

## Evaluación integral de la durabilidad y sostenibilidad de hormigones con arcilla illítica calcinada y material calcáreo

G. Córdoba<sup>a</sup>, L. Montani<sup>a</sup>, C. Castellano<sup>a</sup>, H. Donza<sup>a</sup>, E. F. Irassar<sup>a</sup>, V. Bonavetti<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN) – (CONICET-CICPBA-UNCPBA), CP B7400JWI, Olavarría, Argentina, [gcordova@fio.unicen.edu.ar](mailto:gcordova@fio.unicen.edu.ar), [lumontani2@gmail.com](mailto:lumontani2@gmail.com), [ccastellano@fio.unicen.edu.ar](mailto:ccastellano@fio.unicen.edu.ar), [hdonza@fio.unicen.edu.ar](mailto:hdonza@fio.unicen.edu.ar), [firassar@fio.unicen.edu.ar](mailto:firassar@fio.unicen.edu.ar), [vbonavet@fio.unicen.edu.ar](mailto:vbonavet@fio.unicen.edu.ar)

Recibido: 14 de noviembre de 2024

Aceptado: 10 de febrero de 2025

### RESUMEN

En este trabajo se estudian las propiedades durables de hormigones con relación agua/material cementante de 0,40 a 0,60 elaborados con cementos ternarios con arcilla illítica calcinada y filler calcáreo. Sobre estos hormigones se evaluaron: la permeabilidad al agua a través de la succión capilar y la penetración de agua a presión; y los coeficientes de carbonatación natural y de migración de cloruros. Además, se evaluó la resistencia a los sulfatos en morteros. Complementariamente, se analizó la sustentabilidad de los hormigones considerando parámetros de durabilidad. Los resultados indican que los hormigones realizados con cementos ternarios con alto contenido de filler calcáreo presentan mayores valores de permeabilidad al agua, y de coeficientes de carbonatación y de migración de cloruros, y que la resistencia a los sulfatos aumenta con el incremento de arcilla illítica calcinada en el cemento ternario. Finalmente, los hormigones más sostenibles son aquellos que reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por m<sup>3</sup> de hormigón y la presencia de filler y arcilla illítica calcinada no afectan negativamente la durabilidad.

**PALABRAS CLAVE:** Arcilla illítica calcinada, filler calcáreo, parámetros durables, sostenibilidad

### ABSTRACT

In this paper, the durability of concretes made with a water-to-cementitious material ratio of 0.40 to 0.60 and blended ternary cements with calcined illitic clay and calcareous filler are studied. The water permeability through sorptivity and water penetration under pressure, carbonation and chloride migration coefficients were assessed. Additionally, the sulfate resistance was evaluated on mortars. Complementary, the sustainability of the concretes was evaluated considering durability parameters. The results indicate that concretes made with blended ternary cements with high limestone filler content have higher values of water permeability, carbonation and chloride migration coefficients, and that sulfate resistance increases with the increase of calcined clay in the blended ternary cement. Finally, the most sustainable concretes are those that reduce CO<sub>2</sub> equivalent emissions per m<sup>3</sup> of concrete and the presence of calcined illitic clay and limestone filler does not negatively affect durability.

**KEYWORDS:** Calcined illitic clay, limestone filler, durability, sustainability

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Córdoba, G., Montani, L., Castellano, C., Donza, H., Irassar, E. F., y Bonavetti, V. (2025). Evaluación integral de la durabilidad y sostenibilidad de hormigones con arcilla illítica calcinada y material calcáreo. *Revista Hormigón*, 67, 17–34. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/w2cnubfkm>

## 1. Introducción

La vida útil de las estructuras depende en gran medida de la calidad del hormigón colocado y curado en obra. El correcto diseño de este material implica que, además de alcanzar la trabajabilidad y la resistencia especificada, debe tener bajos parámetros de transporte de agua y gases para prevenir el ingreso de sustancias agresivas a su interior.

La incorporación de materiales cementíceos suplementarios (MCS) en la formulación de cementos compuestos generalmente aceleran el proceso de hidratación del clinker portland debido al efecto de estimulación, produciendo un mayor volumen de silicato de calcio hidratado (C-S-H) en las primeras edades. A edades más avanzadas, la reactividad de los MCS modifica la relación agua/ cemento (a/c) efectiva, la cantidad y tipos de productos de hidratación, como así también la distribución y el tamaño de poros del sistema [1-3].

La durabilidad de las estructuras es gobernada por la permeabilidad y la alcalinidad del hormigón de recubrimiento. Los ensayos más usados para medir la permeabilidad son la succión capilar (IRAM 1871), la penetración de agua a presión (IRAM 1554) y la conectividad de los poros a través de la resistividad eléctrica (UNE 83988-14).

La carbonatación tiene una tasa decreciente en el tiempo por la precipitación de calcita en la red de poros, producto de la reacción del CO<sub>2</sub> con el hidróxido de calcio (CH) de la pasta de cemento. Pero, si durante la hidratación de los MCS se produce un elevado consumo de CH, la tasa de carbonatación puede aumentar a largo plazo, especialmente cuando la reacción puzolánica no disminuye la permeabilidad del hormigón [4].

La penetración de cloruros es afectada por la estructura de poros, que depende de la relación agua/material cementante (a/mc), el contenido y composición del cemento, el tipo

y contenido de MCS incorporado y el tiempo de curado húmedo. Este parámetro tiende a aumentar con el incremento de la porosidad conectada y la disminución de la tortuosidad de los poros de la pasta de cemento [5]. Sin embargo, dependiendo de la composición del cemento es posible reducir la penetración de cloruros, mediante la formación de sal de Friedel (unión química) o por adsorción en las fases hidratadas del cemento (unión física) [6].

Por otro lado, el consumo del CH para generar C-S-H aumenta la resistencia al ataque por sulfatos de los sistemas cementíceos debido a que el aumento de la tortuosidad de la estructura de poros y la disminución del volumen de poros capilares grandes reduce el ingreso de iones agresivos [7,8], y simultáneamente limita la formación de ettringita y yeso, y la expansión posterior [9].

El impacto ambiental de la producción y uso del cemento y del hormigón normalmente se evalúa en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento o m<sup>3</sup> de hormigón, sin tener en cuenta muchas veces los parámetros de desempeño (resistencia y durabilidad). Una menor durabilidad de las estructuras conduce a mayores costos de mantenimiento [10,11] y/o a una disminución de su vida útil provocando un aumento en el consumo de materiales y de energía necesarios para su renovación o reconstrucción y en la generación de residuos de construcción y demolición [12,13]. En consecuencia, para realizar una evaluación integral es necesario incorporar parámetros de desempeño en los índices de sostenibilidad.

En este trabajo se evalúa la permeabilidad al agua, la carbonatación y el coeficiente de migración de cloruros de hormigones elaborados con cementos ternarios compuestos por arcilla illítica calcinada y filler calcáreo, y complementariamente la resistencia a los sulfatos en morteros elaborados con cementos ternarios de igual

porcentaje de reemplazo. Finalmente, se evalúa la sostenibilidad considerando parámetros durables (coeficiente de carbonatación y migración de cloruros) a través del cálculo de la apatía propuesta por Gettu et al. [14].

## 2. Materiales y procedimientos de ensayos

Para el programa de ensayos se utilizó un cemento portland normal (CPN, IRAM 50000), un cemento portland compuesto con filler calcáreo (FC) y arcilla illítica calcinada (AC) (CPC, IRAM 50000) y un cemento portland normal altamente resistente a los sulfatos (CPN ARS, IRAM 50001); todos de clase resistente CP40. La curva granulométrica obtenida por granulometría láser (Malvern MasterSizer 2000) mostró una distribución unimodal para el cemento CPN con moda en 37,2  $\mu\text{m}$  y unimodal (moda: 24,6  $\mu\text{m}$ ) con un hombro entre 4,1  $\mu\text{m}$  - 6,2  $\mu\text{m}$  para el cemento CPC. La curva correspondiente al cemento CPN ARS fue bimodal con modas en 6,2  $\mu\text{m}$  y 56,4  $\mu\text{m}$  (Figura 1a). La Tabla 1 muestra la composición química determinada por fluorescencia de rayos X (XRF) y las propiedades evaluadas de los cementos.

Para la determinación de los parámetros de permeabilidad al agua, resistividad eléctrica, coeficiente de carbonatación y de migración de cloruros en los hormigones, al CPN se le incorporó en peso FC y (AC) [15].

El filler calcáreo estaba constituido por un 87 % de calcita determinada por medio de la pérdida por calcinación (PPC: 38,71 %) y su principal impureza fue cuarzo. Su distribución de tamaños de partículas fue bimodal con modas en 4,7  $\mu\text{m}$  y 112,5  $\mu\text{m}$  (Figura 1b).

La Figura 2 presenta el difractograma de la arcilla illítica calcinada, obtenido con un equipo Phillips PW 3710 X'Pert con ánodo de Cu operando a 40 kV y 20 mA en modo continuo de 5 a 40° 2 $\theta$ . El estudio mostró que la arcilla illítica calcinada estaba compuesta por cuarzo (Q), reflexiones de illita deshidroxilada (I) y hematita (H). El contenido de material amorfo fue ~ 60 % al ser cuantificado por Rietveld utilizando 10 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como patrón interno. Su distribución de tamaños de partículas fue bimodal con modas en 3,1  $\mu\text{m}$  y 32,4  $\mu\text{m}$  (Figura 1b). El índice de actividad puzolánica a los 28 y 90 días (EN 450-1) fue 96 % y 105 %, respectivamente.

El agregado grueso utilizado fue piedra partida granítica con tamaño máximo de 19 mm (MF: 6,97) y arena silícea (MF: 2,02) para los hormigones elaborados con cementos con CPN, AC y FC [15], mientras que para los elaborados con cemento compuesto se emplearon: una mezcla 20:80 de piedra partida granítica 6-12 (MF: 5,85) y 6-20 (MF: 6,98) y, como agregado fino, una mezcla 60:40 de arena silícea fina (MF: 1,25) y gruesa (MF: 2,27) [16].

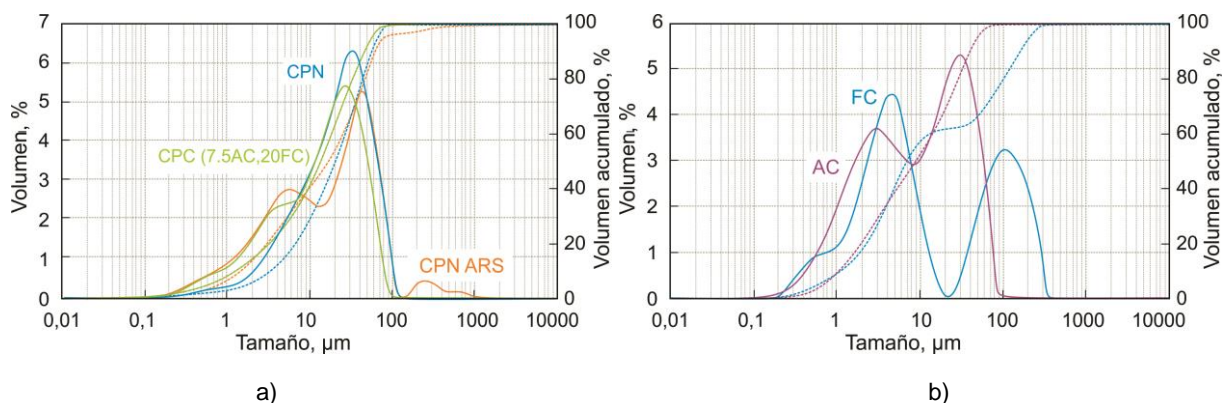
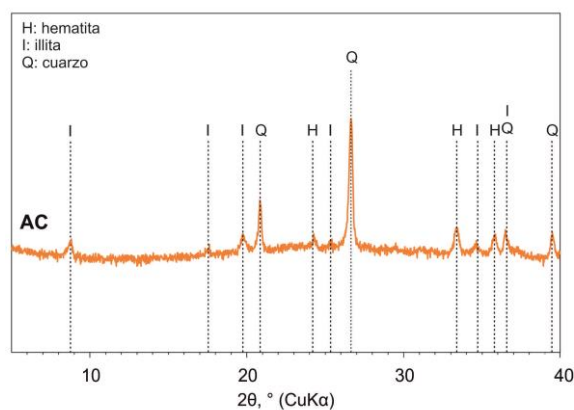


Figura 1. Distribución de partículas. a) Cementos portland estudiados y b) MCS.

**Tabla 1.** Composición química y propiedades de los cementos y los MCS.

| Muestras   |                        | CPN   | CPC   | CPN ARS | AC    | FC    |
|--|------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| <b>Composición química, %</b>                      |                        |       |       |         |       |       |
| CaO  |                        | 61,88 | 55,64 | 63,28   | 0,3   | 49,20 |
| SiO <sub>2</sub>                                   |                        | 20,58 | 21,08 | 21,08   | 66,3  | 9,07  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     |                        | 4,24  | 4,06  | 3,87    | 16,3  | 1,09  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     |                        | 4,36  | 3,31  | 3,66    | 9,2   | 0,63  |
| MgO  |                        | 0,62  | 1,21  | 0,71    | 1,5   | <0,01 |
| SO <sub>3</sub>                                    |                        | 2,41  | 2,34  | 2,73    | <0,01 | 0,12  |
| K <sub>2</sub> O                                   |                        | 1,17  | 1,13  | 1,16    | 5,6   | 0,30  |
| Na <sub>2</sub> O                                  |                        | 0,05  | 0,30  | 0,10    | 0,08  | 0,02  |
| LOI  |                        | 2,98  | 8,98  | 3,11    | 0,40  | 38,71 |
| Álcalis totales (Na <sub>2</sub> O) <sub>eq</sub>  |                        | 0,82  | 1,04  | 0,86    | 3,76  | 0,22  |
| <b>Propiedades físicas y mecánicas</b>             |                        |       |       |         |       |       |
| Densidad, g/cm <sup>3</sup>                        |                        | 3,13  | ---   | 3,09    | 2,63  | 2,69  |
| Retenido sobre tamiz IRAM, %                       | 75 µm                  | 7,7   | 1,0   | 3,2     | 3,9   | 16,5  |
|  | 45 µm                  | 16,4  | ---   | 16,6    | 9,3   | 28,3  |
| Distribución de tamaño de partículas, µm (*)       | <i>d</i> <sub>10</sub> | 2,0   | 1,8   | 1,8     | 1,2   | 1,3   |
|  | <i>d</i> <sub>50</sub> | 20,7  | 15,5  | 18,3    | 9,6   | 6,8   |
|  | <i>d</i> <sub>90</sub> | 85,8  | 46,5  | 67,2    | 43,2  | 161,2 |
| Superficie específica (Blaine), m <sup>2</sup> /kg |                        | 314   | 393   | 332     | 640   | 464   |
| Resistencia a compresión, MPa                      | 2 días                 | 20,8  | 24,7  | 24,6    | ---   | ---   |
|  | 28 días                | 45,8  | 49,3  | 43,9    | ---   | ---   |

(\*) Tamaños de partículas por debajo del cual queda el 10 %, 50 % y 90 % del volumen de la muestra.

**Figura 2.** Difractograma de rayos X de la arcilla illítica calcinada.

Para la evaluación de la resistencia a los sulfatos, se elaboraron morteros con cemento CPN ARS, FC, AC y arena Ottawa (ASTM C778). La composición mineralógica del cemento fue: 58 % de C<sub>3</sub>S, 16 % de C<sub>2</sub>S, 4 % de C<sub>3</sub>A y 11 % de C<sub>4</sub>AF.

### 2.1 Cementos estudiados

La composición de los cementos empleados en la elaboración de los hormigones y morteros en cada uno de los ensayos se muestran en la Tabla 2, utilizando en todos los casos 35 % de reemplazo de cemento portland por arcilla illítica calcinada y filler calcáreo.

### 2.2 Proporciones de los hormigones y morteros

Se prepararon cuatro hormigones con 350 kg/m<sup>3</sup> de material cementante (mc), relación a/mc de 0,45 y relación agregado fino/agregado total de 43 % [15]. Además, se prepararon tres hormigones con: 410 kg/m<sup>3</sup> de cemento CPC (7.5AC, 20FC) y relación a/mc 0,40; 330 kg/m<sup>3</sup> de CPC y relación a/mc 0,50; y 270 kg/m<sup>3</sup> de CPC y relación a/mc 0,60 [16]. Las proporciones de los diferentes hormigones se presentan en la Tabla 3.

Los morteros se realizaron con una relación arena/mc: 2,75 y la relación a/mc necesaria para alcanzar una fluidez similar a la

**Tabla 2.** Cementos estudiados.

| Succión capilar   | Resistividad eléctrica | Penetración de agua a presión. Coeficiente de carbonatación y de migración de cloruros | Resistencia a los sulfatos |
|-------------------|------------------------|--|----------------------------|
| CPN               | ---                    | CPN  | CPN ARS                    |
| CPN+17.5AC+17.5FC | CPN+17.5AC+17.5FC      | CPN+17.5AC+17.5FC  | CPN ARS+15AC+20FC          |
| CPN+25AC+10FC     | CPN+25AC+10FC          | CPN+25AC+10FC  | CPN ARS+30AC+5FC           |
| CPN+10AC+25FC     | CPN+10AC+25FC          | CPN+10AC+25FC  | ---                        |
| ---               | ---                    | CPC (7.5AC,20FC)   | ---                        |

**Tabla 3.** Proporciones de los hormigones estudiados.

| Hormigón          | Proporciones del hormigón, kg/m <sup>3</sup> |     |                            |                 |                  |             |               |                 |
|-------------------|--|-----|----------------------------|-----------------|------------------|-------------|---------------|-----------------|
|                   | Agua   | CPN | Arcilla illítica calcinada | Filler calcáreo | CPC (7.5AC,20FC) | Aditivo (*) | Agregado fino | Agregado grueso |
| CPN               | 158  | 280 | 35                         | 35              | ---              | 3,5         | 810           | 1075            |
| CPN+17.5AC+17.5FC | 158  | 228 | 61                         | 61              | ---              | 3,5         | 802           | 1075            |
| CPN+25AC+10FC     | 158  | 228 | 88                         | 35              | ---              | 3,5         | 801           | 1075            |
| CPN+10AC+25FC     | 158  | 228 | 35                         | 88              | ---              | 3,5         | 803           | 1075            |
| a/mc: 0,40        | 165  | --- | ---                        | ---             | 410              | 0,6         | 746           | 1075            |
| CPC a/mc: 0,50    | 165  | --- | ---                        | ---             | 330              | 0,5         | 816           | 1075            |
| a/mc: 0,60        | 162  | --- | ---                        | ---             | 270              | 0,8         | 873           | 1075            |

\*porcentaje en peso del material cementante

registrada por el mortero con CPN ARS (37,2 %). Las relaciones a/mc resultantes fueron: 0,485, 0,465 y 0,460, para los morteros con CPN ARS, CPN ARS+30AC+5FC y CPN ARS+15AC+20FC, respectivamente.

### 2.3 Ensayos realizados

Los hormigones se caracterizaron por el asentamiento (IRAM 1536), la fluidez en la mesa de Graff (IRAM 1690) y la exudación (IRAM 1604). La resistencia a compresión fue evaluada en probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm (IRAM 1546) curadas 24 horas en moldes, encabezadas con mortero de cemento y luego sumergidas en agua saturada con cal a  $20 \pm 2$  °C. Las propiedades durables que se estudiaron, el tiempo de curado y las edades de ensayo se resumen en la Tabla 4.

### 2.4 Indicadores de sostenibilidad relacionados con parámetros durables

Gettu et al. [14] han propuesto el cálculo de índices de Apatía (*A*) como indicadores de la sostenibilidad del hormigón. Los índices *A* combinan las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (ECO<sub>2eq</sub>) por m<sup>3</sup> de hormigón con un parámetro de durabilidad del material. Un índice *A* más alto, indica "apatía" a la sostenibilidad [14].

La vida útil de la armadura queda definida por el inicio de la corrosión y depende de la velocidad de avance del frente de cloruros y/o de la carbonatación dentro del hormigón. En función de estas consideraciones se definen dos factores que representan la resistencia del hormigón al ingreso de cloruros ( $F_{cloruro}$ , 1) y a la carbonatación ( $F_{carb}$ , 2).

$$F_{cloruro} = \exp\left(\frac{10^{-6}}{\sqrt{D_{cl}t}}\right) \quad (1)$$

**Tabla 4.** Ensayos realizados y tipos de curados.

| Ensayo                   | Succión capilar   | Resistividad eléctrica  | Penetración de agua a presión | Coefficiente de migración de cloruros   | Coefficiente de carbonatación natural | Resistencia a los sulfatos                           |
|--------------------------|---|-------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Norma                    | IRAM 1871/21  | UNE 83988-14            | IRAM 1554/83                  | NT Build 492/95   | (1)                                   | ASTM C1012   |
| Tipo de probeta (cm)     | Cilíndrica 10 x 5   | Prismáticas 7 x 15 x 15 | Prismáticas 15 x 15 x 15      | Cilíndricas 10 x 5  | Prismática 7,5 x 7,5 x 25             | Prismática 2,5 x 2,5 x 28,5                          |
| Curado                   | Curado húmedo: inmersión en agua saturada con cal a $20 \pm 2$ °C hasta la edad de ensayo |                         |                               | Curado húmedo: inmersión en agua saturada con cal a $20 \pm 2$ °C hasta la edad de ensayo | 7 y 28 días de curado húmedo          | Curado 24 h a 38 °C y luego en agua hasta 20 MPa (2) |
| Edad de ensayo           | 28 y 90 días  | 28 días                 | 3 años                        | 28 y 90 días  | 36 meses                              | Medición hasta 2 años                                |
| Determinaciones por edad | 3   | 3                       | 2                             | 2   | 14 puntos sobre cara de moldeo        | 4  |

(1) La cara de moldeo y los laterales de los prismas fueron expuestos al aire y la lluvia en un ambiente rural ([CO<sub>2</sub>] entre 350 ppm y 400 ppm). La profundidad de carbonatación se determinó utilizando una solución de fenoltaleína como indicador. Se calculó el coeficiente de carbonatación como  $k_c = d_c / t^{0.5}$ , donde  $d_c$  es la profundidad de carbonatación y  $t$  el tiempo.

(2) A continuación fueron sumergidas en una solución conteniendo Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5 %) que se renovó en cada medición por un período de dos años.

$$F_{carb} = \left(\frac{5}{k_c}\right)^2 \quad (2)$$

donde  $D_{cl}$  y  $k_c$  son los coeficientes de difusión de cloruros y de carbonatación, respectivamente.  $D_{cl}$  se estimó a partir del coeficiente de migración de cloruros ( $D_{nssm}$ ), utilizando la ecuación (3), propuesto en el Boletín 34 de la Federación Internacional del Hormigón (*fib*) [17].

$$D_{cl} = k_a * D_{nssm} \quad (3)$$

$k_a$  es la variable de transferencia ambiental, determinada utilizando la ecuación (4), donde  $T_{ref} = 293,15$  K es la temperatura estándar y  $T_{real}$  [K] es la temperatura ambiente.

$$k_a = \exp\left(4800 * \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right]\right) \quad (4)$$

Finalmente, los índices A para la exposición a cloruros ( $A_{icloruro}$ ) y a la carbonatación ( $A_{icarb}$ ) se obtienen con las ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

$$A_{icloruro} = \frac{ECO_{2eq} \text{ por } m^3 \text{ de hormigón}}{F_{cloruro}} \quad (5)$$

$$A_{icarb} = \frac{ECO_{2eq} \text{ por } m^3 \text{ de hormigón}}{F_{carb}} \quad (6)$$

Los valores de  $ECO_{2eq}$  por tonelada de los materiales componentes del hormigón adoptados para la determinación de los índices A se presentan en la Tabla 5. Los valores se estimaron realizando un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) “de la cuna a la puerta”, de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044. Los detalles sobre la realización del ACV pueden encontrarse en Cordoba et al. [18].

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Caracterización

Los resultados obtenidos de la caracterización de los hormigones estudiados se muestran en la Tabla 6. Todos presentaron una trabajabilidad adecuada, con muy buena

**Tabla 5.** Emisiones de  $CO_2$  equivalente de los materiales componentes del hormigón.

| Material                       | $ECO_{2eq}$ ,<br>kg $CO_{2eq}/t$ |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Cemento Portland Normal (1)    | 689                              |
| Agregado grueso de trituración | 46                               |
| Agregado fino de río (2)       | 14                               |
| Arcilla illítica calcinada     | 258                              |
| Filler calcáreo (3)            | 35                               |
| Agua de red (4)                | 9                                |

(1) Valor calculado a partir del informe de sostenibilidad de la Asociación de Fabricantes de Cemento Portland [19]. (2), (3) y (4) Valores tomados de [20], [21] y [22], respectivamente.

cohesión, excelente terminación y una velocidad de exudación menor al límite establecido ( $100 * 10^{-6}$  cm/s) en el Reglamento CIRSOC 201/05.

Los hormigones elaborados con 35 % de MCS con CPN, AC y FC alcanzaron a los 28 días una resistencia de  $31,0 \pm 1,2$  MPa [15], mientras que el valor registrado por el hormigón CPN fue de 36,7 MPa. Por su parte el hormigón elaborado con CPC (7.5AC,20FC), presentó resistencias a esta edad de 47,1 MPa, 38,5 MPa y 28,0 MPa para las relaciones a/mc de 0,40, 0,50 y 0,60, respectivamente [16].

#### 3.2 Permeabilidad al agua

La Tabla 7 informa la capacidad y el coeficiente de succión capilar estimado ( $S_{0,5m}$ ), mientras que la Figura 3 muestra la pendiente de la recta obtenida por mínimos cuadrados empleada en el cálculo del coeficiente de succión capilar ( $S_{0,25}$ ) a 28 y 90 días.

A 28 días, de los hormigones con 35 % de MCS, CPN+25AC+10FC es el que alcanza la menor capacidad de succión, siendo este valor 16 % mayor al registrado por el hormigón CPN; mientras que el hormigón CPN+10AC+25FC es el que presenta los

**Tabla 6.** Propiedades de los hormigones.

| Hormigón          | Asentamiento,<br>mm | Fluidez,<br>cm | Exudación |                    | Resistencia a<br>compresión, MPa |       |       |
|-------------------|---------------------|----------------|-----------|--------------------|----------------------------------|-------|-------|
|                   |                     |                | Tipo      | Velocidad,<br>m/s  | 2 d.                             | 28 d. | 90 d. |
| CPN               | 80                  | 33             | NA        | ---                | 15,2                             | 36,7  | 41,5  |
| CPN+17.5AC+17.5FC | 140                 | 40             | NA        | ---                | 10,5                             | 31,5  | 33,8  |
| CPN+25AC+10FC     | 110                 | 38             | NA        | ---                | 12,4                             | 32,2  | 40,4  |
| CPN+10AC+25FC     | 120                 | 37             | NA        | ---                | 11,7                             | 29,3  | 31,2  |
|                   | a/mc: 0,40          | 100            | NA        | ---                | 24,8                             | 47,1  | 54,4  |
| CPC (7.5AC, 20FC) | a/mc: 0,50          | 80             | Uniforme  | $10 \cdot 10^{-6}$ | 20,9                             | 38,2  | 41,1  |
|                   | a/mc: 0,60          | 80             | Uniforme  | $22 \cdot 10^{-6}$ | 7,5                              | 28,0  | 31,7  |

NA: No apreciable

**Tabla 7.** Succión capilar de los hormigones.

| Hormigón          | Edad, días | Capacidad, g/m <sup>2</sup> | S <sub>0,25</sub> , g/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> |
|-------------------|------------|-----------------------------|---|
| CPN               | 28         | 2037,2                      | 2,8   |
|                   | 90         | 1668,0                      | 2,3   |
| CPN+17.5AC+17.5FC | 28         | 2848,0                      | 4,1   |
|                   | 90         | 1725,3                      | 2,4   |
| CPN+25AC+10FC     | 28         | 2369,1                      | 3,2   |
|                   | 90         | 2021,4                      | 2,7   |
| CPN+10AC+25FC     | 28         | 3425,0                      | 4,8   |
|                   | 90         | 2576,4                      | 3,9   |

mayores incrementos 68 % y 54 % a los 28 y 90 días (Tabla 7), respectivamente.

Una tendencia similar muestra el coeficiente de succión capilar a 28 días (Figura 3 y Tabla 7). Los hormigones CPN y CPN+25AC+10FC presentan un coeficiente menor a  $4 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,5}$  ( $S_{0,25}$ :  $120 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,25}$ ) cumpliendo la condición estipulada por el proyecto de Reglamento CIRSOC 200 [23] para hormigones expuestos a clases de exposición agresivas (CL2, C1, C2, Q2, Q3, Q4) con relación a/mc: 0,45. El resto de los hormigones alcanzan un

coeficiente  $4,5 \pm 0,3 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,5}$  mayor a  $4 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,5}$  ( $S_{0,25}$ :  $120 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,25}$ ) a pesar de usar una a/mc: 0,45. A esta edad, el aumento en el contenido de filler calcáreo provoca un incremento de la capacidad y del coeficiente de succión de los hormigones.

A 90 días, los resultados obtenidos indican que el mayor valor de estos parámetros es alcanzado por el hormigón CPN+10AC+25FC, mientras que el resto de los hormigones presentan un coeficiente de succión de  $2,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{0,5}$ .



La Figura 4a muestra la penetración de agua a presión a 28 y 90 días de los hormigones elaborados con cementos con CPN, AC y FC, mientras que la Figura 5 muestra su perfil a 28 días. A 28 días, la penetración de agua de los hormigones con MCS es  $20,5 \pm 0,9$  mm, un valor considerablemente mayor al registrado por el hormigón CPN (11,0 mm). A 90 días, la menor penetración de los hormigones con MCS es alcanzada por el hormigón con menor contenido de filler calcáreo (CPN+25AC+10FC); sin embargo, este valor sigue siendo muy superior al registrado por el hormigón CPN (8,0 mm). A pesar de la diferencia entre los resultados

obtenidos, todos los hormigones fueron clasificados como impermeables, pues la penetración media es menor a 30 mm según el Reglamento CIRSOC 201/2005.

La influencia de la relación a/mc sobre la penetración de agua a 28 días se muestra en las Figuras 4b y 5. En los hormigones elaborados con CPC, con el incremento de la relación a/mc de 0,40 a 0,60 se produce un aumento de la permeabilidad de aproximadamente 4 veces, no cumpliendo el requisito estipulado por el Reglamento CIRSOC 201/05 para hormigones impermeables.

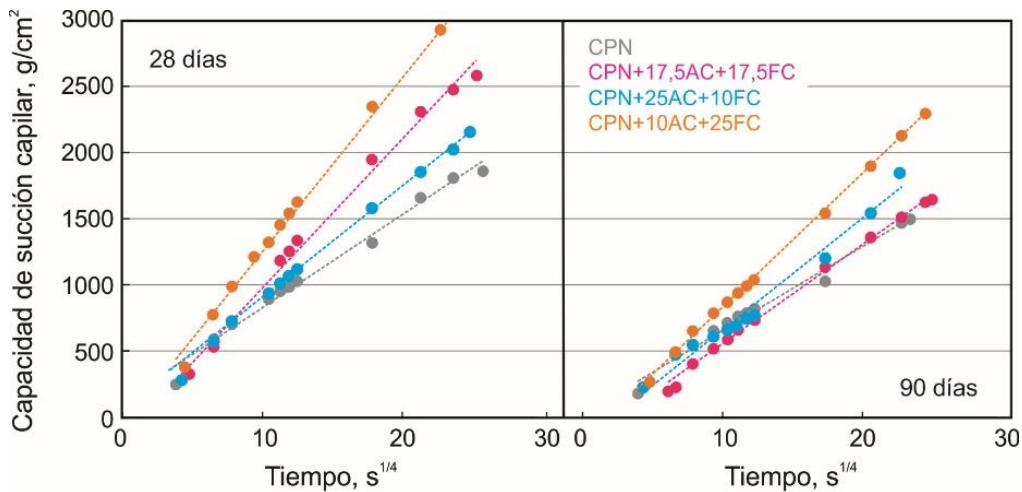


Figura 3. Pendiente de la recta empleada en el cálculo del coeficiente de succión capilar a 28 y 90 días.

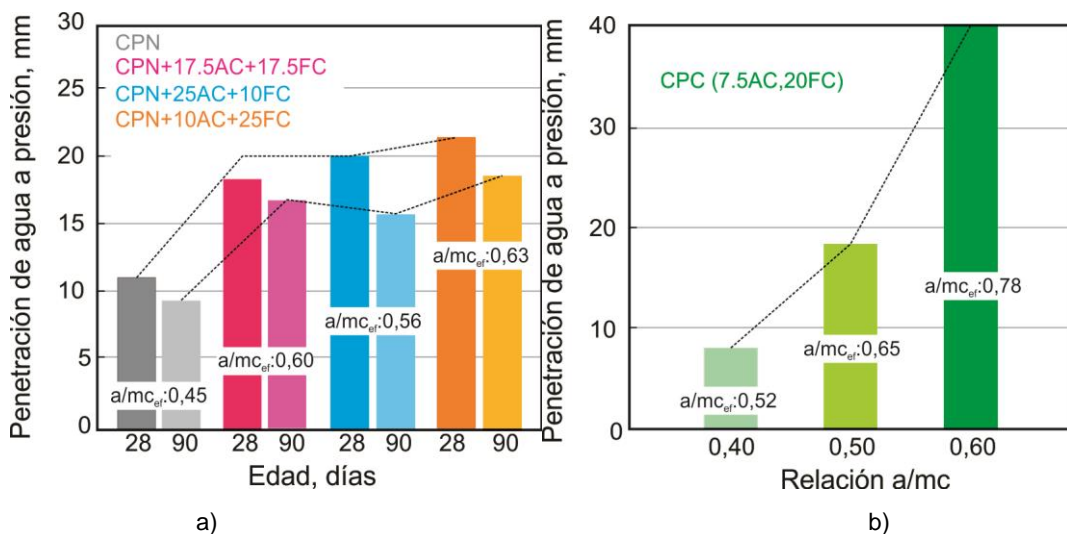
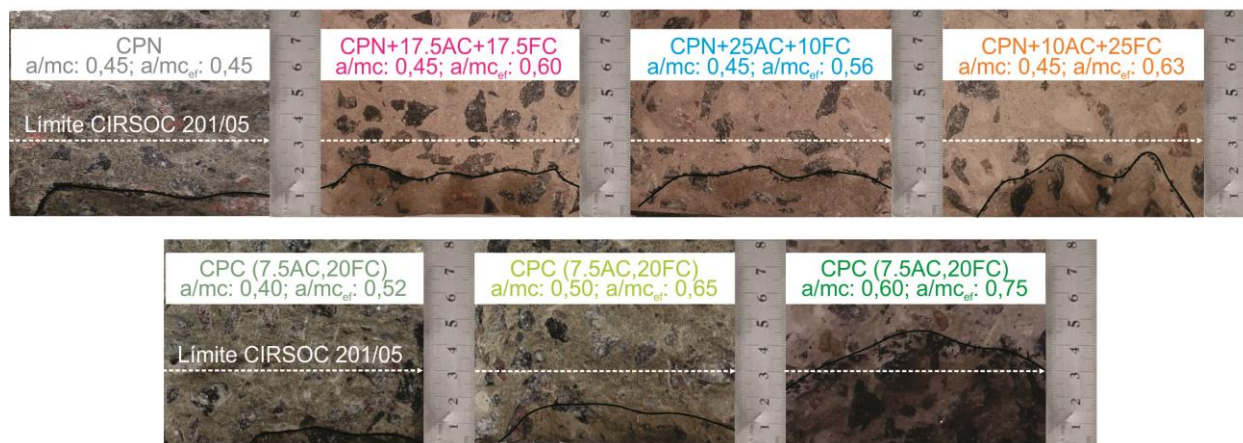


Figura 4. Penetración de agua a presión de los hormigones. a) Con 35% MCS; b) Con cemento compuesto.



**Figura 5.** Perfil de penetración de agua a 28 días en los hormigones estudiados.

En trabajos previos [24,25] se ha demostrado que el filler calcáreo y los materiales cristalinos asociados a la arcilla (en este caso cuarzo y hematita), no producen reacción puzolánica y que la arcilla illítica calcinada presenta una reacción lenta, con una contribución parcial a los 28 días, que aumenta a edades más avanzadas.

El efecto de dilución provocado por la menor cantidad de materiales con capacidad cementante produce el incremento de la relación  $a/mc$  efectiva ( $a/mc_{ef}$ ) que se indica en la Figura 4. La relación  $a/mc_{ef}$  se calculó considerando que el material cementante corresponde al cemento y al 60 % de la arcilla illítica calcinada (contenido de material amorfo) reaccionan para producir compuestos con características cementantes ( $a/mc_{ef} = a/(CPN+0,60AC)$ ). Este efecto, modifica la conectividad y tortuosidad de la red de capilares, incrementa la porosidad total y produce un corrimiento hacia tamaños de poros más grandes [26,27].

Esto es corroborado con los resultados obtenidos a 28 días, de la resistividad eléctrica (método de las 4 puntas) de los

hormigones elaborados con cemento con CPN, AC y FC (Tabla 8). La resistividad en una muestra de hormigón saturada es una medida indirecta de la porosidad y de la conectividad que existe entre sus poros [28] y puede vincularse a la posibilidad de que ingresen agentes agresivos a su interior [29].

En los hormigones con 35 % de MCS, la menor resistividad es registrada por el hormigón CPN+10AC+25FC (147  $\Omega.m$ ), aumentando para el resto de los hormigones estudiados. Así los hormigones con CPN+17.5AC+17.5FC y CPN+25AC+10FC alcanzan una resistividad (61 % y 97 %, respectivamente) mayor que la registrada por el hormigón CPN+10AC+25FC, indicando una mayor segmentación de poros cuando se incrementa el contenido de arcilla illítica calcinada en el hormigón.

El efecto de dilución puede ser contrarrestado, al menos en parte, por la reacción de la arcilla illítica calcinada, cuyos compuestos tardíos (CSH y/o fases AFm) contribuyen al refinamiento de poros, generando un corrimiento del tamaño de poros hacia poros más pequeños [3].

**Tabla 8.** Resistividad eléctrica de los hormigones con 35 % de MCS.

| Resistividad eléctrica a 28 días, $\Omega.m$ | CPN+17.5AC+17.5FC | CPN+25AC+10FC | CPN+10AC+25FC |
|--|-------------------|---------------|---------------|
|  | 237 ± 12          | 290 ± 5       | 147 ± 10      |

Finalmente, para reducir la permeabilidad del hormigón es necesario producir la segmentación de la estructura de poros. Según Powers [30], el tiempo para que este proceso ocurra depende de la relación a/c y del grado de hidratación del cemento ( $\alpha$ ). Sin embargo, aunque el cemento alcance la hidratación total ( $\alpha = 1$ ), la segmentación de la red de poros no se produce para relaciones a/c mayores a 0,70. Esto puede justificar la elevada penetración de agua que presentó el hormigón CPC (7.5AC,20FC) con relación a/mc = 0,60 (a/c<sub>ef</sub>: 0,78).

### 3.3 Carbonatación

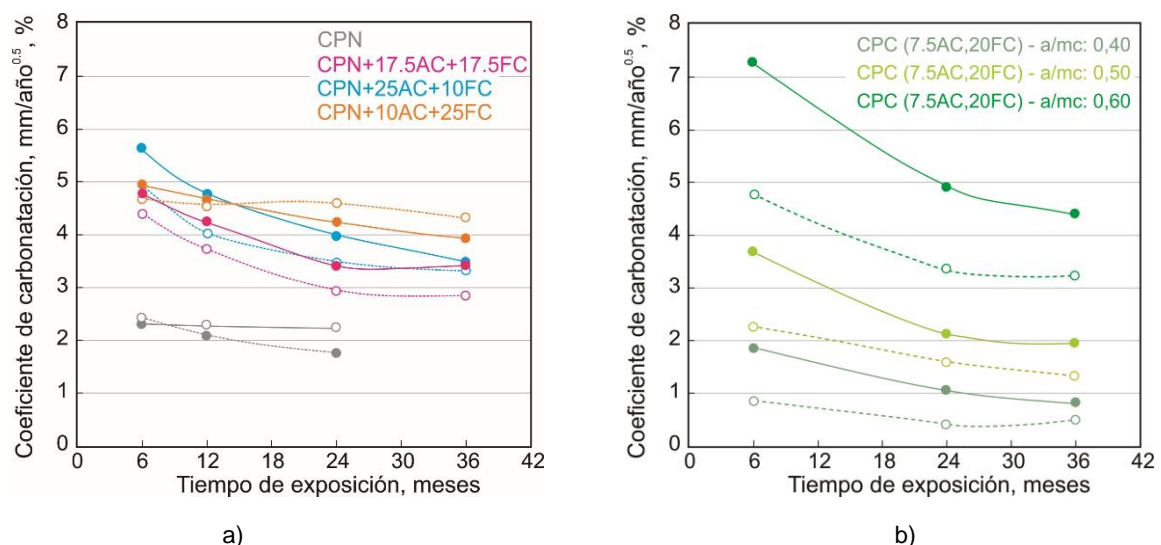
La Figura 6 presenta la evolución del coeficiente de carbonatación entre los 6 y 36 meses de exposición. Para todos los hormigones, este parámetro se reduce con el tiempo debido a los cambios que se producen en la estructura de poros por el avance del frente de carbonatación. La precipitación de CaCO<sub>3</sub>, provoca el refinamiento de la red de poros disminuyendo la velocidad de ingreso de CO<sub>2</sub> [31].

Para ambos tiempos de curado, los hormigones con 35 % de MCS registran un coeficiente de carbonatación notablemente

mayor al alcanzado por el hormigón CPN (Figura 6a). A los 6 meses de exposición, el mayor coeficiente es registrado por el hormigón CPN+10AC+25FC, siendo estos valores 4,95 y 4,67 mm/año<sup>0,5</sup> para los curados de 7 y 28 días respectivamente; mientras que para el hormigón CPN son 2,36 y 2,44 mm/año<sup>0,5</sup>. Una tendencia similar se observa para el resto de los tiempos de exposición.

El aumento en el coeficiente de carbonatación de los hormigones con 35 % de MCS puede ser atribuido a que la reducción de la cantidad de CH disponible para reaccionar con el CO<sub>2</sub> disminuye la posibilidad de segmentar la red de poros [31]. Además, el efecto de dilución incrementa la relación a/mc<sub>ef</sub> provocando un aumento de la porosidad total y la presencia de poros más grandes que facilitan el avance del frente de carbonatación.

Finalmente, el coeficiente de carbonatación tiende a disminuir con el aumento del tiempo de curado. Con el avance del tiempo de exposición esta reducción es más significativa cuando el contenido de arcilla illítica calcinada en el cemento es mayor. Esto puede deberse a que, a pesar de que el curado húmedo se detenga a los 7 o 28 días, la reacción de la arcilla illítica calcinada dentro de la masa del



**Figura 6.** Coeficiente de carbonatación de los hormigones curados 7 (línea llena) y 28 (línea punteada) días. a) Con 35% MCS y b) Con cemento compuesto.

hormigón continua, provocando la segmentación de la red de poros [7].

En la Figura 6b se muestra la influencia de la relación a/mc sobre el coeficiente de carbonatación de los hormigones elaborados con CPC (7.5AC,20FC). Independientemente del tiempo de curado húmedo, el aumento de la relación a/mc conduce a un importante incremento en el valor del coeficiente.

Cuando el tiempo de curado fue de 7 o 28 días, entre los 6 y 36 meses de exposición se produce un aumento entre 4 y 5 veces de este parámetro cuando la relación a/mc crece de 0,40 a 0,60. Este comportamiento puede ser atribuido al aumento de la porosidad del sistema que facilita el ingreso de CO<sub>2</sub> en la masa del hormigón.

Considerando el valor de  $k_c$  a los 36 meses, suponiendo un recubrimiento ( $d_c$ ) de 25 mm de hormigón en una estructura de hormigón armado, es posible estimar cuándo el frente de carbonatación alcanzará la superficie de la armadura, comenzando su despasivación, a partir de la ecuación  $k_c = d_c / t^{0.5}$ . Una vida útil superior a 50 años ( $t > 50$  años) puede obtenerse con los hormigones estudiados, con excepción de los hormigones CPN+10AC+25FC y el CPC (7.5AC,20FC) con una relación a/mc de 0,60 sometido a un curado húmedo de 7 días.

Para el caso del hormigón CPN+10AC+25FC, sería necesario aumentar el espesor de recubrimiento, pues el aumento en el tiempo de curado de 7 a 28 días no es suficiente para disminuir la velocidad de avance del frente de carbonatación. Caso contrario, para el hormigón CPC (7.5AC,20FC), sería suficiente

garantizar un tiempo de curado prolongado (28 días).

### 3.4 Coeficiente de migración de cloruros

La Tabla 9 muestra el coeficiente de migración de cloruros. A 28 días, los hormigones con cemento CPN y CPN+25AC+10FC registran valores similares entre sí (12,3-12,4 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s), y 67 % y 40% menores a los alcanzados por los hormigones CPN+17.5AC+17.5FC y CPN+10AC+25FC, respectivamente. A 90 días, el hormigón CPN+25AC+10FC sigue registrando el menor coeficiente de migración, siendo aproximadamente un 28 % menor al alcanzado por el resto de los hormigones con 35 % de MCS. El aumento de la relación a/mc en los hormigones con cemento CPC conduce a un incremento de este parámetro (Tabla 9), así a 28 días cuando la relación a/mc crece de 0,40 a 0,60 el coeficiente de migración se incrementa un 319 %.

La resistencia del hormigón al ingreso de cloruros, además de estar relacionada con el tamaño de los poros y la conectividad de la red de poros [32-34], depende de la capacidad de las fases hidratadas para ligar cloruros física (adsorción) o químicamente (mediante la formación de sales de Friedel) [6,32,35]. En consecuencia, la disminución del coeficiente de migración del hormigón CPN+25AC+10FC puede ser atribuida a la disminución de la porosidad que se produce por la reacción de la arcilla y a la fijación de cloruros en las fases AFm y/o en el CSH [7,8]. En tanto que el aumento de este parámetro

**Tabla 9.** Coeficiente de migración de cloruros (10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s) de los hormigones estudiados.

| Edad. días | CPN   | CPN+17.5AC+17.5FC | CPN+25AC+10FC | CPN+10AC+25FC | CPC (7.5AC,20FC) |      |      |
|------------|-------|-------------------|---------------|---------------|------------------|------|------|
|            |       |                   |               |               | 0,40             | 0,50 | 0,60 |
| 28         | 12,39 | 20,67             | 12,30         | 17,26         | 6,4              | 15,0 | 26,8 |
| 90         | 12,14 | 13,72             | 10,76         | 13,73         | 5,5              | 6,8  | ---  |

con la relación a/mc puede ser atribuido a la mayor porosidad de la matriz cementícea [3].

### 3.5 Resistencia a los sulfatos

La expansión de los cementos con distintos contenidos de MCS se muestra en la Figura 7. De acuerdo con la norma ASTM C1157, para que un cemento sea ARS la expansión a 6 y 12 meses no debe exceder 0,05 % y 0,10 %, respectivamente. Los morteros CPN ARS y CPN ARS+30AC+5FC, cumplen ambas condiciones; mientras que el mortero CPN ARS+15AC+20FC no verifica la condición de la expansión máxima a los 6 meses. El Reglamento ACI 201 (Guía para la Durabilidad del Hormigón) especifica que las puzolanas (en contenidos entre 20 % y 30 %) deben registrar una expansión menor a 0,10 % a los 18 meses, requisito también verificado por el mortero CPN ARS+30AC+5FC (0,08).

En la Figura 7 se ha incluido el porcentaje de expansión que registran los morteros con MCS con respecto a la expansión registrada

por el mortero CPN ARS. Entre los 180 y 720 días, el mortero CPN ARS+30AC+5FC presenta una expansión considerablemente menor (52 % - 65 %) a la obtenida por el mortero CPN ARS; mientras que, hasta los 360 días, el mortero CPN ARS+15AC+20FC presenta una expansión mayor, la iguala a los 460 días y, hacia los 720 días, se encuentra en el orden del 90 % de la expansión del CPN ARS.

Por lo tanto, para un mismo contenido de MCS, la resistencia potencial a los sulfatos aumenta con el incremento de arcilla illítica calcinada y la disminución de filler calcáreo en el mortero. La disponibilidad de CH para formar yeso y/o ettringita disminuye debido al efecto de dilución y al consumo de este compuesto durante la reacción puzolánica de la arcilla illítica calcinada. Simultáneamente, el empleo de estos MCS, principalmente del filler calcáreo, conduce a un incremento de la relación  $a/mc_{ef}$  que aumenta la porosidad y favorece el ingreso de iones  $SO_4^{2-}$  al sistema, produciendo un mayor incremento de la expansión en el mortero CPN ARS+15AC+20FC ( $a/mc_{ef}:0,62$ ) que en el mortero CPN ARS+30AC+5FC ( $a/mc_{ef}:0,54$ ).

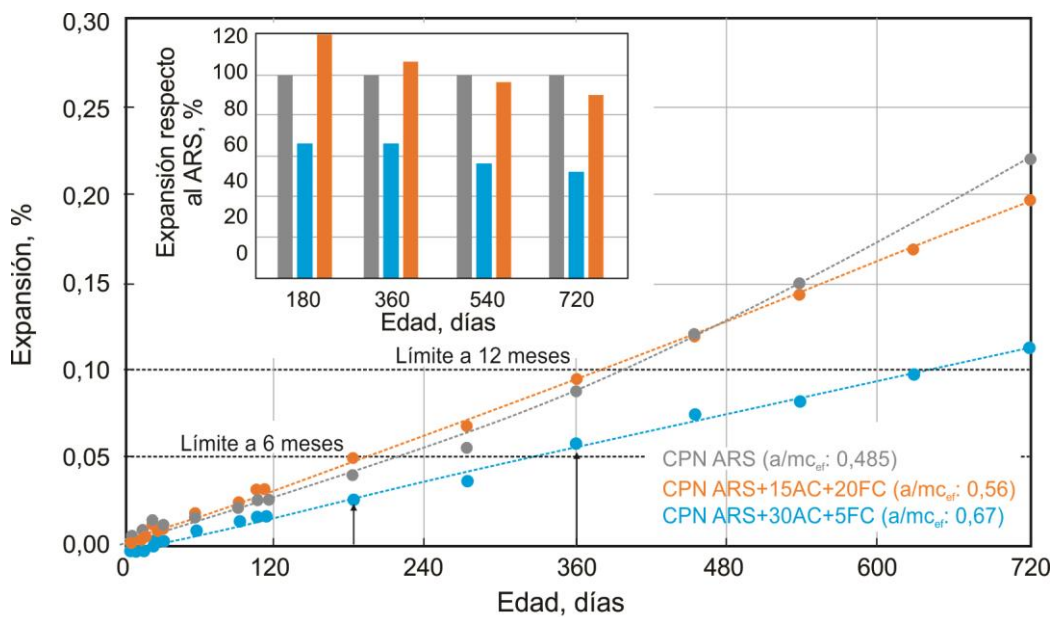


Figura 7. Resistencia a los sulfatos de los morteros con cemento CPN ARS, AC y FC.

### 3.6 Indicadores de sostenibilidad relacionados con parámetros durables

La Tabla 10 presenta los valores el  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón, los factores de resistencia al ingreso de agentes agresivos ( $F_{cloruro}$  y  $F_{carb}$ ) y los índices de apatía A.

Los valores de  $A_{icloruro}$  de los hormigones elaborados con CPN, AC y FC variaron a 28 días entre 229,1 y 133,2; mientras que, a 90 días, estos valores presentaron una leve disminución ( $< 5\%$ ). En los hormigones donde el contenido de material cementante permanece constante y no se registran cambios importantes en el  $D_{nssm}$ , el  $A_{icloruro}$  depende principalmente de las  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón, las cuales disminuyen en mayor medida con el aumento del contenido de filler calcáreo en el cemento pues es el MCS con menor emisión por tonelada (Tabla 7).

Para los hormigones con CPC, el incremento de la relación a/mc de 0,40 a 0,60, a 28 días produce una disminución de  $A_{icloruro}$  de hasta 16%. A pesar del aumento significativo en los valores de  $D_{nssm}$  (Tabla 9) que produce el incremento de la relación a/mc, el menor contenido de CPC de los hormigones disminuye considerablemente las  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón, provocando menores valores de  $A_{icloruro}$ .

Bajo estas condiciones, la disminución de las  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón conduce a la obtención de hormigones más sostenibles.

Los índices  $A_{icarb}$  a 24 meses (Tabla 10) muestran una importante dependencia con el tiempo de curado húmedo del hormigón. Entre los hormigones con CPN, AC y FC, el CPN+17.5AC+17.5FC es el que muestra la mayor disminución entre 7 y 28 días de curado (31%); mientras que, para los hormigones con CPC, el hormigón con relación a/mc: 0,40 es el que muestra la mayor reducción (56%). Por el contrario, se observa que el hormigón CPN+10AC+25FC presenta una apatía a la carbonatación mayor cuando es curado 28 días que cuando se cura 7 días. Esto se debe a que, si bien el reemplazo de CPN por AC y FC reduce las emisiones por  $m^3$  de hormigón, la prolongación del curado no es suficiente para reducir la porosidad, disminuyendo la sostenibilidad y mostrando la influencia de la durabilidad en el rendimiento ambiental del hormigón.

Independientemente del tiempo de curado húmedo, el valor de  $A_{icarb}$  presenta un comportamiento opuesto al registrado por  $A_{icloruro}$ , pues aumenta por la incorporación de MCS al cemento y por el incremento de la relación a/mc. A pesar de las menores  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón que presentan los hormigones elaborados con 35% de MCS y con CPC, el aumento del coeficiente de

**Tabla 10.**  $ECO_{2eq}$  por  $m^3$  de hormigón, factores de resistencia a los cloruros y a carbonatación e índices A.

| Hormigón            | $ECO_{2eq}$ (kg) por $m^3$ de hormigón | $F_{cloruro}$ |       | $F_{carb}$ |       | $A_{icloruro}$ |       | $A_{icarb}$ |       |      |
|---------------------|--|---------------|-------|------------|-------|----------------|-------|-------------|-------|------|
|                     |  | 28 d.         | 90 d. | 7 d.       | 28 d. | 28 d.          | 90 d. | 7 d.        | 28 d. |      |
| CPN                 | 303                                    | 1,32          | 1,33  | 4,9        | 8,1   | 229,1          | 228,5 | 61,6        | 37,7  |      |
| CPN+17.5AC+17.5FC   | 197                                    | 1,23          | 1,29  | 2,1        | 3,1   | 159,7          | 152,3 | 92,3        | 63,8  |      |
| CPN+25AC+10FC       | 190                                    | 1,32          | 1,34  | 2,1        | 2,2   | 144,5          | 141,8 | 92,4        | 85,1  |      |
| CPN+10AC+25FC       | 169                                    | 1,27          | 1,30  | 1,6        | 1,3   | 133,2          | 129,5 | 104,3       | 126,6 |      |
|                     | 0,40                                   | 215           | 1,60  | 1,66       | 36,3  | 82,6           | 134,7 | 130,2       | 5,9   | 2,6  |
| CPC<br>(7.5AC,20FC) | 0,50                                   | 173           | 1,36  | 1,58       | 6,6   | 14,1           | 127,6 | 110,0       | 26,4  | 12,3 |
|                     | 0,60                                   | 142           | 1,26  | ---        | 1,3   | 2,4            | 112,9 | ---         | 110,4 | 58,9 |

carbonatación dado por la menor cantidad de CH disponible para combinarse con  $\text{CO}_2$  y/o el aumento de la porosidad del material debido al incremento de la relación  $a/mc_{ef}$  conducen a obtener mayores valores de  $A_{icarb}$ . Finalmente, la mejora en el parámetro de desempeño se posiciona como el principal responsable para obtener hormigones más sostenibles.

#### 4. Conclusiones

De las experiencias realizadas sobre hormigones y morteros elaborados con diferentes cementos, contenidos de arcilla illítica calcinada y filler calcáreo, y relaciones  $a/mc$  se puede concluir que:

- A igual contenido de MCS y relación  $a/mc$ , la capacidad y el coeficiente de succión capilar disminuyen con el incremento en el contenido de arcilla illítica calcinada y la disminución del contenido de filler calcáreo. El empleo de mayores contenidos de arcilla illítica calcinada permite obtener parámetros adecuados en hormigones para ser empleados en ambientes agresivos.
- La obtención de hormigones impermeables a bajas relaciones  $a/mc$ , depende en mayor medida del contenido total de MCS y no del tipo de MCS. Para altas relaciones  $a/mc$ , para poder segmentar la red de poros capilar será necesario disminuir el contenido de MCS (principalmente filler calcáreo) en el cemento.
- El aumento de la porosidad dado por el incremento de la relación  $a/mc$  aumenta el coeficiente de carbonatación del hormigón. Este parámetro también depende del contenido de MCS y en menor medida de su tipo. El aumento en el tiempo de curado para reducir el frente de carbonatación es más efectivo en cementos con elevados contenidos de arcilla illítica calcinada que en cementos con mayores contenidos de filler calcáreo.

- A igual contenido de MCS en el hormigón el coeficiente de migración de cloruros disminuye con el aumento en el contenido de arcilla illítica calcinada; mientras que se produce un importante incremento de este parámetro a medida que se incrementa la relación  $a/mc$ .

- Para un contenido de 35 % de MCS y utilizando como cemento base un cemento CPN ARS, la resistencia a los sulfatos aumenta con el incremento de arcilla illítica calcinada y el contenido de filler calcáreo debe ser menor al 20 %.

- El reemplazo de CPN por MCS permite reducir las  $\text{ECO}_{2eq}$  por  $\text{m}^3$  entre 30 % y 47 %. Sin embargo, si el uso de MCS afecta negativamente el rendimiento durable de los hormigones, puede aumentar la “apatía a la sostenibilidad”. De acuerdo con el índice  $A_{icloruro}$ , los hormigones más sostenibles son aquellos con MCS pues este parámetro está dominado por las  $\text{ECO}_{2eq}$ ; pero si se considera el  $A_{icarb}$ , el uso de MCS aumenta la apatía a la sostenibilidad, debido a que la reducción de las  $\text{ECO}_{2eq}/\text{m}^3$  no es suficiente para contrarrestar el aumento del coeficiente de carbonatación, incluso cuando se prolonga el tiempo de curado.

#### Fuentes de financiamiento

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (número de proyecto PICT 2018-3405).

#### Contribución de autoría

G. Cordoba: análisis formal, investigación, redacción-revisión-edición. L. Montani: investigación, visualización. C. Castellano: investigación, redacción-original-borrador. H. Donza: investigación. E.F. Irassar:

conceptualización, investigación, redacción-revisión-edición. V.L. Bonavetti: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, redacción-revisión-edición, supervisión.

### Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

### Referencias

- [1] Danner, T., Norden, G., y Justnes, H. (2018). Characterisation of calcined raw clays suitable as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science*, 162, 391–402. <https://doi.org/gd5wg4>
- [2] Bonavetti, V., Castellano, C., y Irassar E. F. (2022). Designing general use cement with calcined illite and limestone filler. *Applied Clay Science*, 230, 106700. <https://doi.org/n5zz>
- [3] Cordoba, G., Zito, S. V., Sposito, R., Rahhal, V., Tironi, A., Thienel, K.-Ch., y Irassar, E. F. (2020) Concretes with calcined clay and calcined shale: Workability, mechanical, and transport properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 4020224. <https://doi.org/gg887m>
- [4] Cyr, M. (2013). Influence of supplementary cementitious materials (SCMs) on concrete durability. En F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, J. Labrincha, y V. M. John (Eds.), *Eco-Efficient Concrete* (pp. 153–197). Woodhead Publishing.
- [5] Bucher, R., Cyr, M., y Escadeillas, G. (2015). Carbonation of Blended Binders Containing Metakaolin. En K. Scrivener, y A. Favier (Eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, RILEM Bookseries, vol 10 (pp. 27–33). Springer. <https://doi.org/n7d6>
- [6] Loser, R., Lothenbach, B., Leemann, A., y Tuchschnid, M. (2010). Chloride resistance of concrete and its binding capacity - Comparison between experimental results and thermodynamic modeling. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 34–42. <https://doi.org/cm4dtk>
- [7] Cordoba, G., Sposito, R., Köberl, M., Zito, S. V., Beuntner, N., Tironi, A., Thienel, K.-Ch., y Irassar, E. F. (2022). Chloride migration and long-term natural carbonation on concretes with calcined clays: A study of calcined clays in Argentina. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01190. <https://doi.org/n7d8>
- [8] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., y Pillai R. G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC<sup>3</sup>). *Cement and Concrete Research*, 107, 136–151. <https://doi.org/gdhxsw>
- [9] Cordoba, G., y Irassar, E. F. (2021). Sulfate performance of calcined illitic shales. *Construction and Building Materials*, 291, 123215. <https://doi.org/n7d9>
- [10] Alexander, M. G. (2018). Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. *Revista ALCONPAT*, 8(3), 224–245. <https://doi.org/n7fd>
- [11] Troconis de Rincón, O., Sanchez, M., Millano, V., Fernandez, R., de Partidas, E. A., Andrade, C., Martínez, I., Castellote, M., Barboza, M., Irassar, F., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., de Gutiérrez, R. M., Maldonado, J., Guerrero, C., Saborio-Leiva, E., Villalobos, A. C., Tres-Calvo, G., Torres-Acosta, A., Pérez-Quiroz, J., Martínez-Madrid, M., Almeraya-Calderón, F., Castro-Borges, P., Moreno, E. I., Pérez-López, T., Salta, M., de Melo, A. P., Rodríguez, G., Pedrón, M., y Derrégibus, M. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science*, 49(7), 2832–2843. <https://doi.org/fvx77s>
- [12] Zito, S. V., Cordoba, G. P., Irassar, E. F., y Rahhal, V. F. (2023). Durability of eco-friendly blended cements incorporating ceramic waste from different sources. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(1), 13–23. <https://doi.org/khsz>



- [13] Swamy, R. N. (2008). Sustainable concrete for the 21st century concept of strength through durability, *Japan Society of Civil Engineers Concrete Committee Newsletter*, 13, 1–28.
- [14] Gettu, R., Pillai, R. G., Santhanam, M., Basavaraj, A. S., Rathnarajan, y Dhanya, B. S. (2018). Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions. *Materials and Structures*, 51, 165. <https://doi.org/gtrw9n>
- [15] Bonavetti, V., Castellano, C., Donza, H., Rahhal, V., Cordoba, G., y Irassar, E. F. (2021). Hormigones de cementos compuestos con arcillas calcinadas. *Revista Hormigón*, 60, 57–67.
- [16] Bonavetti, V. L., Donza, H., Pappalardi, M., Milanesi, C., Violini, D., y Irassar, E. F. (2018). Performance de un nuevo cemento compuesto elaborado con puzolanas obtenidas por medio de arcilla calcinada y filler. En V. L. Bonavetti (Ed.), *22ª Reunión Técnica AATH* (pp. 147–154). AATH.
- [17] Fédération Internationale du Béton (2006). *Model code for service life design*. fib Bulletin, 34. <https://doi.org/n7fr>
- [18] Cordoba, G., Barquero, M., Bonavetti, V., y Irassar, E. F. (2023). Sustainability of concretes with binary and ternary blended cements considering performance parameters. *Cement*, 13, 100077. <https://doi.org/n7fv>
- [19] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland (2024). *Informe de indicadores de sostenibilidad de la industria argentina del cemento*. AFCP.
- [20] Flower, D. J. M., y Sanjayan, J. G. (2007). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 282–288. <https://doi.org/bg437n>
- [21] ICE Database (2019). *Embodied carbon model of cement, mortar and concrete*. <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html>
- [22] Cordoba, G., Paulo, C. I., y Irassar, E. F. (2023). Metodología para la evaluación del impacto ambiental del hormigón elaborado aplicado a la región metropolitana de Buenos Aires. *Revista Hormigón*, 64, 5–23. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/pag9z0dz5>
- [23] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2024). *Proyecto de Reglamento CIRSOC 200*. Proyecto en Discusión Pública Nacional.
- [24] Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Castellano, C. C., Trezza, M. A., Rahhal, V. F., Cordoba, G., y Lemma, R. (2019). Calcined illite-chlorite shale as supplementary cementing material: Thermal treatment, grinding, color and pozzolanic activity. *Applied Clay Science*, 179, 105143. <https://doi.org/gmtb>
- [25] Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Cordoba, G. P., Rahhal, V. F., Castellano, C. C., y Donza, H. A. (2023). Performance of composite Portland cements with calcined illite clay and limestone filler produced by industrial intergrinding. *Minerals*, 13(2), 240. <https://doi.org/n7f5>
- [26] Bonavetti, V., Donza, H., Menéndez, G., Cabrera, O., y Irassar, E. F. (2003). Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 865–871. <https://doi.org/d47989>
- [27] Cyr, M., Lawrence, P., y Ringot, E. (2006). Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 264–277. <https://doi.org/c6vbh7>
- [28] Andrade, C., y Buják, R. (2013). Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, 53, 59–67. <https://doi.org/f5n2xc>
- [29] Mendes, S. E. S., Oliveira, R. L. N., Cremonese, C., Pereira, E., Pereira, E., y Medeiros-Junior, R. A. (2018). Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. *Construction and Building Materials*, 192, 610–620. <https://doi.org/ggpr28>

- [30] Powers, T. C., Copeland, L. E., y Mann, H. M. (1959). Capillary continuity or discontinuity in cement pastes. *Journal of Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, 1(2), 38–48.
- [31] von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., Huet, B., Andrade, C., Medina, C., Thiel, C., Gruyaert, E., Vanoutrive, H., Saéz del Bosque, I. F., Ignjatovic, I., Elsen, J., Provis, J. L., Scrivener, K., Thienel, K.-Ch., Sideris, K., Zajac, M., Alderete, N., Cizer, Ö., Van den Heede, P., Hooton, R. D., Kamali-Bernard, S., Bernal, S. A., Zhao, Z., Shi, Z., y De Belie, N. (2020). Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures*, 53, 136. <https://doi.org/n7f9>
- [32] Noushini, A., Castel, A., Aldred, J., y Rawal, A. (2020). Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103290. <https://doi.org/ghdgg2>
- [33] Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., y Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 106564. <https://doi.org/gmhfxz>
- [34] Dhandapani, Y., y Santhanam, M. (2017). Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. *Cement and Concrete Composites*, 84, 36–47. <https://doi.org/gjjwrc>
- [35] Ribeiro, D. V., Pinto, S. A., Amorim Júnior, N. S., Andrade Neto, J. S., Santos, I. H. L., Marques, S. L., y França, M. J. S. (2021). Effects of binders characteristics and concrete dosing parameters on the chloride diffusion coefficient. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104114. <https://doi.org/n7gg>