en el agua. Esto es similar a lo que sucede en estructuras completamente sumergidas. Para obtener una penetración máxima de  $\text{CO}_2$  se debe contar con humedades comprendidas entre el 50% y el 70 % (Del Valle *et al*, 2001). El proceso de carbonatación es bastante lento, por lo cual en el trabajo de laboratorio se hace necesario implementar un proceso de carbonatación acelerada para evaluar este fenómeno.

## METODOLOGÍA

En la elaboración de las muestras de concreto se empleó cemento tipo Portland Cemex®. Se realizaron tres tipos de mezclas con relaciones a/c 0.4, 0.5 y 0.6. Se mezclaron inicialmente la arena y el cemento hasta homogeneizar, luego se agregó grava seguida por agua hasta obtener una pasta uniforme. Posteriormente, esta pasta se vació en moldes de PVC de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura, siguiendo las recomendaciones de apisonado establecidas en la norma Astm C192 para la preparación de probetas de concreto en el laboratorio, manteniendo  $24 \pm 1$  horas de fraguado a temperatura ambiente. Las probetas obtenidas fueron desmoldadas y sumergidas en agua fresca por 28 días.

Para los ensayos de carbonatación acelerada se requirió de la adaptación de una cámara de niebla salina, en la cual se inyectó un flujo de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$  de  $\text{CO}_2$  y otro de agua en presencia de aire comprimido, con el fin de generar un ambiente real de costa marina. El montaje para este procedimiento se ilustra en la Figura 1. Se realizaron tres pruebas en las cuales se introdujeron probetas de cada relación a/c, para tiempos de carbonatación de 3, 6, y 12 horas, con 25 %  $\text{CO}_2$  y humedad relativa (Hr) del 55% al 60 %.

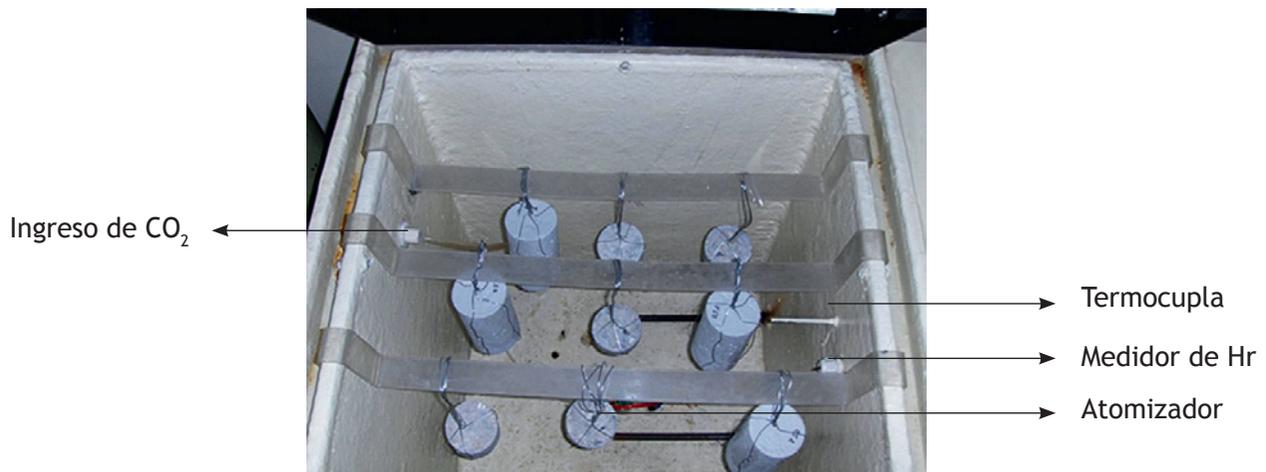


Figura 1. Probetas de concreto expuestas al interior de la cámara de carbonatación.

Para la determinación del espesor de la capa carbonatada se aplicó una solución de fenolftaleína al 1 % en alcohol de 70° sobre las probetas de concreto. Las zonas de pH <9 no presentaron cambio de color, lo que se atribuyó a las áreas carbonatadas o frente de carbonatación de las muestras. Las zonas de pH >9 permitieron el cambio de la fenolftaleína a color púrpura. Se determinó el espesor del frente de carbonatación con ayuda de un calibrador con base en la norma Rilem CPC-18, para posteriormente exponer las probetas a reacción con CO<sub>2</sub> (Carrasco, 2007).

Determinadas las constantes de carbonatación, se calcularon los tiempos para obtener dos frentes de carbonatación diferentes, definidos como 5±1 mm (frente A) y 10±1 mm (frente B). Teniendo en cuenta que generalmente en concretos con dos años de exposición a condiciones ambientales se obtiene una profundidad de carbonatación de 1 a 2 mm (Cornelius, 2004).

Se llevaron a cabo ensayos de difracción de rayos X para determinar los compuestos cristalinos presentes en las fases carbonatada y no carbonatada. Se obtuvieron muestras que se pulverizaron hasta tamaño de 38 μm, para ser analizadas en un difractómetro de polvo marca Rigaku modelo D/MAX IIB. El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó por comparación con la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD, por su sigla en inglés). El análisis cuantitativo se hizo mediante el refinamiento por el método de Rietveld del perfil observado, agregándole a la muestra una cantidad

conocida de estándar interno (óxido de aluminio, malla-100, 99 %. *Corundum*,  $\alpha$ -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20 %.

Por medio de microscopía electrónica de barrido, se evaluó la morfología de las fases carbonatadas y no carbonatadas, y el efecto de la reacción del CO<sub>2</sub> con la portlandita en la estructura del concreto (Giraldo y Tobón, 2006). Para este ensayo fue necesario acondicionar previamente las muestras, desbastándolas con papel abrasivo N° 150 hasta 600 y luego con alúmina de 1, 0.3 y 0.05 micras, hasta lograr un acabado de espejo en la superficie.

La prueba de inmersión para los ensayos de penetración de cloruros se realizó en un estanque, llenado con una solución 3 % (p/v) de sal marina hasta un nivel de 20 cm. Se sumergieron 18 cilindros por cada relación a/c, los cuales fueron recubiertos previamente con pintura epóxica en su cuerpo y en una de sus caras. Se determinó que el porcentaje de cloruros en la solución con sal marina fue de 58.46 ±0.35 %. La inmersión se mantuvo hasta completar los tiempos de 30, 45 y 60 días. Después de cada tiempo, se extrajeron los cilindros, se realizaron pruebas de colorimetría y se tomaron las respectivas muestras para determinar el perfil de concentración de cloruros.

Las probetas cilíndricas fueron seccionadas longitudinalmente para extraer las muestras de polvo, perforando en intervalos entre 0 a 10 mm (P1), 10 a 20 mm (P2), 20 a 30 mm (P3), 30 a 40 mm y 40 a 50 mm, como se observa en la Figura 2, hasta obtener una muestra de 5±0.25 g,



Figura 2. Perforaciones hechas en la probeta seccionada en intervalos hasta 50 mm.

la cual fue tamizada, pesada y empacada para su posterior análisis.

Por medio de titulación potenciométrica se obtuvo el contenido de cloruros libres en las muestras de concreto, con el cual se determinó el perfil de concentración del ión cloruro, a través de la matriz cementicia. Este procedimiento está descrito en las normas ASTM C1218 y ASTM C114.

Las probetas designadas para los ensayos de migración acelerada del ión cloruro (ACMT) y ensayo rápido de penetración del ión cloruro (RCPT) fueron maquinadas hasta obtener cilindros con dimensiones de 50 mm de espesor y 75 mm de diámetro.

La prueba de RCPT tiene por objeto estudiar los mecanismos de transporte de los iones cloruros dentro del hormigón. Mediante la descripción de la norma ASTM C1202-97 se determinó la penetrabili-

dad del ión cloruro de las probetas de concreto por medio de la carga pasante a través de las mismas. Se evaluó el comportamiento de concretos con tres relaciones a/c y, a su vez, con dos frentes de carbonatación, para un tiempo de prueba de seis horas. En esta prueba se aplicó un potencial de 60V y se generó un flujo del ión cloruro a través de la matriz cementicia que causó la migración de los cloruros hacia la celda anódica (reservorio de NaOH). El montaje requerido para el ensayo RCPT se aprecia en la Figura 3, conformado por una fuente regulada, celdas de difusión construidas en acrílico con dos reservorios, uno con una solución NaOH al 0.3 N (celda anódica) y el otro con una solución NaCl al 3 % p/v (celda catódica). Como electrodos se emplearon dos rejillas de acero inoxidable AISI SAE 304.

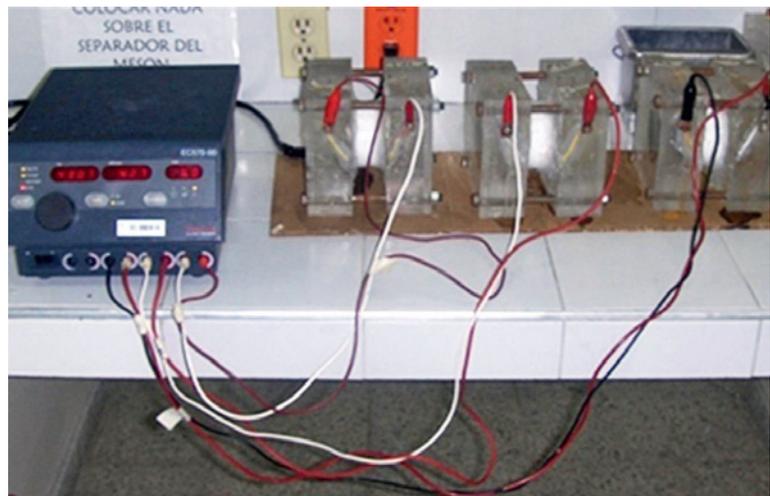


Figura 3. Montaje experimental para ensayos RCPT.

Para este ensayo, las muestras se prepararon previamente, ubicándolas en un desecador. Se aplicó una atmósfera de vacío de presión inferior a 50 mm de Hg, durante tres horas. Luego se adicionó agua desaireada al recipiente hasta cubrir las probetas completamente. Se mantuvo el vacío por una hora. Finalmente, se suspendió el sistema de vacío y se conservaron las probetas durante dieciocho horas en el montaje.

El ensayo ACMT es una modificación del método descrito en la norma ASTM C1202 (Yang, 2003). Esta prueba tiene la finalidad de obtener la carga pasante y los iones cloruros acumulados pasantes a través de la probeta de concreto. El tiempo de prueba recomendado para ACMT fue de 3/2 del tiempo de prueba para RCPT, debido a que el voltaje aplicado en ACMT es 24/60 veces el voltaje del RCPT, y el espesor de las probetas fue 30/50 veces el espesor del disco ensayado en la prueba de RCPT. El acondicionamiento y la preparación de las probetas se realizaron de la misma forma que para el ensayo de RCPT.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las pruebas de carbonatación a tres, seis y doce horas sobre las muestras con las tres relaciones a/c, se obtuvieron las diferentes profundidades de carbonatación. Se calcularon las constantes de carbonatación a través de la Ecuación 1 para cada uno de los tiempos y profundidades de cada relación a/c. Estos valores se promediaron para obtener un valor final de cada constante. Los resultados fueron: para 0.4,  $K_{c_{prom}} = 5.7908 \text{ mm/ día}^{1/2}$ ; para 0.5,  $K_{c_{prom}} = 6.6669 \text{ mm/ día}^{1/2}$  y para 0.6,  $K_{c_{prom}} = 8.7287 \text{ mm/ día}^{1/2}$ . Relacionando estos coeficientes con los frentes empleados en esta inves-

tigación -frente A ( $5 \pm 1 \text{ mm}$ ) y frente B ( $10 \pm 1 \text{ mm}$ )- se determinaron los tiempos de carbonatación para cada una de las relaciones a/c (Tabla I).

Con el aumento de la relación a/c, incrementa el coeficiente de carbonatación, disminuyendo la resistencia del concreto a la difusión del CO<sub>2</sub> a través de la matriz cementicia. Asimismo, se observó que los tiempos de ensayo disminuyeron al incrementar la relación a/c. Los frentes de carbonatación obtenidos bajo una atmósfera de 25 % de CO<sub>2</sub> en la cámara de carbonatación para cada una de las muestras con las diferentes relaciones a/c se muestran en la Tabla II. Las mediciones del frente de carbonatación de los cilindros fueron tomadas como se observa en la Figura 4.

En la Figura 5 se muestran las imágenes de SEM del frente no carbonatado. Se aprecia la presencia de portlandita, producto de la hidratación del concreto, específicamente de los silicatos cálcicos. La presencia de este compuesto es atribuida a la hidratación de la belita (Giraldo y Tobón, 2006). Se advierten regiones de baja cristalinidad (Figuras 5a y 5b), características de la fase de tobermorita, de morfología botroidal o en racimos, debido a que durante el proceso de hidratación, las partículas hidratadas se adhirieron mediante fuerzas de Van der Waals. En la Figura 5a se percibe la presencia de belita con una morfología esférica característica, lo cual revela una baja velocidad de hidratación.

Los resultados de DRX registraron la presencia de portlandita y etringita, producto de las reacciones de hidratación del cemento, y otros compuestos como cuarzo, albita y microclina, entre otros, asociados a los áridos que se utilizan en el proceso de preparación del concreto. En las imágenes de SEM de la muestra carbonatada (Figura 6) se ve la

**Tabla I.** Tiempos de carbonatación para los frentes A y B de cada relación a/c.

Relación a/c	Tiempo frente A [horas]	Tiempo frente B [horas]
0.4	18	69
0.5	14	54
0.6	8	32

**Tabla II.** Profundidades del frente de carbonatación [cm].

Relación a/c	0.4		0.5		0.6	
	A	B	A	B	A	B
Perfil						
Profundidad	0.53	1.03	0.56	1.00	0.64	1.02
D.E.	$\pm 0.03$	$\pm 0.01$	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.07$	$\pm 0.04$

\*D.E. Desviación estándar.

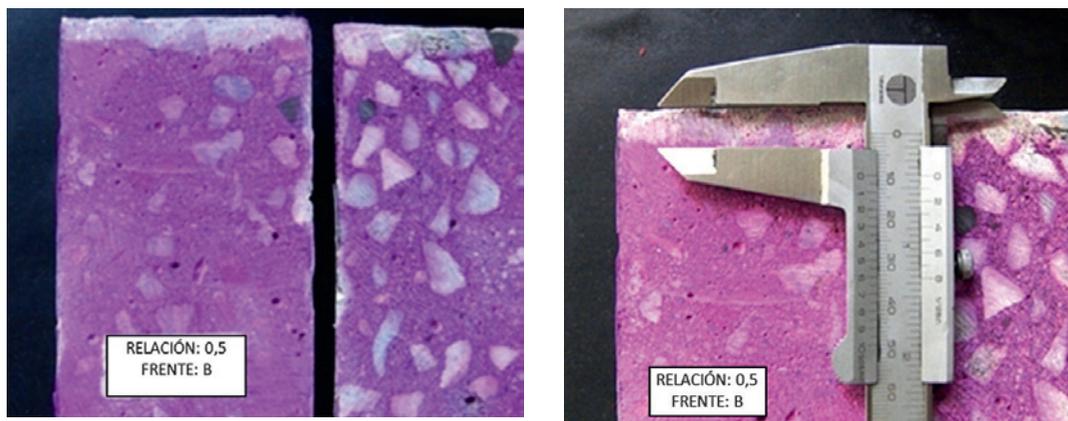


Figura 4. Determinación de la profundidad del frente B de carbonatación, a/c:0.5

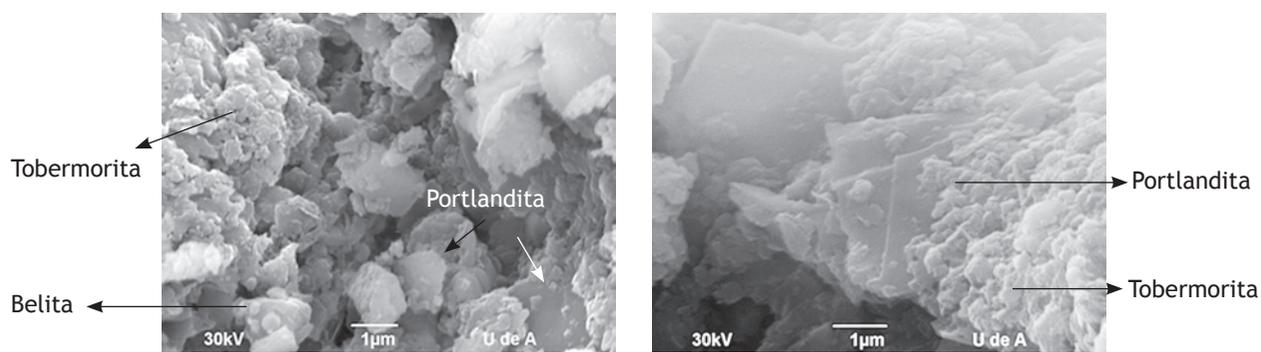


Figura 5. Imágenes SEM de las muestras no carbonatadas. Presencia de belita (a), portlandita y tobermorita (a y b).

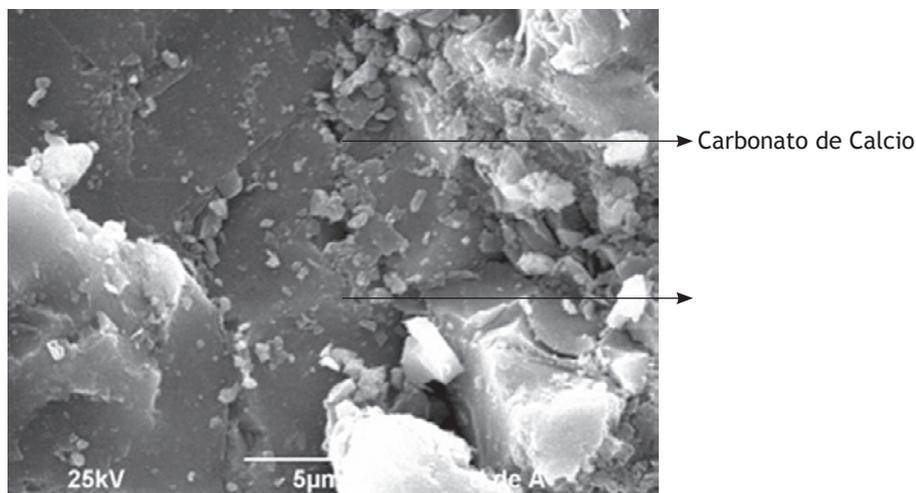


Figura 6. Imágenes SEM de las muestras no carbonatadas.

densificación de la estructura, producto de las reacciones del  $\text{CO}_2$  con la portlandita y con los demás compuestos alcalinos presentes en la matriz cementicia. También se aprecia la presencia de cristales de calcita, producto de la carbonatación de la muestra. Se comprobó la ausencia de portlandita y la presencia de calcita. Estos

dos acontecimientos son producto del proceso de carbonatación.

En los ensayos de penetración de cloruros por inmersión se observó que con la disminución de la relación a/c, aumentó la profundidad del frente carbonatado y se disminuyó la entrada del ión cloruro (Tabla III).

Tabla III. Profundidad de ingreso del ión cloruro [mm]\*

Relación a/c	Frente	30 días	45 días	60 días
0.4	Blanco	15±1.41	20.07±1.52	22.02±1.24
	A	10.55±0.64	14.05±0.78	16±0.71
	B	8.02±0.25	12±2.55	16.05± 0.92
0.5	Blanco	23.05±0.21	25.98±1.03	30.1±1.70
	A	21.05±0.50	24.45±2.12	26.1± .28
	B	18.05±0.71	20.02±0.32	23.05±1.13
0.6	Blanco	29.9±0.71	39.2±0.99	53.3±0.71
	A	25.45 ± 0.78	28.95 ± 1.49	33.05 ± 0.64
	B	23 ± 0.57	25.45 ± 2.19	30.45 ± 2.19

B: Sin carbonatación. \*Promedio de los datos.

En la Figura 7a se observa el perfil de concentración de cloruros para la relación a/c:0.4, con 30 días de inmersión. Se pueden observar mayores concentraciones para la muestra blanco y una disminución gradual con el aumento del frente carbonatado. En la Figura 7b hay una tendencia similar a la anterior (Carvalho, 2008). En

la Figura 7c a 60 días de inmersión, se aprecia una diferencia marcada entre la probeta blanco y las probetas carbonatadas; sin embargo, la diferencia en cuanto a las concentraciones obtenidas para los frentes A y B es de aproximadamente 0. Las probetas con relaciones a/c de 0.5 y 0.6 tuvieron un comportamiento similar.

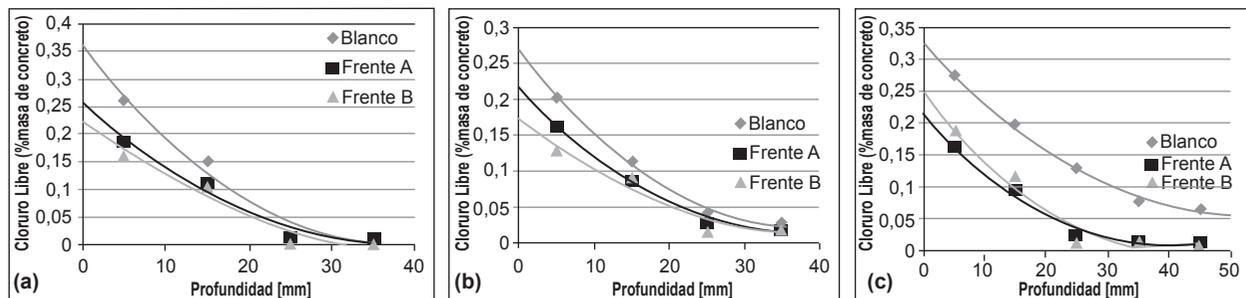


Figura 7. Perfiles de concentración de cloruros para las muestras con relaciones a/c 0.4 a 30(a), 45(b) y 60(c) días de inmersión.

En la Tabla IV se muestran los coeficientes de difusión obtenidos de acuerdo con la solución de la ecuación de la segunda ley de Fick, mediante las ecuaciones de regresión y de linealización de los perfiles de concentración de cloruros (Balaguera

y Porras, 2009). Además se observan los P-valor (valores de probabilidad) obtenidos del análisis de varianza de cada una de las regresiones lineales, sobre los cuales se puede establecer que existe una relación estadísticamente significativa entre ellos.

Tabla IV. Coeficientes de difusión.

Relación a/c	Frente	D [ $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ]	P- valor*	GL*
0.4	Blanco	6.89	0.0097	1
	A	4.02	0.0535	1
	B	3.44	0.0659	1
0.5	Blanco	8.04	0.0112	1
	A	5.36	0.0033	1
	B	4.38	0.0004	1
0.6	Blanco	9.65	0.0007	1
	A	8.04	0.0082	1
	B	6.89	0.0097	1

\*P-valor: valor de probabilidad y GL: grados de libertad.

La diferencia de valores en los coeficientes de difusión obtenidos con respecto a las relaciones a/c se atribuye al aumento de poros en la red, lo que disminuye la resistencia a la penetración de agentes agresivos. Con el avance de la profundidad del frente carbonatado se produce la reducción en el volumen de poro debido a la formación de  $\text{CaCO}_3$ , ya que el volumen molar aumenta aproximadamente 11.7 % cuando es formado a partir de portlandita.

La determinación de la carga pasante en las pruebas ACMT y RCPT se realizó mediante el cálculo

de la carga pasante en las pruebas ACMT y RCPT se realizó mediante el cálculo del área bajo la curva de los gráficos corriente vs. tiempo, con los valores obtenidos en ambas pruebas. En la Tabla V se ilustran estos valores y se observa que la carga pasante fue mayor en la prueba RCPT debido al aumento en la temperatura durante la prueba en aproximadamente  $45 \pm 5^\circ\text{C}$ . En los ensayos ACMT el aumento en la temperatura no superó los  $5^\circ\text{C}$ . Esto se atribuye a un incremento en la conductividad en la solución poro de los discos de concreto, con el aumento de la temperatura (Chávez, 2003).

**Tabla V.** Valores de carga pasante obtenidos de los ensayos RCPT y ACMT sobre las probetas con relación a/c = 0.4

Pruebas	RCPT			ACMT		
	Frentes	Blanco	A	B	Blanco	A
Relación a/c = 0.4						
$Q_{\text{pas}}$ (coulomb)	4046.09	3559.84	3191.88	2684.38	1787.34	1402.97
D.E*	$\pm 879.02$	$\pm 21.43$	$\pm 48.61$	$\pm 436.20$	$\pm 9.94$	$\pm 20.11$
Relación a/c = 0.5						
$Q_{\text{pas}}$ (coulomb)	6577.81	5643.22	4927.97	4194.30	2682.34	1962.97
D.E	$\pm 879.02$	$\pm 797.49$	$\pm 208.82$	$\pm 231.58$	$\pm 318.42$	$\pm 417.41$
Relación a/c = 0.6						
$Q_{\text{pas}}$ (coulomb)	8705.16	6150.94	6108.44	5221.56	3319.84	2615.63
D.E	$\pm 2908.20$	$\pm 201.08$	$\pm 398.19$	$\pm 125.95$	$\pm 143.85$	$\pm 190.03$

\*D.E. Desviación estándar.

Se observa que para la relación a/c = 0.6 en la prueba RCPT se obtuvieron valores similares de carga en ambos frentes de carbonatación, lo cual se debe al aumento de la temperatura, ocasionando un incremento en la movilidad de los iones, disminuyendo la interacción de éstos con la matriz. Además, el concreto de 0.6 se considera de menor calidad por tener la matriz más porosa, el cual alcanza las temperaturas más elevadas durante la prueba.

### CONCLUSIONES

Con el incremento del frente carbonatado, disminuyó la longitud de la profundidad de penetración del ión cloruro, lo que se atribuye a la densificación de la matriz cementicia ocasionada por la formación de  $\text{CaCO}_3$ . Este hecho tuvo mayor relevancia en las mezclas con mayor contenido de agua, ya que la disminución porcentual de la penetración del ión cloruro alcanzó un 40 % en concretos con relación a/c = 0.6.

En concretos con relación a/c = 0.4 esta disminución sólo logró 26 %, respecto a la profundidad de ingreso de cloruros, para probetas no carbonatadas. Con el incremento del frente carbonatado se redujo el coeficiente de difusión para el concreto empleado debido a la reducción del volumen capilar en la matriz cementicia. Para las tres relaciones a/c ensayadas, según las pruebas RCPT y ACMT, se presentó una disminución en la carga pasante total con el aumento del frente carbonatado, siendo ésta más notable en concretos cuya relación a/c es mayor, cuya influencia de la carbonatación se refleja en concretos de menor calidad.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a Colciencias y a la ARC por la financiación de esta investigación.

A los ingenieros Diego Balaguera y Blanca Porras se les agradece por sus valiosas contribuciones.

## LITERATURA CITADA

- Balaguera D. y Porras B. 2009.** Evaluación del efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ión cloruro en concreto. Bucaramanga, pp. 52-54. Trabajo de grado (Ingeniería Físicoquímica). Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Industrial de Santander.
- Carrasco, M. 2007.** [En línea]. Evaluación de estructuras de hormigón. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina [Disponible en: <http://www.frsf.utn.edu.ar/>].
- Carvalho, H. 2008.** Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente. Universidade Federal de Santa Maria. RS, Brasil.
- Cornelius, G. 2004.** Prediction of Deterioration of Concrete Bridges. DUP Science. Netherlands.
- Chávez, M. 2003.** Perfiles de penetración de cloruro en estado lónico en concretos del Rango A/C 045 a 0965. Rev. Inst. investig. Fac. Minas Metal Cienc. Geogr. Vol.6, No.12:36-43.
- Del Valle, A. et al, 2001.** El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro.
- Giraldo, M. y Tobón, J. 2006.** Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Medellín. Revista Dyna, Año 73, No. 148: 69-81.
- Sánchez de Rojas. 2004.** Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Tesis doctoral en Ingeniería de la Construcción. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana. Universidad de Alicante.
- Yang, C. 2003.** An electrochemical method for accelerated migration test of diffusion coefficient in cement-based materials. Materials Chemistry and Physics 81: 16-125.