

## **Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros**

### **Metakaolin concrete: Carbonation and chloride behavior**

*Ruby Mejía de Gutiérrez<sup>1\*</sup>, Cesar Rodríguez<sup>1</sup>, Erich Rodríguez<sup>1</sup>, Janneth Torres<sup>2</sup>, Silvio Delvasto<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00 edificio 349, Cali, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Cra. 32 Chapinero vía Candelaria, Palmira, Colombia

(Recibido el 9 de junio de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

#### **Resumen**

El propósito de este artículo es presentar los resultados obtenidos en el estudio de mezclas de concreto producidas con un 90% de cemento Pórtland ordinario (OPC) y un 10% de adiciones de metacaolín (MK) y humo de sílice (SF). Se estudiaron cuatro tipos de MK, dos de ellos producidos a través de un tratamiento térmico de caolines colombianos y los dos restantes fueron obtenidos en el mercado internacional (Europa y Estados Unidos). Las propiedades evaluadas fueron resistencia a compresión, absorción de agua, volumen total de poros permeables, absorción capilar, resistencia a la carbonatación y resistencia a la penetración de iones cloruro. El estudio de carbonatación se realizó en especímenes de concreto a diferentes edades de curado en una cámara climática bajo condiciones controladas (30°C, 70% H.R. y 2,25% CO<sub>2</sub>). Los concretos adicionados, a 28 días de curado, presentaron una mayor susceptibilidad frente a la carbonatación en comparación con los concretos de referencia (OPC sin adición), sin embargo, a mayor edad de curado la resistencia a carbonatación de las muestras de concreto con y sin adición incrementó. La permeabilidad a cloruros fue evaluada mediante la aplicación de la norma ASTM C1202. En general, los concretos con adición presentan la menor absorción capilar y la más alta resistencia a la penetración del ión cloruro en comparación a las mezclas de OPC sin adición.

----- **Palabras clave:** Metacaolín, humo de sílice, concretos adicionados, carbonatación, permeabilidad al ión cloruro

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 +330 24 36, fax: + 57 + 2 +339 24 50, correo electrónico: rudeguti@univalle.edu.co (R. de Gutiérrez).

## Abstract

The purpose of this paper is to present the results obtained in an experimental study that analyzed the performance of different concrete mixes. These mixes were produced with 90% of ordinary Portland cement (OPC) and the other 10% with the additions of metakaolin (MK) and silica fume (SF). Four types of MK were tested; two of these were produced by a thermal treatment on Colombian kaolin. The others two were imported from the international commercial market. The factors evaluated in all the concrete mixes were the following: compressive strength, water absorption and total volume of permeable porosity, capillary absorption, carbonation depth and chloride penetration. The concrete samples were submitted into an accelerated carbonation process inside a climatic chamber (30° C, 70% H.R. and 2.25% CO<sub>2</sub>). At 28 days of curing the carbonation depths for the blended concrete mixtures were greater than the one obtained in the OPC concrete without addition. With a prolonged curing age in all samples, with or without mineral additions, tend to slow the carbonation rate in the concrete. The resistance of the concrete to the chloride penetration was evaluated according to ASTM standard C1202. This study proved that blended concrete specimens have a lower capillary absorption and a higher chloride penetration resistance once these were compared with OPC concrete specimens without addition.

-----**Keywords:** Metakaolin, silica fume, blended concretes, carbonation, chloride permeability

## Introducción

La principal causa de deterioro en estructuras de concreto es la corrosión del acero de refuerzo, generalmente iniciada por mecanismos de carbonatación y difusión de cloruros. La carbonatación es un proceso químico donde el dióxido de carbono se difunde a través de los poros capilares interconectados del concreto, y reacciona con algunas de las fases hidratadas del cemento tales como el hidróxido de calcio (CH) y los silicatos cálcicos hidratados (CSH), aunque también puede reaccionar con otras fases no hidratadas como el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) y el dicálcico (C<sub>2</sub>S) [1, 2]. Estas diferentes reacciones afectan la microestructura y propiedades de la pasta cementicia [3]. Al promover la disminución de la alcalinidad en la solución del poro y con ello un decremento en los valores de pH desde 12,5 a 9,5 contribuyen a la destrucción de la película pasivante protectora del acero de refuerzo [4]. La velocidad de carbonatación en los concretos es afectada por las características de la atmósfera de exposición tales

como humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub> y temperatura. El proceso de carbonatación prevalece cuando la humedad relativa se encuentra entre el 60% y 70%; así los poros parcialmente llenos de agua promueven la difusión de CO<sub>2</sub> y aceleran la formación de ácido carbónico. Otros factores que pueden incrementar la velocidad de carbonatación están relacionados con la calidad del concreto, tales como el tipo de cemento, las condiciones de curado, la relación agua/cemento y la permeabilidad del material [5-8]. El coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> puede ser obtenido por medio de la primera ley de Fick [6], tal como se expresa en la ecuación 1:

$$X = \sqrt{2DC/a} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde X representa la profundidad del frente de carbonatación (mm) a un tiempo de exposición  $t$  (años);  $C$  la concentración de CO<sub>2</sub>,  $D$  el coeficiente de difusividad y  $a$  es la concentración de las fases activas originadas en el proceso de

hidratación del cemento así como en la reacción puzolánica [2]. Esta ecuación puede ser redefinida y reducida obteniéndose la ecuación 2:

$$X = K_C \times \sqrt{t} \quad (2)$$

Donde  $K_C$  representa el coeficiente de carbonatación y por tanto la velocidad de penetración (mm/año). Esta expresión ha sido aceptada por diversos investigadores alrededor del mundo [3, 6, 9]. Por su parte, los iones cloruro pueden estar presentes en algunos de los componentes de la mezcla de concreto, tales como los agregados, el agua o los aditivos; también pueden penetrar desde el exterior del material, particularmente debido a la presencia del agua de mar o las sales de deshielo. La velocidad de la penetración de los iones cloruro depende fundamentalmente de la estructura de los poros del concreto y la capacidad de enlace que tienen algunos productos de hidratación para captar este agente agresivo, en este sentido las adiciones contribuyen positivamente. Aunque la incorporación de las adiciones minerales o materiales suplementarios le confieren al concreto una reducción de la capilaridad, en concretos adicionados es posible observar un mayor grado de susceptibilidad frente a la carbonatación. Numerosos investigadores, han reportado que los concretos adicionados con ceniza volante (CV) presentan velocidades de carbonatación más altas [7, 10, 11]. Por el contrario, Cabrera y Wooley [12] al evaluar estructuras de concreto con CV después de 25 años de construidas reportan que el grado de carbonatación no es significativo. Igualmente, Atis [13] reporta que concretos con un 50% de CV presentaron una menor carbonatación en comparación con concretos de OPC. Los resultados de diferentes fuentes citadas por Wesche [14] indican que concretos con y sin CV, pero de resistencias mecánicas similares, presentaron frentes de carbonatación aproximadamente iguales. Castro et al. [15] compararon varios concretos binarios con adiciones tales como metacaolín, cenizas volantes, humo de sílice, ceniza de cascarilla de arroz y escoria siderúrgica, y concluyeron que en los concretos adicionados la carbonatación se reduce hasta en un 50%. Por tanto, puede afirmarse

que existe controversia al respecto. El objetivo fundamental de este estudio fue evaluar la durabilidad de concretos adicionados con cuatro diferentes tipos de MK, de los cuales dos de ellos fueron producidos por medio de un tratamiento térmico de caolines de origen colombiano y los dos restantes fueron seleccionados del mercado europeo y americano respectivamente. La durabilidad de los materiales en estudio fue evaluada a través de la susceptibilidad frente a la carbonatación y la resistencia a la penetración del ión cloruro.

## **Experimentación**

### ***Materiales***

Para la producción de los concretos se empleó un cemento Pórtland no-adicionado (OPC). Como adiciones se utilizaron cuatro muestras de metacaolín (MK) y un humo de sílice (SF). Las propiedades fisicoquímicas de los materiales empleados se listan en la Tabla 1. MK3 y MK5 fueron obtenidos a través del tratamiento térmico a 700°C de dos tipos diferentes de caolín colombiano, el primero de los cuales procede de un caolín con un 97% de caolinita y el segundo de un caolín con un 48% de caolinita y 48% de cuarzo [16]; MKA y MKE corresponden a materiales disponibles en el mercado americano y europeo, respectivamente.

En el concreto se utilizó un agregado grueso triturado con un tamaño máximo de 19 mm, una gravedad específica de 2,72 y una absorción de 1,2%. Como agregado fino se empleó una arena de río con una gravedad específica de 2,56, un porcentaje de absorción de 3,7% y un módulo de finura de 2,8. La gradación del agregado fino y grueso se presenta en la tabla 2.

### ***Diseño y preparación de mezclas de concreto***

Las mezclas de concreto fueron diseñadas con base en los procedimientos recomendados en la norma ACI, utilizándose 475 kg de cementante por m<sup>3</sup> de concreto y una relación agua/cementante (a/C) de 0,4. La cantidad total de agregados fue de 1.743 kg/m<sup>3</sup>, obtenida al mezclar agregado

grueso y fino en proporción del 60% y 40%, respectivamente. En total se prepararon seis mezclas de concreto, de las cuales cinco corresponden a un sistema binario de cemento Pórtland ordinario y un 10% de adición, y la restante a la mezcla de referencia, es decir sin adición (OPC). En todas las mezclas de concreto producidas se incorporó

un aditivo superplastificante (SP: Sikament NS) a una concentración entre 0,9% y 1,8% con el propósito de mantener la relación a/C constante y lograr un asentamiento de  $90 \pm 15$  mm. Se produjeron especímenes cilíndricos de 76,2 mm de diámetro, los cuales fueron curados bajo agua a una temperatura de  $25 \pm 5$  °C.

**Tabla 1** Características físicas y químicas de los materiales utilizados

| <b>Características</b>                 | <b>OPC</b> | <b>MK5</b> | <b>MK3</b> | <b>MKA</b> | <b>MKE</b> | <b>SF</b> |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| <i>Composición química, %</i>          |            |            |            |            |            |           |
| SiO <sub>2</sub>                       | 20,27      | 71,39      | 52,52      | 52,11      | 53,5       | 94,28     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 5,34       | 24,86      | 43,80      | 45,32      | 43,5       | 1,06      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 3,91       | 0,79       | 1,04       | 1,49       | 1,20       | 0,29      |
| CaO                                    | 61,70      | 0,20       | 0          | 0          | 0          | 1,37      |
| MgO                                    | 1,44       | 0,56       | 0          | 0          | 0          | 0         |
| Perdidas por ignición                  | 3,57       | 1,15       | 0,53       | 0,40       | 0,50       | 2,91      |
| <i>Propiedades físicas</i>             |            |            |            |            |            |           |
| Gravedad Específica                    | 3,10       | 2,57       | 2,48       | 2,55       | 2,60       | 2,25      |
| Diámetro medio (D <sub>4,3</sub> ), μm | -          | 12,31      | 11,99      | 12,46      | 4,70       | -         |
| Índice actividad puzolánica, %         | -          | 108        | 102        | 101        | 100        | 105       |

**Tabla 2** Distribución granulométrica de los agregados

| <b>Tamiz N.º</b><br><b>(tamaño)</b> | <b>Porcentaje en peso que pasa (acumulado)</b> |                      |
|-------------------------------------|--|----------------------|
|                                     | <b>Agregado grueso</b>                         | <b>Agregado fino</b> |
| 1 (25,4 mm)                         | 100,0  | 100,0                |
| ¾ (19,0 mm)                         | 87,5   | 100,0                |
| ½ (12,7 mm)                         | 59,3   | 100,0                |
| 3/8 (9,5 mm)                        | 31,3   | 96,7                 |
| 4 (4,75 mm)                         | 14,6   | 92,2                 |
| 8 (2,36 mm)                         | 8,7  | 87,7                 |
| 16 (1,18 mm)                        | 4,6  | 77,5                 |
| 30 (600 μm)                         | 3,3  | 49,5                 |
| 50 (300 μm)                         | 3,3  | 16,3                 |
| 100 (150 μm)                        | 3,3  | 2,4                  |

### Ensayos

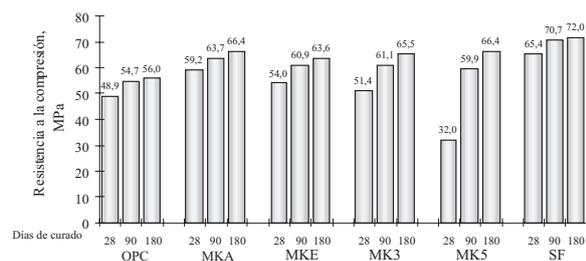
Cada uno de los concretos se caracterizó mediante la determinación de su resistencia a la compresión, absorción total, volumen de poros permeables (ASTM C642) y absorción capilar (ASTM C1585) [17]. Como parámetros de durabilidad del concreto se evaluó la susceptibilidad a la carbonatación y la resistencia a la penetración del ión cloruro. El ensayo de carbonatación se llevó a cabo en muestras de concreto a diferentes edades de curado (28, 90 y 180 días), mediante la exposición de los especímenes de concreto en el interior de una cámara climática a concentración de 2,25 % CO<sub>2</sub> y bajo condiciones atmosféricas controladas de 30 °C y 70% H.R., determinándose la profundidad de carbonatación y la pérdida de resistencia a compresión. El avance del frente de carbonatación se midió mediante el corte transversal de los concretos y posterior aspersión

de una solución alcohólica de fenofaleína sobre la superficie, en donde se genera un revelado a través de la coloración rojo magenta del área no carbonatada e incolora ( $\text{pH} < 9$ ) indicando que el concreto ha sufrido carbonatación. La resistencia a la penetración del ión cloruro se evaluó acorde a los procedimientos descritos en la norma ASTM C1202. Esta prueba se realizó en especímenes cilíndricos de 76,2 mm de diámetro y 50 mm de altura. En general, todos los resultados reportados corresponden al promedio de un mínimo de 3 especímenes por ensayo.

## Resultados y discusión

### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto fue evaluada en especímenes con 28, 90 y 180 días de curado, los resultados se muestran en la figura 1. La mayor resistencia se obtuvo en el concreto adicionado con SF, 72 MPa a 180 días; aunque cabe anotar que para esta misma edad de curado la resistencia a compresión de los concretos adicionados con MK fue tan solo un 9 % inferior. Un dato, aparentemente atípico, es el del concreto adicionado con MK5 a 28 días de curado. Sin embargo, este menor desarrollo resistente podría asociarse con su menor pureza y carácter menos amorfo (tabla 2), lo cual genera una reactividad más lenta a edades tempranas, comparado con el resto de materiales [16].



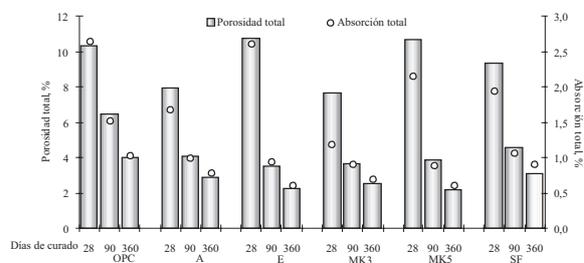
**Figura 1** Resistencia a compresión de las mezclas de concreto evaluadas

La resistencia a compresión de los concretos de OPC con la incorporación de un 10% de MKA, MKE, MK3, MK5 y SF tiende a incrementarse

a los 180 días de curado en un orden de 18,5%, 13,6%, 17,0%, 18,5% y 28,0%, respectivamente. Es de anotar que, la resistencia a compresión de los concretos con MK5 y MK3 fue más baja que la obtenida en los concretos adicionados con MKA y MKE con un curado de 28 días, sin embargo a los 180 días de curado todos los concretos que incorporan MK presentaron resistencias a la compresión similares (63,6 a 66,4 MPa).

### Absorción total y volumen total de poros permeables

El ensayo de absorción de agua y porosidad total se llevó a cabo con base en la norma ASTM C642 en especímenes con 28, 90 y 360 días de curado. El grado de hidratación de cada uno de los concretos se incrementó a través de los periodos de curado prolongados y en función del tipo de adición incorporada, lo cual contribuyó a disminuir la absorción total y la porosidad de los concretos, comportamiento que se puede observar en la figura 2. Todos los concretos adicionados, a partir de una edad de curado de 90 días, presentaron una absorción total inferior al 1,0 % y un volumen de poros permeables inferior al 4,6 %, estos valores son menores a los obtenidos para los concretos de referencia (OPC); se destacan entre estos los adicionados con MK.



**Figura 2** Ensayo de absorción por inmersión (ASTM C642)

A pesar de que la absorción de agua por inmersión total permite obtener una estimación del volumen total de poros en el concreto, no reproduce con precisión la permeabilidad del concreto, parámetro importante en la evaluación de la durabilidad del material. Al respecto, De Shutter

y Audenaert [17] basados en resultados experimentales obtenidos en 22 muestras de concretos de diferente composición, reportaron que la determinación del volumen de poros permeables a través del ensayo de absorción por inmersión no es un parámetro confiable para la estimación de la durabilidad del concreto, en particular la afectación debida a procesos de carbonatación y/o penetración de cloruros.

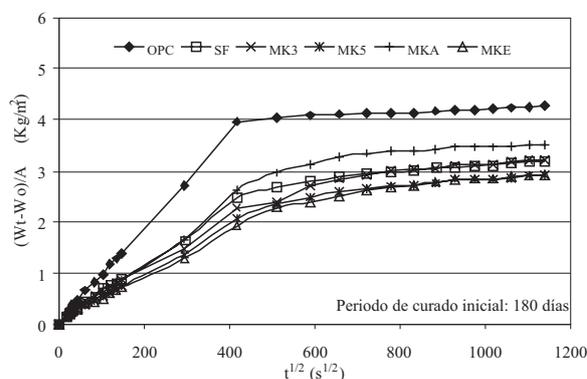
### Absorción capilar

Para el ensayo de absorción capilar se utilizaron especímenes cilíndricos de concreto de 76,2 mm de diámetro y 50 mm de altura, curados a edades de 28, 90 y 180 días. Estos fueron previamente acondicionados mediante el secado a 60°C hasta masa constante y posterior impermeabilización de las caras laterales curvas con el propósito de direccionar el flujo de agua. La masa de los especímenes se determinó a diferentes tiempos para calcular la cantidad de agua absorbida y con ello calcular los coeficientes de absorción capilar,  $k$  ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ), y la resistencia a la penetración de agua,  $m$  ( $\text{s/m}^2$ ) [18]. Estos parámetros están relacionados entre si en forma indirecta y los dos dependen de la estructura de los poros, mas sin embargo el valor de  $k$  también se ve afectado por la porosidad total [18]. Tal como se aprecia en la figura 3 y en los datos recogidos en la tabla 3, la absorción capilar puede ser reducida con la incorporación de adiciones minerales activas a través del desarrollo de la reacción puzolánica. La mayor resistencia a la absorción capilar fue obtenida para los concretos adicionados con MK3 y SF. En general, la resistencia a la penetración de agua ( $m$ ) de los concretos adicionados fue hasta 2,4 veces más alta que la correspondiente a los concretos de referencia (OPC). El valor obtenido del parámetro de velocidad de absorción de agua o absorptividad (ASTM C1585), para los especímenes de concreto adicionados con MK en proporción del 10%, fue en promedio de  $0,0051 \text{ mm/s}^{1/2}$  a los 180 días. Ho y Lewis [19], asumiendo esta propiedad como criterio de durabilidad, sugieren utilizar recubrimientos de concreto de 30 mm para estructuras de concreto reforzado expuestas

a medios severos, tales como las ubicadas en ambiente marino, siempre y cuando éstos posean absorptividad de  $3 \text{ mm/h}^{1/2}$ , es decir  $0,05 \text{ mm/s}^{1/2}$ . En este sentido, los concretos adicionados con MK y SF cumplen ampliamente esta recomendación.

**Tabla 3** Parámetros de absorción capilar

| Mezcla    | $k_{\text{SUC}}$ ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ) |          | $m_{90\text{días}}$ ( $10^7 \text{ s/m}^2$ ) |
|-----------|--|----------|--|
|           | 28 días  | 180 días |  |
| OPC       | 0,0136   | 0,0093   | 3,9  |
| OPC + MKA | 0,0094   | 0,0060   | 7,2  |
| OPC + MKE | 0,0057   | 0,0044   | 6,3  |
| OPC + MK3 | 0,0079   | 0,0051   | 9,3  |
| OPC + MK5 | 0,0057   | 0,0047   | 6,0  |
| OPC + SF  | 0,0060   | 0,0057   | 8,1  |



**Figura 3** Resultados del ensayo de absorción capilar

### Ensayos de carbonatación

La concentración de  $\text{CO}_2$  en el ambiente atmosférico es uno de los parámetros que afectan significativamente la velocidad de carbonatación en los concretos, además de la temperatura y la humedad relativa [20]. El  $\text{CO}_2$  está en el medio ambiente natural a una concentración de aproximadamente un 0,035% en volumen y esta concentración reducida hace que un proceso de carbonatación sea observable sólo después de varios años. Por ello, para determinar la susceptibilidad

a la carbonatación de un concreto se hace necesario recurrir a ensayos acelerados, específicamente incrementando los niveles de concentración de  $\text{CO}_2$ . Para el presente estudio, especímenes con tiempos de curado iniciales de 28, 90, 180 y 240 días fueron transferidos a una cámara climática de  $\text{CO}_2$  bajo condiciones controladas ( $30^\circ\text{C}$ , 70% H.R. y 2,25% de  $\text{CO}_2$ ). Se evaluó la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión luego de 3 y 6,5 semanas de exposición. El espesor de material carbonatado fue medido en 6 lugares diferentes de cada probeta, a partir de lo cual se calculó el promedio; los resultados obtenidos de profundidad de carbonatación a los dos tiempos de exposición se presentan en la figura 4, los cuales se corresponden con las muestras incluidas en la figura 5 luego de la aplicación de la fenolftaleína.

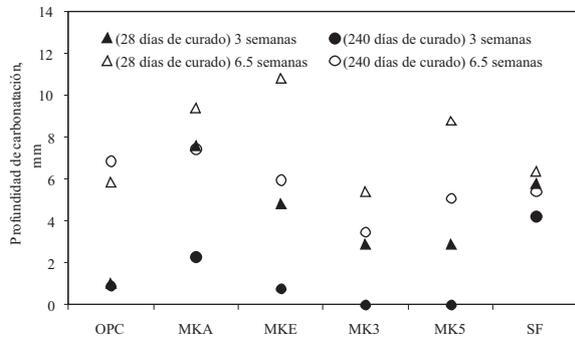


Figura 4 Profundidad de carbonatación a diferentes tiempos de exposición y períodos de curado

Como puede observarse en la figura 4, el incremento en los tiempos de curado antes del ensayo de carbonatación acelerada contribuye de manera positiva a reducir el avance del frente carbonatado. Estos resultados son coherentes con lo reportado por otros investigadores [2, 13, 21]. A 28 días de curado, los concretos adicionados presentan un mayor avance del frente de carbonatación en comparación con los concretos de OPC sin adición. Sin embargo, luego de 240 días el frente de carbonatación es similar. Concretos adicionados con MK3 mostraron los frentes de carbonatación más bajos, lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de capilaridad.

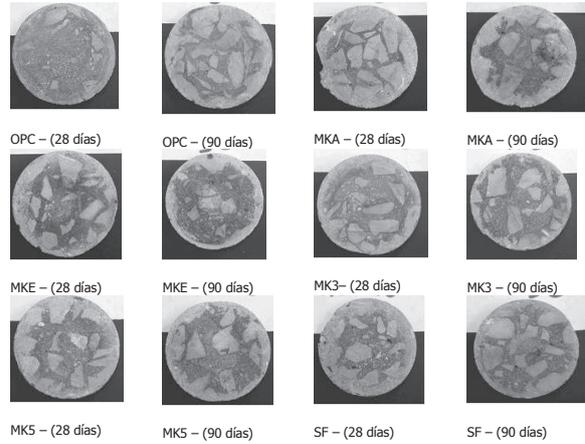


Figura 5 Especímenes de concreto después del ensayo de carbonatación acelerado

El coeficiente de carbonatación en concretos ( $K_c$ ) puede ser estimado por medio de la profundidad del frente de carbonatación, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de carbonatación acelerada, mediante la ecuación 3 [22, 23]:

$$K_c = \frac{(X_{C2}^2 - X_{C1}^2)^{1/2}}{(t_2 - t_1)^{1/2}} \quad (3)$$

donde  $X_{C1}$  y  $X_{C2}$  representan las profundidades del frente de carbonatación medidas en un tiempo  $t_1$  y  $t_2$ . Los resultados se muestran en la figura 6.

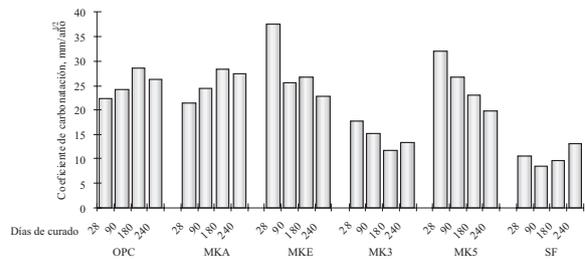


Figura 6 Coeficiente de carbonatación de mezclas de concreto (2,25%  $\text{CO}_2$ , 70% H.R.,  $30^\circ\text{C}$ )

Debido al gran número de factores que afectan los resultados finales, es difícil establecer una correlación entre los tiempos de exposición bajo condiciones aceleradas y naturales. Al respecto,

Ho y Lewis [7] encontraron que la exposición de concretos con 7 días de curado a condiciones de carbonatación acelerada (23°C, 50% H.R. y 4% de CO<sub>2</sub>) durante una semana es equivalente a un año de exposición bajo ambientes naturales a las mismas condiciones de temperatura y humedad.

Las velocidades de carbonatación para condiciones aceleradas (K<sub>C</sub>) y condiciones naturales (K<sub>N</sub>) pueden relacionarse con la raíz cuadrada de la relación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> correspondientes a cada condición, tal como se ilustra en la ecuación 4 [24]:

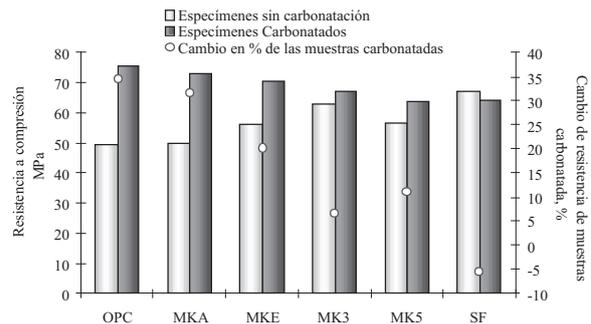
$$\frac{K_c}{K_N} = \sqrt{\frac{C}{N}} \quad (4)$$

donde C es la concentración de CO<sub>2</sub> en el ensayo acelerado y N la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente natural. Teniendo en consideración que la concentración de CO<sub>2</sub> usada en el presente estudio para el ensayo de carbonatación acelerada fue de 2,25% y que la concentración bajo condiciones ambientales normales es de 0,035% se pueden calcular los valores de K<sub>N</sub>; la tabla 4 lista los valores obtenidos en el presente estudio para especímenes con 28 y 90 días de curado. Diversos autores han reportado que los valores calculados por medio de esta ecuación son más altos en comparación con datos experimentales determinados en condiciones atmosféricas naturales, lo cual es atribuido al tipo de concreto y la concentración de CO<sub>2</sub> utilizada en los ensayos de carbonatación acelerada; al respecto, se afirma que de acuerdo a la concentración usada en la prueba es posible obtener valores entre 2 y 40 veces más altos que los observados bajo pruebas en ambientes naturales [24-27]. La carbonatación en los especímenes de concreto tuvo un efecto positivo sobre la resistencia mecánica a compresión en la mayoría de los concretos evaluados, tal como se puede observar en la figura 7. Los concretos adicionados con MKA, MKE, MK3 y MK5 presentaron incrementos resistentes de hasta un 31%; por el contrario el concreto adicionado con SF presentó una disminución de la resistencia de un 5%.

Cabe anotar, que para el concreto de referencia OPC la resistencia incrementó en un 35%. Estos incrementos se asocian a una colmatación de poros superficial y en consecuencia a una mayor compacidad del espécimen.

**Tabla 4** Coeficiente de carbonatación calculado (K<sub>N</sub>, mm/año)

| Mezcla de concreto | Período inicial de curado (días) |      |
|--------------------|----------------------------------|------|
|                    | 28                               | 90   |
| OPC                | 2,79                             | 3,02 |
| MKA                | 2,67                             | 3,03 |
| MKE                | 4,69                             | 3,18 |
| MK3                | 2,21                             | 1,87 |
| MK5                | 4,00                             | 3,33 |
| SF                 | 1,30                             | 1,05 |

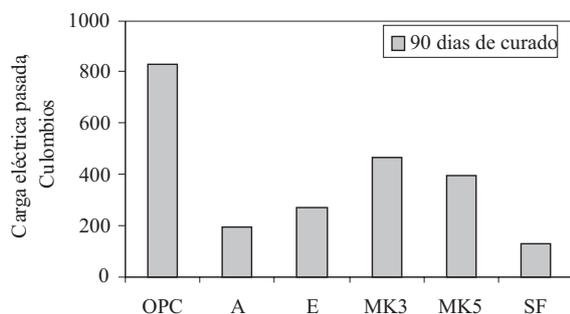


**Figura 7** Efecto de la exposición a carbonatación en la resistencia a la compresión

**Resistencia a la penetración del ión cloruro**

Los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), determinados según la norma ASTM C1202 a las mezclas de concreto con edad de curado de 90 días, se presenta en la figura 8, en la cual se pueden observar los valores de carga transferida expresada en Culombios (C). La carga eléctrica trasferida para el concreto de OPC fue en promedio de 832 C. Todos los especímenes adicionados con MK

o SF presentaron valores inferiores. No obstante, el concreto con SF exhibió la carga más baja (130 C). En general, se aprecia que a 90 días de curado, los concretos adicionados reportaron valores de carga transferida muy baja (100-1000 C) con base en la tabla incluida en la norma ASTM C1202, pudiendo considerarse como materiales de muy baja permeabilidad a cloruros. Es de anotar, que los ensayos realizados en especímenes de concreto con edad de curado de 28 y 180 días mostraron las mismas tendencias. A partir de estos resultados se ha encontrado que todas las adiciones minerales evaluadas son altamente eficientes en la prevención del ingreso de iones cloruros al interior del concreto. Estos valores reducidos se atribuyen a la modificación microestructural de la pasta de cemento hidratada como consecuencia de la reacción puzolánica, donde el tamaño de partícula de la adición y su reactividad son factores importantes en su desempeño. En los concretos adicionados con MK, igualmente contribuye el alto contenido de alúmina amorfa y su capacidad de enlazar los iones cloruro para la formación de la sal de Friedel, tal como se ha demostrado en anteriores estudios [28].



**Figura 8** Resultados del ensayo de permeabilidad a cloruros

### Conclusiones

La resistencia a compresión de los concretos adicionados con MK fue hasta un 18,5% más alta que la de los concretos de referencia OPC sin adición; es de anotar que los concretos con MK a 180 días de curado alcanzan una resistencia hasta 66,4 MPa, valor tan sólo un 9% inferior a la resistencia del concreto adicionado con SF.

La profundidad de carbonatación de los concretos adicionados y con 28 días de curado fue más alta que en los concretos OPC, aunque no supera los 10 mm, aún en las condiciones aceleradas del ensayo. Al incrementar la edad de curado, previo a la exposición al ambiente agresivo, la velocidad de carbonatación se reduce, destacándose el desempeño de los concretos adicionados con MK3. La resistencia a la compresión de los especímenes de concreto adicionados con MK una vez carbonatados incrementó hasta en un 31%. Todos los especímenes de concreto con adición de MK o SF exhiben menor permeabilidad frente al ión cloruro, en comparación con los concretos sin adición. En general, los resultados obtenidos en el presente estudio indican que los metacaolines obtenidos del tratamiento térmico de caolines colombianos, de alta y baja pureza en caolinita, presentan un desempeño comparable a los comerciales de origen americano y/o europeo.

### Agradecimientos

Los autores de este estudio, miembros del grupo Materiales Compuestos, agradecen a la Universidad del Valle y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales por el apoyo en su desarrollo.

### Referencias

1. B. Johannesson, P. Utgenannt. "Microstructural Changes caused by carbonation of cement mortar". *Cement and concrete Research*. Vol. 31. 2001. pp. 925-931.
2. P. Sulapha, S. F. Wong, T. H. Wee, S. Swaddiwudhipong. "Carbonation of concrete containing mineral admixtures". *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 15. 2003. pp. 134-143.
3. A. Steffens, D. Dinkler, H. Ahrens. "Modeling carbonation for corrosion risk prediction of Concrete Structures". *Cement and Concrete Research*. Vol. 32. 2002. pp. 935-941.
4. K. Tuutti. *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm. 1982. pp. 145-152.
5. L. Fernández, F. Puertas, M. T. Blanco-Varela, T. Vázquez. "Carbonatación de pastas de cemento de aluminato de calcio". *Materiales de Construcción*. Vol. 51. 2001. pp. 127-136.

6. Y. F. Houst, F. H. Wittmann. "Depth Profiles of Carbonates formed during natural Carbonation". *Cement and Concrete Research*. Vol. 32. 2002. pp. 1923-1930.
7. D. W. S. Ho, R. K. Lewis. "Carbonation of concrete and its prediction". *Cement and Concrete Research*. Vol. 17. 1987. pp. 489-504.
8. E. Possan, J. Andrade, D. D. Molin. "Emprego da metodologia de superficie de resposta no estudo da carbonatacao do concreto com sílica activa". *Proc. 48º Congresso Brasileiro do Concreto*. Rio de Janeiro. 2006. pp. 1-14.
9. J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat. "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete". *Construction and Building Materials*. Vol. 20. 2006. pp. 744-753.
10. K. K. Sideris, A. E. Savva, J. Papayianni. "Sulfate Resistance of carbonation of plain and blended cements". *Cement and Concrete Composites*. Vol. 28. 2006. pp. 47-56.
11. V. G. Papadakis. "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress". *Cement and Concrete Research*. Vol. 30. 2000. pp. 291-299.
12. J. G. Cabrera, G. R. Woolley. "A study of 25-year old pulverized fuel ash concrete used in foundation structures". *Proc. of Instrumentation Civil Engineering, Part 2*. 1985. pp. 149-165.
13. C. D. Atis. "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash". *Construction and Building Materials*. Vol. 17. 2003. pp. 147-152.
14. K. Wesche. *Fly ash in concrete properties and performance*, London: E&FN Spon. 1991. pp. 143-155.
15. A. Castro, R. Ferreira, A. M. Lopes, O. Cascudo, H. Carasek. "Durabilidade de concretos com adições minerais frente a carbonatacao e ao ataque por cloretos". *Proc. 46º Congresso Brasileiro do Concreto*. Rio de Janeiro. 2006. pp. 662-680.
16. R. Mejía de Gutiérrez, J. Torres, C. E. Guerrero. "Análisis del proceso térmico de producción de una puzolana". *Materiales de Construcción*. Vol. 54. 2004. pp. 65-72.
17. G. D. Shutter, K. Audenaert. "Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration". *Materials and Structures*. Vol. 37. 2004. pp. 591-596.
18. G. Fagerlund. "On the capillarity of concrete". *Nordic Concrete Research*. Vol. 1. 1982. pp. 6.1 - 6.20.
19. D. W. Ho, R. K. Lewis. "The water Sorptivity of Concretes: The Influence of Constituents under curing". *Durability of Building Materials*. Vol. 4. 1987. pp. 241-252.
20. A. V. Saetta, R. V. Vitaliani. "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part II. Practical applications". *Cement and Concrete Research*. Vol. 35. 2005. pp. 958-967.
21. F. Delfin, L. A. Ruiz. "Estudios sobre la Influencia del Tipo de Cemento en la Susceptibilidad a la Carbonatación del Hormigón". *Proc. X Jornada Chilena del Hormigón, IDIEM. Santiago de Chile*. 1993. pp. 25-38.
22. E. I. Moreno. *Carbonation of Blended Cement Concretes*. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering University of South Florida. Tampa. 1999.
23. D. Linares, M. Sánchez. "Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation". *Rev. Tec Ing. Univ Zulia*. Vol. 26. 2003. pp. 34-44.
24. A. Castro, R. Ferreira, A. M. Lopes, O. Cascudo, H. Carasek. "Relationship between Results of Accelerated and Natural Carbonation in various Concretes". *Proc. International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*. Barcelona. 2004. pp. 988-997.
25. S. K. Roy, K. B. Poh, D. O. Northwood. "Durability carbonation and weathering studies". *Building and Environment*. Vol. 34. 1999. pp. 597-606.
26. M. A. Sanjuan, C. Andrade, M. Cheyrezy. "Comparison between accelerated and natural carbonation results in different concretes". *Proc. International Congress on High Performance Concrete and Performance and quality of concrete structures 3*. ACI SP207-17. Recife. 2002. pp. 263-278.
27. G. C. Isaia, M. Vagheti, A. G. Gastaldini. "Comparative study of natural and accelerated carbonation tests of HPC with pozzolans: A preliminary approach". *Proc. International Congress on High Performance Concrete and Performance and quality of concrete structures 3*, ACI SP207-17. Recife. 2002. pp. 467-488.
28. J. Torres, R. Mejía de Gutiérrez, F. Puertas. "Effect of kaolin treatment temperature on mortar chloride permeability". *Materiales de Construcción*. Vol. 57. 2007. pp. 61-69.