

## DURABILIDAD DE HORMIGONES CON ARCILLAS CALCINADAS: COMPARACIÓN ENTRE ILLITA Y CAOLINITA DE BAJO GRADO

Gisela Cordoba<sup>1</sup>, Silvina Zito<sup>1</sup>, Ricarda Sposito<sup>2</sup>, Viviana Rahhal<sup>1</sup>, Nancy Beuntner<sup>2</sup>,  
Karl-Christian Thienel<sup>2</sup>, Alejandra Tironi<sup>1</sup>, Edgardo F. Irassar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET),  
Olavarría, Argentina

<sup>2</sup> Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München,  
Neubiberg, Germany

### RESUMEN

---

En este trabajo se compara la durabilidad de hormigones elaborados con cementos que contienen un 25 % reemplazo de arcilla illítica calcinada (HIC) o arcilla caolinítica calcinada (HKC), con respecto al hormigón control ( $a/mc=0,50$ ,  $CUC=350 \text{ kg/m}^3$ ) de cemento portland (HCP). Los hormigones fueron caracterizados por su trabajabilidad, resistencia mecánica y porosidad, y se evaluó la absorción capilar, la penetración de agua, la migración de cloruros y la carbonatación natural (3, 6 y 12 meses). Los resultados muestran que la absorción capilar se reduce con la edad, siendo la del HKC significativamente menor que las de los HCP y HIC. La penetración de agua y el coeficiente de migración de cloruros son mayores para el HIC a 28 días, reduciéndose este último drásticamente a los 90 días (75 %). A los 12 meses, la profundidad de carbonatación es inferior a 5 mm, con un rendimiento ligeramente inferior de HCP y HKC respecto de HCP.

**Palabras claves:** arcillas calcinadas, absorción capilar, penetración de agua, migración de cloruros, carbonatación.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente las arcillas calcinadas son uno de los materiales más estudiados para su uso como material cementicio suplementario (SCM). El metacaolín (MK) es una arcilla caolinítica de alto grado calcinada de elevada actividad puzolánica y su inclusión mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón, debido a la marcada reducción del tamaño de los poros desde temprana edad [1]. Por otra parte, la incorporación de residuos de ladrillos cerámicos [2], cuya composición química es similar a la de las arcillas illíticas calcinadas, permite alcanzar una resistencia superior al mortero de referencia luego de 1 año y reducir el tamaño de poro, debido a la acción puzolánica [3].

La durabilidad del hormigón está vinculada con las propiedades de transporte del hormigón, principalmente por la resistencia a la penetración de los agentes agresivos (cloruros, sulfatos,  $\text{CO}_2$ , etc.) en la masa del hormigón. La capacidad de intercambio del hormigón con el ambiente que lo rodea depende en gran medida de la porosidad del material. La elaboración de un hormigón durable requiere disminuir la porosidad conectada y la permeabilidad [4].

La penetración de cloruros en el hormigón es afectada por la estructura de poros, la cual se puede modificar variando la relación agua/material cementicio, el contenido de

cemento y el tiempo de curado. Para un hormigón de similar porosidad, el ingreso de  $\text{Cl}^-$  depende en gran medida de la porosidad conectada y la tortuosidad de los poros de la pasta de cemento. Una disminución de la primera y un aumento de la segunda tienden a reducir el coeficiente de difusión [4].

Para el cemento portland, la profundidad de carbonatación se incrementa con una tasa decreciente en el tiempo por la formación de calcita luego de la reacción del  $\text{CO}_2$  con el hidróxido de calcio (CH). Por ello, un elevado consumo de CH por los SCM podría conducir a un aumento de la profundidad de carbonatación, especialmente si la permeabilidad del hormigón no se reduce por la reacción puzolánica [5].

En este trabajo se comparan aspectos durables (absorción capilar, penetración del agua, migración de cloruros y carbonatación) de hormigones tradicionales elaborados con cementos que contienen un reemplazo de 25 % en masa por una arcilla illítica calcinada (HIC) y una arcilla caolinítica calcinada (HKC), con respecto al hormigón control (HCP).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los hormigones se elaboraron con cemento portland normal (CPN) y cementos binarios con un 25 % de reemplazo de CPN por arcilla caolinítica calcinada de bajo grado (KCC) o arcilla illítica calcinada (ICC). La composición mineralógica del clínker de CPN, determinada según Bogue, es de 63,6 %  $\text{C}_3\text{S}$ , 15,1 %  $\text{C}_2\text{S}$ , 2,8 %  $\text{C}_3\text{A}$  y 14,3 % de  $\text{C}_4\text{AF}$ . La arcilla illítica fue activada térmicamente a 950 °C y molida; mientras que la arcilla caolinítica de bajo grado fue activada a 750 °C. Las características físicas y mecánicas de los cementos utilizados se informan en la Tabla 1, mientras que su composición química puede encontrarse en un trabajo previo [6].

Con estos cementos, se elaboraron tres hormigones (HCP, HIC y HKC) con un  $\text{CUC}=350 \text{ kg/m}^3$  y  $a/mc=0,50$ , arena silíceo natural ( $\text{MF}=2,35$ ) y piedra granítica triturada (tamaño máximo=16 mm) y se utilizó un aditivo superplastificante a base de policarboxilato (SP) con una proporción de ingredientes activos del 40 % (BASF, Alemania). Las proporciones del hormigón y su asentamiento (IRAM 1536, [7]) y fluidez determinada en la mesa de Graff (IRAM 1690, [8]) se informan en la Tabla 2.

A los 28 y 90 días de curado, los hormigones se caracterizaron por su resistencia a la compresión (IRAM 1546, [9]) y a la tracción (IRAM 1658, [10]) en cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y por su volumen de poros permeables (VPP - ASTM C 642, [11]) en cilindros de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura.

**Tabla 1:** Características de los cementos.

	CPN	ICC	KCC
Superficie específica Blaine, $\text{m}^2/\text{kg}$	370	371	374
Densidad, $\text{kg}/\text{dm}^3$	3,12	3,01	2,98
Distribución de tamaño de partículas, $\mu\text{m}$	$d_{10}$	3,30	3,62
	$d_{50}$	20,51	22,64
	$d_{90}$	54,36	61,80
Demanda de agua, %	26,0	27,0	34,5
Fluidez del mortero, %	131	118	76
Resistencia a compresión a 28 d, MPa	43,2	42,7	44,6

**Tabla 2:** Proporciones de la mezcla, asentamiento y fluidez de los hormigones.

Hormigón	Materiales [kg/m <sup>3</sup> ]					Asentamiento, cm	Fluidez, mm/mm
	Cemento	Agua	Piedra partida	Arena sílicea	Aditivo (#)		
HCP	350	175	1050	807	0,24	7,0	1,73
HIC	350	175	1050	788	0,25	9,7	2,50
HKC	350	175	1050	805	1,13	9,0	2,13

(#) % en kg de cemento

La absorción capilar se determinó de acuerdo con la norma IRAM 1871 [12] en cilindros de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura. Las muestras se curaron en agua hasta los 2, 7, 28 y 90 días. Se determinó velocidad de absorción capilar. De acuerdo con Villagrán, Alderete y De Belie [13], la determinación de la velocidad no presenta un buen ajuste cuando se considera la raíz cuadrada del tiempo. Por lo tanto, estos autores consideran la velocidad de absorción capilar determinada como la recta que mejor se ajusta al agua absorbida por unidad de superficie en función de la raíz cuarta del tiempo ( $t^{0.25}$ ). Con esta modificación se obtiene un ajuste superior a 0,98, siendo inferior para los hormigones más impermeables.

El ensayo de penetración de agua se realizó según la norma DIN EN 12390-8 [14] en cubos de 150 mm curados 28 y 90 días. En esta norma, la presión de agua (500 kPa) es constante durante 72 h, los cubos se rompen y se mide la profundidad de penetración del agua.

El coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario se determinó de acuerdo a la norma NT Build 492 [15] en dos cilindros de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura a los 28 y 90 días. Los cilindros se colocaron en un tubo de PVC y se sellaron los bordes. La parte superior del tubo, por encima del cilindro, se llenó con una solución de KOH 0,2N, que actúa como ánodo. Las celdas se colocaron inclinadas en un recipiente lleno de solución de KOH 0,2N+NaCl 10 %, que actúa como cátodo. El electrodo sumergido en la solución de NaCl se conectó al polo negativo de la fuente de tensión, mientras que el ánodo se conectó al polo positivo; se utilizó una malla metálica como electrodo. Para inducir la migración de los cloruros, se aplicó inicialmente un gradiente de potencial de 30 V a través del cilindro, luego se ajustó en base al valor de la corriente inicial y se determinó la duración del ensayo, de acuerdo a los valores recomendados en la norma NT BUILD 492. Luego de 24 ó 48 h, se retiraron los cilindros de la solución y se cortaron axialmente y se rociaron con una solución de AgNO<sub>3</sub> y se midió la profundidad de penetración de los cloruros [16]. El coeficiente de migración en estado no estacionario,  $D_{nssm}$ , se calculó de acuerdo a la Ec.1, donde  $U$  es el voltaje aplicado,  $T$  el valor medio de las temperaturas inicial y final de la solución KOH,  $L$  el espesor del cilindro,  $x_d$  el promedio de la profundidad de penetración y  $t$  la duración del ensayo.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T) L}{(U - 2) t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

La profundidad de carbonatación se determinó a los 3, 6 y 12 meses de exposición natural en un ambiente rural ([CO<sub>2</sub>] entre 350 y 400 ppm), en prismas de 100 mm de altura y 70 mm de lado. Los prismas fueron curados 7 y 28 días y fueron expuestos con la cara de moldeo y los laterales al aire y la lluvia. La profundidad de carbonatación se determinó en secciones aserradas de los prismas utilizando una solución de fenolftaleína como indicador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Caracterización de los hormigones:** A los 28 días, los hormigones alcanzaron una resistencia a la compresión de 32,4, 28,6 y 37,4 MPa para los HCP, HIC y HKC, respectivamente. La resistencia a la compresión del HIC fue del 91 % con respecto al HCP, mientras que la del HKC excedió a la del HCP en alrededor de un 15 %. Los HCP, HIC y HKC alcanzaron una resistencia a la tracción de 3,4, 2,8 y 3,6 MPa, respectivamente. La resistencia a la tracción de HIC correspondió al 83 % de la del HCP, mientras que la del HKC fue alrededor de 7 % más alta. Tanto los índices de resistencia a la compresión como a la tracción superaron el 75 %, por lo que se confirma el efecto de estimulación y la reacción puzolánica generada por ambas arcillas calcinadas.

A los 90 días, la resistencia a compresión de los HCP, HIC y HKC fue de 41,0, 38,4 y 46,6 MPa, respectivamente. El índice de resistencia a la compresión es de 94 % para el HIC y 114 % para el HKC. La resistencia a la tracción fue de 3,6, 3,4 y 4,1 MPa para los HCP, HIC y HKC, respectivamente. El índice de resistencia a la tracción del HIC fue de 94 % y del HKC de 114 %. Se observa que el índice de resistencia a la compresión de los hormigones es similar a los 28 y 90 días, mientras que el índice de resistencia a la tracción aumenta significativamente entre los 28 y 90 días. Esto se atribuye a la actividad puzolánica de las arcillas, lo que produce un mejoramiento en la adherencia entre los agregados gruesos y el mortero, por la formación de productos de hidratación [17,18].

El volumen de poros permeables a los 28 días fue mayor para los HIC (~7 %) y HKC (~2 %) que para el HCP. Los resultados de porosidad MIP [6] muestran que la pasta con ICC presentó un mayor volumen de poros grandes ( $\geq 0,05 \mu\text{m}$ ) y finos ( $< 0,05 \mu\text{m}$ ), que los de las pastas CPN y con KCC a 28 y 90 días. Además, las pastas con ICC y KCC presentaron un mayor volumen de poros finos que CPN. Los valores indican una mayor porosidad total causada por el mayor volumen de poros finos de los cementos con arcillas calcinadas, el cual se reduce entre 28 y 90 días. El aumento de la porosidad en pastas va acompañado de la reducción del umbral del tamaño de los poros que varía con la reactividad de arcilla calcinada. El umbral del tamaño de los poros de la pasta con KCC fue  $0,07 \mu\text{m}$  a los 28 días y menor que el de la pasta CPN ( $0,09 \mu\text{m}$ ). Mientras que, para la pasta con ICC, fue de  $0,45 \mu\text{m}$  a los 28 días y se alcanzó un valor equivalente a CPN a los 90 días. El aumento del volumen de los poros más finos se atribuye al refinamiento del tamaño de los poros causado por la reacción puzolánica de las arcillas calcinadas. La gran porosidad de la pasta con ICC podría atribuirse al aumento de volumen de los poros más grandes. La presencia de arcillas calcinadas altera la estructura de los poros de la pasta de cemento, aumentando la porosidad total, aunque la distribución de los tamaños de los poros y su conectividad es diferente dependiendo de la arcilla calcinada [19–22].

**Absorción capilar:** La Figura 1 muestra los resultados de absorción capilar a los 2, 7, 28 y 90 días de curado para los hormigones estudiados. La velocidad de absorción capilar disminuyó de 2 a 90 días para todos los hormigones, siendo la del HKC significativamente menor que las de los HCP y HIC. La velocidad de absorción capilar del HIC fue aproximadamente 10 % más baja que la del HCP a 2 días y es más alta a 7 y 28 días (28 % y 13 %, respectivamente). La velocidad de absorción capilar del HKC fue 67% más baja que del HCP a los 2 días, 55% a los 7 días y 61% a los 28 días. A los 90 días, la velocidad de absorción capilar de los tres hormigones es aproximadamente igual, con un valor alrededor de  $80 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,25}$ .

A pesar que el HKC tiene un mayor volumen de poros permeables que el HCP, presenta una velocidad de absorción capilar marcadamente menor. Los excelentes resultados obtenidos para el HKC desde edades tempranas se atribuyen a la desconexión de la porosidad total debido a la reacción puzolánica de la metacaolinita que aparece a edades tempranas reduciendo el tamaño de poros.

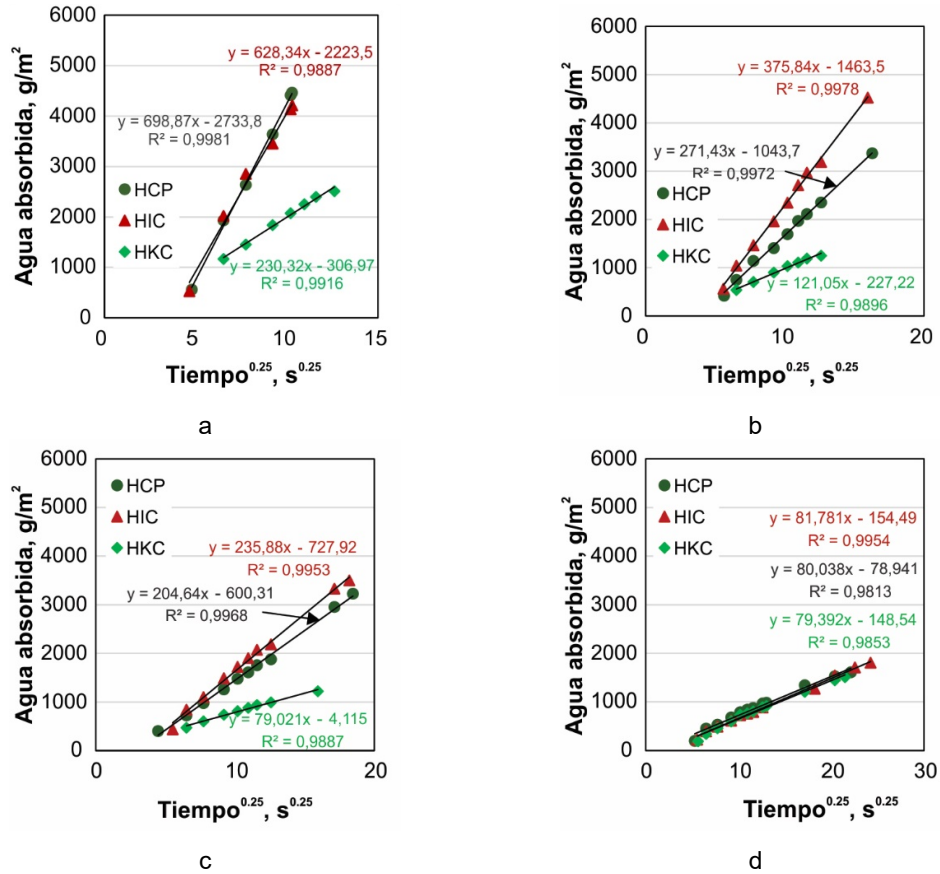


Figura 1: Absorción capilar de agua de los hormigones a a) 2, b) 7, c) 28 y d) 90 días.

El Reglamento CIRSOC 201 [23] establece un valor límite de  $4 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,5}$  para hormigones expuestos en ambientes severos, cuando los datos experimentales se analizan con  $t^{0,5}$ . Villagrán, Alderete y Di Maio [24] proponen un límite de  $127 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0,25}$  como equivalente al límite establecido en el CIRSOC 201 cuando los datos son analizados con  $t^{0,25}$ . De acuerdo con este límite, sólo el HKC curado al menos 7 días y los HCP y HIC curados 90 días cumplirían con la normativa para los hormigones expuestos a ambientes severos.

**Penetración de agua:** En la Tabla 3 se muestran los valores promedio, máximo y mínimo de penetración de agua a los 28 y 90 días. El HIC presenta valores medios de penetración de agua del doble que los que presenta HCP; mientras que la del HKC fue un 43 % menor que la del HCP. Entre los 28 y 90 días, el valor de penetración media de agua del HIC se redujo ~94 %. La reducción en los valores de penetración de agua del HKC entre los 28 y 90 días es ~90%, y para el HCP de ~94%.

Tabla 3: Penetración de agua a presión de los hormigones a 28 y 90 días.

		Hormigón			
		HCP	HIC	HKC	
Penetración, mm	28 días	Media	19,5	39,4	11,1
		Máxima	26,0	52,6	15,8
		Mínima	12,0	26,5	6,0
	90 días	Media	1,1	2,4	1,2
		Máxima	1,4	3,3	1,3
		Mínima	0,8	1,0	1,1

**Migración de cloruros:** En la Figura 2 se muestra el coeficiente de migración de cloruros de los HCP, HIC y HKC curados durante 28 y 90 días. A los 28 días, el HIC presentó el mayor coeficiente ( $21,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), siendo alrededor de 68 % mayor que el de HCP ( $12,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), mientras que HKC presentó el menor coeficiente ( $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), alrededor del 88 % menor que el del HCP. A los 90 días, el coeficiente de migración de cloruros del HIC fue 75 % menor que a los 28 días ( $5,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), siendo menor que el del HCP ( $8,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ). El coeficiente de migración de HKC prácticamente no disminuye entre los 28 y 90 días ( $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Los resultados muestran que el HKC presenta un excelente comportamiento ante la migración desde los 28 días, mientras que el HIC presenta un buen rendimiento sólo si se lo somete a un curado prolongado. El comportamiento de los hormigones ante la migración de cloruros está relacionado con la porosidad de la matriz cementicia y con la capacidad para fijar los cloruros, ya sea en las fases AFm o en el C-S-H, o por combinación a través de la formación de sal de Friedel, aunque, por las características del ensayo, la capacidad de fijar cloruros se vea reducida [6, 16, 25, 26]. Por lo tanto, se atribuye el comportamiento regular del HIC a los 28 días a la elevada porosidad, y el marcado mejoramiento a los 90 días al efecto conjunto de la disminución de la porosidad y fijación de cloruros en la masa del hormigón [25]. El excelente comportamiento del HKC se atribuye a la baja porosidad desde los 28 días [27] y a la fijación de cloruros en la masa del hormigón [25]. Por el corto tiempo de ensayo, se incurre que los cloruros se fijan en las fases AFm presentes en la pasta de cemento o en el C-S-H.

**Carbonatación:** La Figura 3 muestra la profundidad media de carbonatación de los HCP, HIC y HKC curados en agua 7 y 28 días de la cara de moldeo y las dos caras laterales del prisma. De los hormigones curados 7 días, HCP presentó la menor profundidad media de carbonatación, siendo de 0,7, 0,9 y 1,8 mm a los 3, 6 y 12 meses de exposición. El HIC presentó la mayor profundidad de carbonatación (1,7 mm) a los 3 meses; a los 6 meses fue prácticamente igual la de los HIC y HKC (1,9 mm); y a los 12 meses, la del HKC fue ligeramente mayor (3,9 mm) que la del HIC (3,5 mm).

De los hormigones curados 28 días, el HCP presentó una profundidad de carbonatación ligeramente menor que el curado 7 días (0,4, 0,8 y 1,1 mm a los 3, 6 y 12 meses, respectivamente). El HKC presentó la mayor profundidad de carbonatación a los 3 meses (1,4 mm). La del HIC superó a la de los HCP y HKC a los 6 y 12 meses (2,2 y 3,2 mm, respectivamente). Por lo tanto, la presencia de arcillas calcinadas disminuye la resistencia a la carbonatación tanto para un buen curado (7 días) como para un curado adecuado (28 días). Esto se debe a que la sustitución del cemento por arcillas calcinadas aumenta la porosidad del hormigón y reduce la disponibilidad de CH, acelerando el proceso de carbonatación, ya que reduce la formación de calcita, que bloquea la red de poros, y disminuye la velocidad de difusión de los gases agresivos.

El comportamiento de los hormigones ante la carbonatación está influenciado por la porosidad conectada y por la disponibilidad de CH [26], esto último especialmente para cementos que contengan adiciones muy reactivas, como el MK. EL HIC presentó a los 28 días una mayor porosidad y absorción capilar, lo que indica que los poros están conectados, permitiendo el ingreso de  $\text{CO}_2$  y favoreciendo la formación de calcita. El HKC presentó una muy baja absorción capilar por lo que los poros no están bien conectados, y una disminución del CH debido a la reacción puzolánica a edades tempranas de la arcilla calcinada, lo que permite la entrada de  $\text{CO}_2$  con reducida formación de calcita. Al ingresar el  $\text{CO}_2$ , aunque la red de poros sea tortuosa, puede ser atravesada por el gas. Por otro lado, a pesar de que los HIC y HKC no tienen tan buen rendimiento ante la carbonatación como el HCP, éste sigue siendo aceptable, ya que no supera los 5 mm.

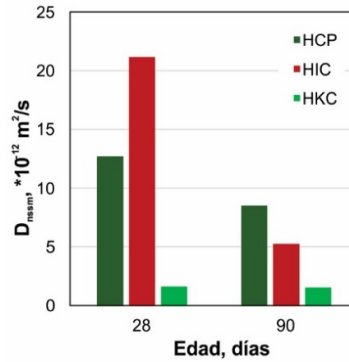


Figura 2: Coeficiente de migración de cloruros de los hormigones curados 28 y 90 días

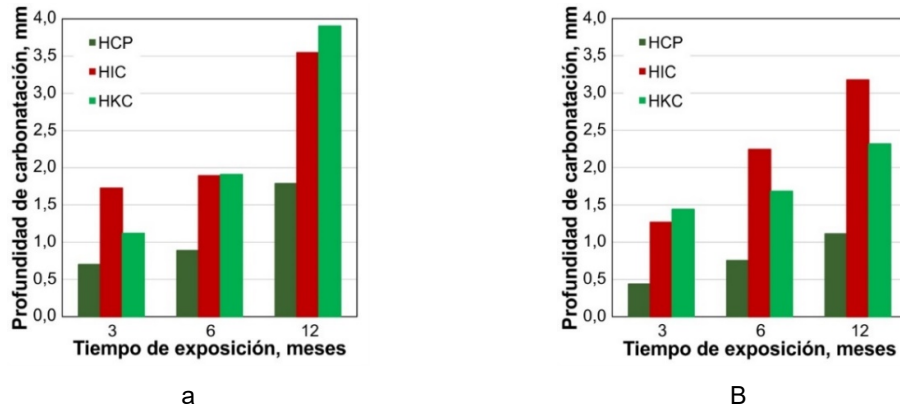


Figura 3: Profundidad de carbonatación a los 3, 6 y 12 meses de exposición de los hormigones curados a) 7 días y b) 28 días.

## CONCLUSIONES

- El tipo de arcilla calcinada utilizado influye en la porosidad del hormigón produciendo modificaciones en el comportamiento mecánico y durable.
- Los hormigones elaborados con un 25 % de reemplazo de cemento portland normal por arcilla illítica y caolinítica calcinadas presentan un buen desarrollo de la resistencia a tracción y compresión, siendo más rápido para la arcilla caolinítica que para la illítica.
- HIC tiene un rendimiento deficiente frente a la absorción capilar, la penetración de agua y la resistencia a la migración de cloruros cuando se cura 28 días, y aceptable cuando se cura 90 días. Esto se atribuye a que la ICC muestra actividad puzolánica después de 28 días. El rendimiento ante la carbonatación es aceptable.
- El HKC tiene un rendimiento excelente frente a la absorción capilar, la penetración de agua y la resistencia a la migración de cloruros, tanto a 28 como 90 días de curado, y presenta un rendimiento aceptable ante la carbonatación.

Por lo tanto, se concluye que es posible diseñar hormigones convencionales con arcillas calcinadas con un aceptable rendimiento mecánico y durable frente a la penetración de agentes agresivos para las armaduras, atendiendo a la relación a/mc y al curado.

## REFERENCIAS

- [1] Paiva H, Silva AS, Velosa A, Cachim P, Ferreira VM, "Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete", *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 374–384.
- [2] Toledo Filho RD, Gonçalves JP, Americano BB, Fairbairn EMR, "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil", *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1357–1365.
- [3] Wild S, Khatib JM, O'Farrell M, "Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures", *Cem. Concr. Res.* 27 (1997) 697–709.
- [4] Cyr M, Influence of supplementary cementitious materials (SCMs) on concrete durability, in: *Eco-Efficient Concr.*, Elsevier, (2013) 153–197.
- [5] Bucher R, Cyr M, Escadeillas G, "Carbonation of blended binders containing metakaolin", *RILEM Bookseries.* 10 (2015) 27–33.
- [6] Córdoba GP, Zito SV, Sposito R, Rahhal VF, Tironi A, Thienel C, Irassar EF, "Concretes with Calcined Clay and Calcined Shale: Workability, Mechanical, and Transport Properties", *J. Mater. Civ. Eng.* 32 (2020) 04020224.
- [7] IRAM 1536:1978. "Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono".
- [8] IRAM 1690:1986. "Método de ensayo de la consistencia utilizando la mesa de Graf".
- [9] IRAM 1546:1992. "Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión".
- [10] IRAM 1658:1995. "Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral".
- [11] ASTM C642:2013. "Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
- [12] IRAM 1871:2004. "Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido".
- [13] Villagrán Zaccardi Y, Alderete NM, De Belie N, "Improved model for capillary absorption in cementitious materials: Progress over the fourth root of time", *Cem. Concr. Res.* 100 (2017) 153–165.
- [14] DIN EN 12390-8:2019. "Hardened concrete: Depth of penetration of water under pressure".
- [15] Nortest Method NT Build, Accelerated Chloride Penetration, Hardened Concr. 443 (1995).
- [16] Noushini A, Castel A, Aldred J, Rawal A, "Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymers concrete", *Cem. Concr. Compos.* 105 (2020) 103290.
- [17] Baji H, Li CQ, "An analytical solution for hydraulic conductivity of concrete considering properties of the Interfacial Transition Zone (ITZ)", *Cem. Concr. Compos.* 91 (2018) 1–10.
- [18] Scrivener KL, Nematí KM, "The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete", *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 35–40.
- [19] Khatib JM, Wild S, "Pore size distribution of metakaolin paste", *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 1545–1553.
- [20] Frías M, Cabrera J, "Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes", *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 561–569.
- [21] Tironi A, Castellano CC, Bonavetti VL, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF, "Kaolinitic calcined clays - Portland cement system: Hydration and properties", *Constr. Build. Mater.* 64 (2014) 215–221.
- [22] Beuntner N, "On the suitability and effectiveness of calcined clays as reactive binder components in cement", Tesis doctoral, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Alemania, (2017).
- [23] INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial), CIRSOC 201 Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, (2005).
- [24] Villagrán Zaccardi Y, Alderete N, Di Maio Á, "La ganancia de peso por absorción capilar evoluciona linealmente con la raíz cuadrada del tiempo", en *Memorias de VII Congreso Internacional, 22° Reunión Técnica AATH, Olavarría, 6-9 Noviembre 2018.*
- [25] Loser R, Lothenbach B, Leemann A, Tuchschnid M, "Chloride resistance of concrete and its binding capacity - Comparison between experimental results and thermodynamic modeling", *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 34–42.
- [26] Shi Z, Geiker M.R, De Weerd T, Lothenbach B, Kaufmann J, Kunther W, Ferreira S, Herfort D, Skibsted J, "Durability of portland cement blends including calcined clay and limestone: Interactions with sulfate, chloride and carbonate ions", *RILEM Bookseries.* 10 (2015) 133–141.
- [27] Dhandapani Y, Sakthivel T, Santhanam M, Gettu R, Pillai RG, "Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3)", *Cem. Concr. Res.* 107 (2018) 136–151.