

# PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE HORMIGÓN CON CEMENTO PUZOLÁNICO

## TRANSPORT PROPERTIES OF CONCRETE WITH POZZOLANIC CEMENT

*Y.A. Villagrán Zaccardi<sup>1</sup>, V.L. Taus<sup>2</sup>, Á.A. Di Maio<sup>3</sup>*

*1.- Investigador Asistente CONICET, LEMIT, yuryvillagran@conicet.gov.ar*

*2.- Doctoranda UNLP, LEMIT*

*3.- Investigador Independiente CONICET, LEMIT*

29

### RESUMEN

Existen estructuras emplazadas en medios agresivos que requieren una adecuada resistencia al ingreso de agentes agresivos para completar su vida útil con un nivel aceptable de serviciabilidad. Adicionalmente a las buenas prácticas constructivas, resulta necesario trabajar sobre el diseño de la mezcla de hormigón, de manera de lograr óptimos resultados a un costo menor. El cemento portland puzolánico (CPP) aparece como una de las opciones más apropiadas conjugando durabilidad y economía. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar distintas propiedades relacionadas con la penetrabilidad de agentes externos a la estructura porosa de hormigones de distinto nivel resistente elaborados con cemento CPP. Se utilizaron método de ensayo para la evaluación del transporte de líquidos y gases, tales como el de penetración de agua a presión, absorción capilar, permeabilidad al aire y migración de cloruro. Los resultados obtenidos a 28 días, mostraron efectos sumamente positivos de la acción puzolánica de la adición como reemplazo parcial del clínquer, resaltando la potencialidad del uso del cemento CPP para ambientes agresivos.

**Palabras clave:** *cemento puzolánico, propiedades de transporte, permeabilidad, capilaridad, migración*

### ABSTRACT

Concrete structures located in aggressive environments must have enough resistance against the ingress of aggressive agents so that they can achieve their service life with acceptable serviceability. In addition to suitable construction practices, concrete mix design must be studied to achieve the best

results at low cost. Pozzolanic Portland cement (PPC) seems one of the most appropriate options, which combines durability and economy. This paper aims to evaluate properties related to the penetration of external agents through the pore structure of PPC concrete with dissimilar strength levels. Liquid and gas transport was evaluated by tests methods such as water penetration under pressure, sorptivity, air permeability and chloride migration. At 28 days, the obtained results showed very positive pozzolanic effect of the admixture as partial replacement of clinker, which shows the potentiality of using PPC for aggressive environments.

**Keywords:** *pozzolanic cement, transport properties, permeability, capillarity, migration.*

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de las patologías que pueden manifestarse en las estructuras de hormigón armado durante su vida es servicio, se hallan relacionadas con la interacción ambiente-estructura. La intensidad de cada manifestación dependerá del agente agresivo presente en el medio externo (tipo y magnitud) y del hormigón de recubrimiento (espesor y calidad).

El hormigón de recubrimiento actúa como barrera de protección de las armaduras y del hormigón interior, desempeñando un rol esencial en la durabilidad al actuar como barrera frente al ingreso de agentes potenciales de deterioro. Usualmente resulta de menor calidad, más poroso y menos compacto que el hormigón interior por problemas asociados a la compactación y colocación del hormigón (presencia de armaduras y moldes), a la segregación y fundamentalmente a las condiciones de curado, donde la existencia de gradientes no lineales en la distribución de humedad y temperatura, pueden provocar aumentos en la porosidad y fisuración.

Existe un consenso generalizado en que la penetrabilidad del hormigón de recubrimiento es la clave en el modelo de Tuutti para los problemas de durabilidad [1]. De este modo al diseñar un hormigón lo suficientemente “impermeable” se estará asegurando el adecuado desempeño durante su vida útil. Por ello, es importante la realización de ensayos relacionados con la zona externa de los elementos estructurales emplazados en medios agresivos. Ello con el fin de estimar la durabilidad

potencial del hormigón, mediante la evaluación de parámetros asociados a diferentes mecanismos de transporte factibles de manifestarse.

La estructura de poro del hormigón de recubrimiento es, por lo tanto, quien determinará la vulnerabilidad que tendrá el hormigón ante los diversos agentes externos. Interesa entonces el nivel de porosidad, la distribución de tamaños de poro, conectividad y tortuosidad. Estos parámetros se hallan directamente vinculados con el grado de hidratación alcanzado por la matriz de cemento, el cual depende a su vez de numerosos factores tales como la razón a/c, calidad, duración y tipo de curado, proporciones de los materiales y tipo de cemento.

Las características del cemento tienen una importante incidencia en el proceso de hidratación, debido a la diversidad de compuestos adicionados incorporados como reemplazo parcial del clínquer con el fin de mejorar las propiedades en estado fresco y/o endurecido del hormigón.

Si bien el empleo de adiciones encuentra principalmente fundamentos ecológicos (reducción en la emanación de CO<sub>2</sub>, utilización de subproductos industriales y reducción del impacto por la disposición de desechos), se observó que a estas ventajas se le suman la reducción de costos por el reemplazo parcial del clínquer y la obtención de hormigones con propiedades especiales respecto de los obtenidos con cementos sin adiciones.

Particularmente el cemento pórtland puzolánico (CPP) es empleado en estructuras que requieren una adecuada "impermeabilidad" tales como las expuestas al agua de mar, debido a la menor permeabilidad al agua y al i n cloruro. Este cemento, compuesto por un porcentaje de puzolana comprendido entre el 15 y el 50% [2], se caracteriza por producir el refinamiento de poro por el incremento del C-S-H y otros productos de hidratación a expensas del CH. Esto se traduce en mejoras importantes del comportamiento durable del hormigón.

Desde el punto de vista resistente, si bien estos cementos presentan una ganancia de resistencia lenta, evidencian mejoras importantes en la resistencia última. Debido a esto, internacionalmente se recomienda especificar valores de resistencia de diseño avanzadas (por ejemplo, 56 o 90 días).

Por lo anteriormente expuesto y debido a que en la actualidad el cemento CPP se ha constituido en el de mayor utilización en importantes obras de ingeniería que requieren una adecuada durabilidad durante una vida de diseño mayor, surge la necesidad de estudiar esta variable. Así, el objetivo del presente trabajo consiste en el estudio del comportamiento durable de hormigones de diferente nivel resistente, elaborados con cemento CPP respecto a diferentes mecanismos de transporte a los que pueden estar sujetos.

La cuantificación de las propiedades de transporte en el hormigón resulta un aspecto que puede abordarse desde diferentes perspectivas. En exposición natural los mecanismos de transporte son complejos y est n sujetos a numerosas variables ambientales. Por ello, desde un planteo ingenieril, se utilizan metodologías que permiten obtener coeficientes que describen la resistencia del hormigón al transporte de agua y agentes agresivos. Estos métodos de evaluación son aplicados en condiciones controladas y constantes y no se ajustan estrictamente a las condiciones de exposición natural. Por otro lado, permiten la

imposición de variables prescriptivas y en algunos casos de variables prestacionales con vistas a asegurar la durabilidad del hormigón armado en ambiente agresivo. Resulta de sumo interés la consistencia entre los diferentes métodos de evaluación de las propiedades de transporte cuando son considerados para una aplicación en común, y también es importante referir estas comparaciones para el caso particular del hormigón elaborado con CPP, debido a sus características de hidratación y estructura de poro particulares.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se elaboraron hormigones de razón a/c 0,40 (H-04) y 0,60 (H-06). Los materiales utilizados fueron piedra partida granítica de tamaño máximo 19 mm, arena silícea de río y cemento CPP40. Las propiedades del cemento se muestran en la Tabla 1, mientras que en la Tabla 2 se informan las proporciones de los materiales utilizados.

Por cada mezcla se moldearon probetas cilíndricas normalizadas, para la determinación

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas del cemento.

<b>Análisis físico</b>	
Superficie específica Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	416
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,99
Retenido tamiz 75�m (%)	10,4
Resistencia 2d (MPa)	10,5
Resistencia 28d (MPa)	40,1
<b>Análisis químico (%)</b>	
Pérdida por calcinación	5,36
Residuo insoluble	14,90
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	1,84
�xido de Magnesio (MgO)	1,64
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	16,83
�xido F�rrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,97
�xido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,46
�xido de Calcio (CaO)	48,94
Cloruro (Cl-)	0,02

**Tabla 2.** Proporciones de las mezclas (kg/m<sup>3</sup>).

Materiales	Hormigones	
	H-04	H-06
Agua	182	170
Cemento	442	290
Agregado Fino	800	929
Agregado Grueso	981	992

de la resistencia a compresión, probetas cúbicas de 200 mm de arista para la evaluación de la permeabilidad al agua (penetración de agua a presión), probetas prismáticas (70x100x430mm), para la cuantificación de la permeabilidad al aire y probetas cilíndricas de 100x200 mm para la determinación de la absorción de agua por capilaridad y migración de cloruro.

Las probetas fueron desmoldadas a las 24 h y curadas hasta la edad de ensayo en cámara húmeda (T: 20 ± 2 °C; HR: 95%), según la norma ASTM C 192/C 192M-07 [3].

32

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades en estado fresco y mecánicas

En estado fresco, se evaluó el asentamiento mediante el ensayo de cono de Abrams [4], presentando niveles de consistencia entre plástica y seca; también se evaluaron el peso de la unidad de volumen (P.U.V.) [5] y el contenido de aire naturalmente incorporado [6]. Los resultados obtenidos en los diferentes hormigones se presentan en la Tabla 3.

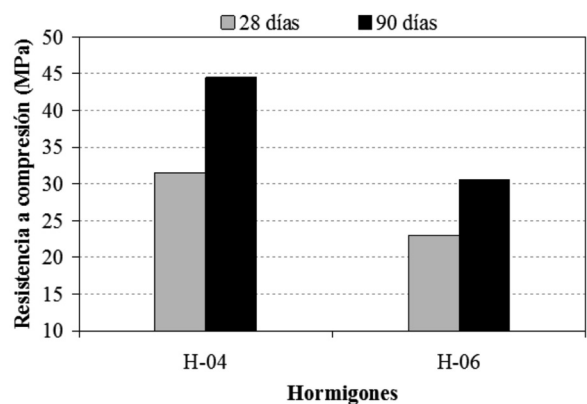
**Tabla 3.** Propiedades en estado fresco.

Materiales	Hormigones	
	H-04	H-06
Asentamiento	4,5	5,0
Aire (%)	1,7	1,9
P.U.V. (kg/m <sup>3</sup> )	2404	2379

A fin de caracterizar a los hormigones desde el punto de vista mecánico, se efectuaron ensayos de resistencia a compresión simple a la edad de 28 y 90 días, en probetas cilíndricas normalizadas, siguiendo los lineamientos indicados en la norma ASTM C 39/C 39M-05 [7]. En ambos casos las muestras permanecieron bajo curado húmedo hasta la edad de ensayo.

El nivel resistente medio alcanzado a la edad de 28 días por los hormigones H-04 y H-06 fue de 31,5 y 23,0 MPa, respectivamente, mientras que a la edad de 90 días se obtuvieron resistencias de 44,5 y 30,5 MPa (Figura 1). Puede observarse que el hormigón H-06 a los 90 días presentó valores resistentes del orden de los obtenidos en el hormigón H-04 a los 28 días. Este hecho es consecuencia del lento desarrollo de la hidratación del cemento CPP, de allí que las recomendaciones internacionales planteen especificar valores de resistencia a edades mayores, a fin de aprovechar la máxima capacidad resistente. Sin embargo, esto es válido siempre y cuando se asegure un curado húmedo prolongado.

Para caracterizar el comportamiento de los hormigones desde el punto de vista durable, en estado endurecido se realizó la determinación experimental de parámetros relacionados con la estructura porosa del hormigón y los diferentes mecanismos de transporte más habituales.

**Figura 1.** Resistencia a compresión simple.

En la Tabla 4 se informan los resultados obtenidos en la evaluación de la absorción de agua a 24 h, el peso específico en condición saturado a superficie seca (PE<sub>ss</sub>) y seca (PE<sub>s</sub>), y la porosidad como porcentaje del volumen de vacíos respecto del volumen total, aplicando la norma ASTM C 642-06 [8]. En todos los casos las determinaciones se efectuaron a la edad de 28 días.

Tabla 4. Absorción, densidad y porosidad.

Materiales	Hormigones	
	H-04	H-06
Absorción (%)	5,00	5,15
PE <sub>ss</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2424	2400
PE <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2309	2282
Porosidad (%)	11,5	11,8

### Penetración de agua a presión

Este ensayo permite estudiar el comportamiento del hormigón en relación a su permeabilidad, donde el transporte a través de la estructura porosa del hormigón se produce debido a un gradiente de presiones hidrostáticas. Se trata de un mecanismo de transporte al que están sujetas las estructuras destinadas a conducir o contener agua u otros fluidos, tales como tanques y depósitos de agua, cisternas, cañerías, diques, presas.

La metodología, según la norma IRAM 1554:1983 [9], consiste en colocar muestras cúbicas de 200mm de arista en un permeámetro de carga variable y someter dichas muestras a la aplicación de escalones de presión de agua variables desde 1 a 7 kg/cm<sup>2</sup> (Figura 2).

Concluido el tiempo bajo carga, se retiran las probetas y se ensayan a tracción por compresión diametral, determinándose el perfil del frente húmedo penetrado en cada una de las caras resultantes (Figura 3). El perfil es relevado al milímetro determinándose la penetración media y máxima, las que no deben superar, según el Reglamento CIRSOC 201:2005 los 30 y 50 mm,

respectivamente para el caso de hormigones expuestos a congelación y deshielo, ambientes marinos, o agresividad química.

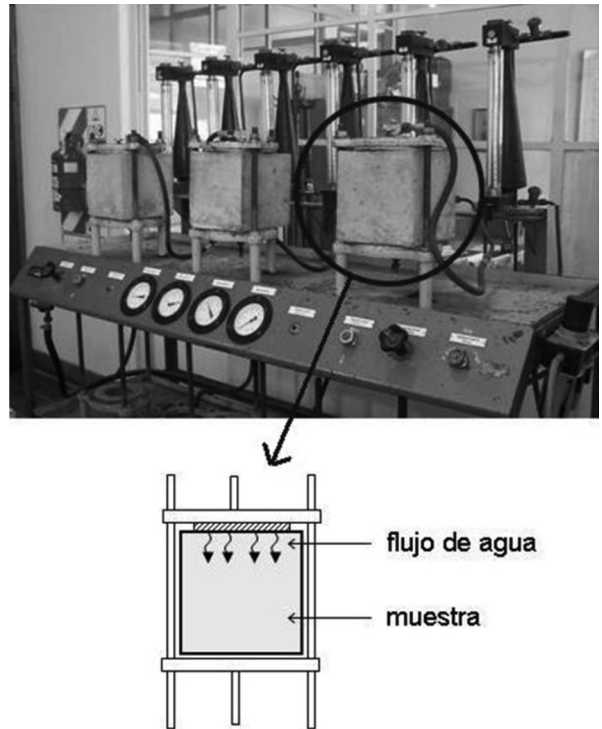


Figura 2. Permeámetro empleado en el ensayo de penetración de agua a presión.

En la Figura 4 se presentan los perfiles de penetración de agua. El eje de las abscisas representa el diámetro interno (10 cm) del área de ensayo, donde cada división corresponde a los puntos de medición. En la Figura 5 se muestran las penetraciones medias y máximas obtenidas junto con los límites establecidos en el Reglamento CIRSOC 201 [10]. En todos los casos los valores informados corresponden al promedio de tres muestras de ensayo.

Desde el punto de vista de la permeabilidad puede observarse un claro comportamiento diferencial entre los hormigones de diferente nivel resistente. Es de destacar que el hormigón H-04 evidencia un buen comportamiento, presentando penetraciones media y máxima por debajo de los límites máximos



### H-04



### H-06



Figura 3. Frentes de penetración de agua.

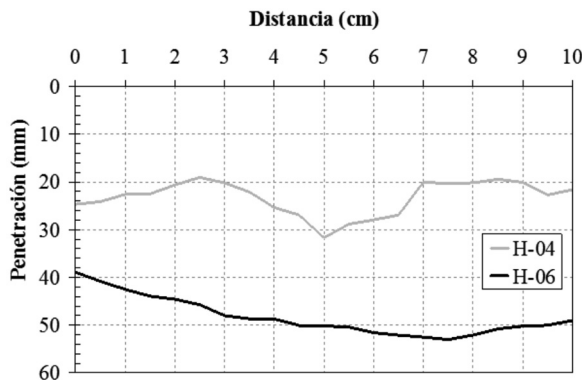


Figura 4. Perfiles de penetración de agua.

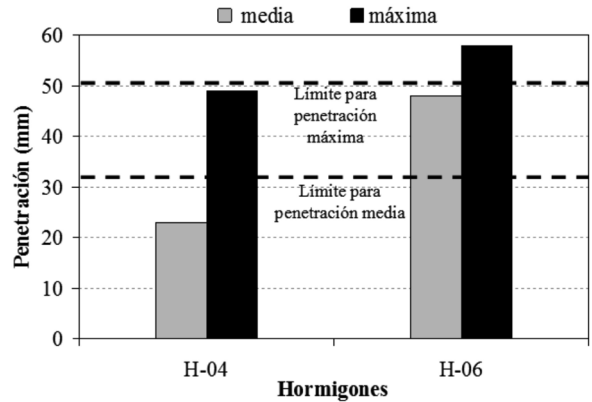


Figura 5. Penetraciones medias y máximas obtenidas en los hormigones H-04 y H-06.

establecidos en el Reglamento CIRSOC 201: 2005 [10], por lo cual puede indicarse que frente a este parámetro, presenta un comportamiento aceptable desde el punto de vista de la permeabilidad.

En el caso del hormigón H-06, dichos límites son superados debido a la alta porosidad de la matriz en relación con la razón a/c respectiva. Sin embargo, es de destacar que las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, por lo que, considerando que para aprovechar todo el potencial de hidratación del cemento CPP, se requeriría un mayor tiempo de curado. Es esperable que evaluaciones efectuadas a edades mayores evidencien mejor comportamiento. Esto último puede sustentarse en el comportamiento resistente observado a 28 y 90 días.

### Succión capilar

Existen estructuras, como las edificaciones, donde la permeabilidad no representa el parámetro adecuado para caracterizarlas desde el punto de vista durable, debido a que en condiciones reales de exposición no se hayan sometidas a un gradiente de presiones hidrostáticas. Habitualmente estas estructuras se encuentran sujetas a ciclos alternados de humedecimiento y secado, siendo la absorción de agua por capilaridad el mecanismo de transporte que mejor lo representa.

La cuantificación del movimiento de agua por capilaridad se llevó a cabo según IRAM 1871:2004 [11]. La misma se basa en el método gravimétrico directo. La técnica consiste en evaluar a intervalos de tiempo prefijados, el incremento de masa que experimentan muestras en contacto con agua, como consecuencia del ascenso del líquido por capilaridad (Figura 6). Los parámetros de caracterización del fenómeno evaluado son la Capacidad (C) y la Velocidad de succión capilar (S). Los valores informados corresponden, en todos los casos, al promedio de 5 determinaciones.

Las muestras de 50 mm de espesor por 100 mm de diámetro, se obtuvieron del aserrado efectuado a una distancia de 30 mm del la base de probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura (Figura 7).

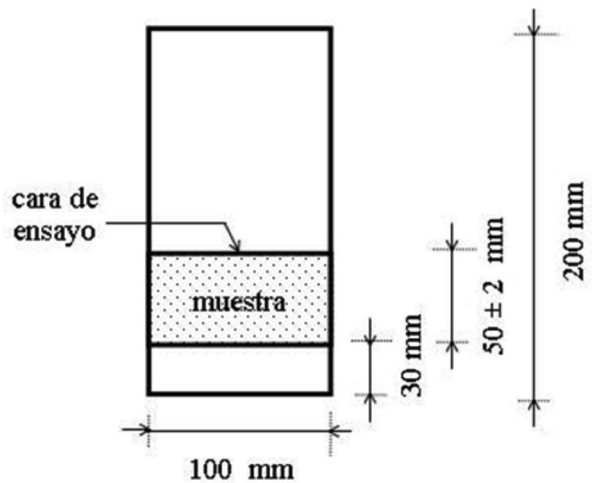


Figura 7. Muestra de ensayo de succión capilar.

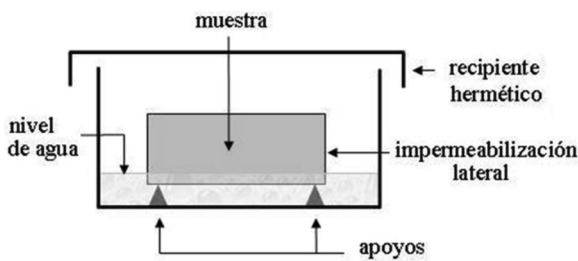


Figura 6. Esquema del ensayo de succión capilar.

En la Figura 8 se presentan las curvas promedio obtenidas en el ensayo, y en la Tabla 5 se informan los magnitudes obtenidas de la velocidad y capacidad de succión capilar, junto con los valores estadísticos de dispersión.

Respecto al movimiento de agua por capilaridad y en correspondencia con los resultados obtenidos en la evaluación de la permeabilidad, se destaca el mejor desempeño del hormigón H-04 en comparación con H-06.

Sin embargo, en este caso es de destacar que a la edad de 28 días, ambos hormigones cumplen con el límite máximo de velocidad de succión capilar de  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  establecido en el Reglamento CIRSOC 201:2005 [10], para el caso

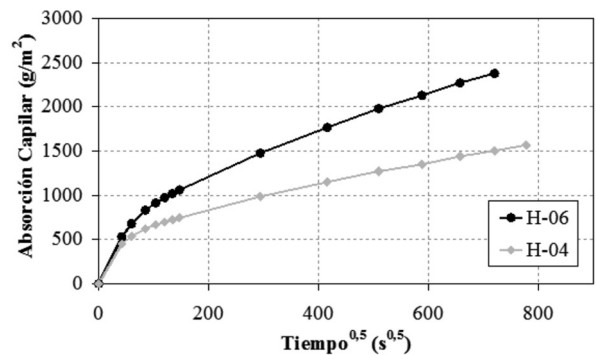


Figura 8. Curvas de succión capilar.

de estructuras en contacto con el medio ambiente. Estos resultados dan evidencia de la aptitud del empleo del cemento CPP para estructuras donde el transporte de materia a través del hormigón se produce por capilaridad.

Al comparar los resultados de succión capilar con los de penetración de agua a presión puede notarse que el primero cumple los límites impuestos por el Reglamento CIRSOC 201:2005, mientras que en el segundo método el hormigón H-06 resulta no conforme. Esto no es habitual, siendo usual que el límite presentado para la velocidad de absorción capilar sea un parámetro más exigente que el de penetración de agua a presión [12].

**Tabla 5.** Parámetros de succión capilar.

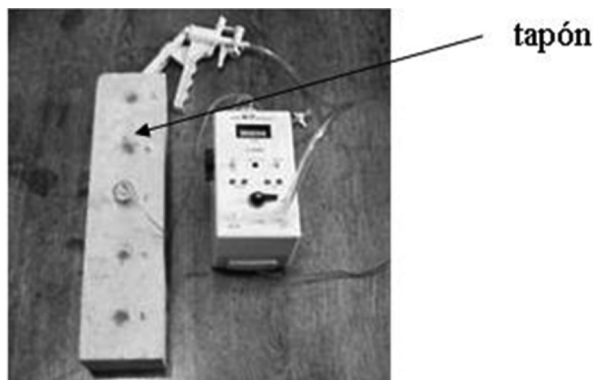
Hormigones		H-04	H-06
Velocidad (S)	S (g/(m <sup>2</sup> •s <sup>0,5</sup> ))	1,6	2,9
	R <sup>2</sup>	0,93	0,96
Capacidad (C)	C (g/m <sup>2</sup> )	1337	2379
	σ (g/m <sup>2</sup> )	103	13
	CV	7,7	0,6

**Permeabilidad al aire**

Otro de los mecanismos de transporte directamente vinculado con la calidad del hormigón de recubrimiento lo constituye la permeabilidad al aire. En este caso la evaluación se llevó a cabo con un equipo comercial (POROSCOPE modelo P 6000) (Figura 9), cuyo funcionamiento se basa en el método de [13].

El método empleado consiste en conformar una celda de ensayo, alcanzar una determinada presión de aire en la cámara y evaluar el tiempo en que la presión varía un cierto valor. A este valor, expresado en segundos, se lo vincula con la permeabilidad al aire del material.

La cámara se realiza desde la superficie del hormigón endurecido. Para ello se efectúa, mediante una mecha, un orificio de 10 mm de diámetro y 40 mm de profundidad, luego se introduce un tapón de goma, desde la superficie hasta una profundidad de 20mm, con el fin de



**Figura 9.** Permeámetro de aire.

asegurar un correcto sellado, quedando de esta forma conformada la cámara de 10 mm de diámetro por 20mm de profundidad.

Para la realización de este ensayo se moldearon probetas prismáticas de 70x100x430mm sobre las cuales se conformaron 5 celdas de ensayo. Los valores informados en la Tabla 6 corresponden al promedio de las lecturas realizadas en cada celda.

Para ambos grupos de hormigones se observa que al aumentar la razón a/c se reduce el tiempo de ensayo. Un menor tiempo indica que el aire fluye más rápidamente por la estructura porosa del hormigón de recubrimiento, por resultar más abierta y presentar un mayor nivel de conectividad entre poros.

En función del rango tentativo establecido por el fabricante del equipo, la calidad del hormigón de recubrimiento resultaría “adecuada” en el caso del hormigón H-04 y “no muy buena” en el caso del H-06. Sin embargo, hay que destacar que se trata de una clasificación meramente orientativa. Por otro lado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las propiedades anteriormente evaluadas, es esperable que a edades mayores la acción puzolánica aumente la tortuosidad y desconexión de poros.

**Migración de cloruro**

Este método se encuentra normalizado según NT Build 492 [14]. El procedimiento determina la resistencia del hormigón a la penetración de cloruro cuando es sometido a un gradiente de potencial eléctrico. El proceso se desarrolla en estado no estacionario, y no se ha establecido una comparación fehaciente con métodos de ingreso de cloruro por difusión.

**Tabla 6.** Permeabilidad al aire.

Hormigones	Lecturas (s)
H-04	107
H-06	87



La técnica consiste en aplicar en forma axial un campo eléctrico a una rodaja cilíndrica de hormigón saturado, de 100 mm de diámetro por 50 mm de espesor (Figura 10). Luego de un período bajo la aplicación de un determinado voltaje (ambos dependen de la conductividad del hormigón), la muestra es partida y rociada con solución de nitrato de plata 0,1M.

La profundidad de penetración de cloruro puede medirse a partir del frente visible debido a la precipitación de cloruro de plata (Figura 11). Esta profundidad, junto con los parámetros de ensayo, permite el cálculo del coeficiente de migración de cloruro.



Figura 10. Ensayo de migración de cloruro.

Aunque la duración no afecta sensiblemente el resultado del ensayo, se ha demostrado que la temperatura y el espesor de la muestra pueden tener grandes influencias [15]. La primera se ve asociada a la dependencia de la actividad iónica con la temperatura, mientras que la segunda se relaciona mayormente a la disminución del gradiente de potencial eléctrico.

Respecto a la concentración de cloruro total que representa el frente de avance teñido con la solución de nitrato de plata 0,1M, debe decirse que la misma se encuentra entre 0,05 y 0,075% en peso del hormigón [16]. En la norma NT Build 492 se estipula un valor en torno a 0,07N para hormigones elaborado con cemento Portland normal.

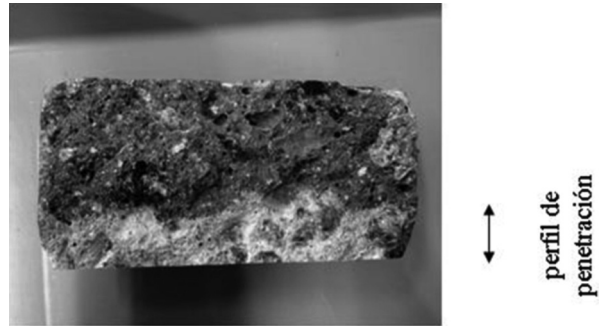


Figura 11. Muestra ensayada según CTH.

El cálculo del coeficiente de migración por el método CTH se realizó mediante la Ecuación 1 [16], deducida a partir de la ecuación de Nernst-Planck, despreciando el término difusivo debido al gradiente de concentración. Los parámetros E y  $\alpha$  son calculados según las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

El coeficiente de migración de cloruro puede ser utilizado como parámetro prescriptivo, y también como parámetro prestacional, teniendo en cuenta eventuales afectaciones de variables ambientales que modifican principalmente el grado de saturación del hormigón.

$$D_{CTH} = \frac{R \cdot T}{Z \cdot F \cdot E} \left( \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \right) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$E = \frac{\Delta\phi - 2}{L} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{R \cdot T}{Z \cdot F \cdot \Delta\phi}} \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{c_d}{c_0} \right) \quad \text{(Ecuación 3)}$$

En la Figura 12 se muestran los perfiles de penetración de cloruro obtenidos al aplicar un potencial de 40V. Pueden verse los perfiles para cada muestra ensayada, que permite apreciar una dispersión de resultados baja.

De acuerdo a estos perfiles, los coeficientes de migración de cloruro resultaron 4,9 y 14 m<sup>2</sup>/s para

los hormigones H-04 y H-06, respectivamente. La diferenciación de acuerdo a la relación a/c de cada hormigón resulta significativa y acorde a las porosidades de cada uno.

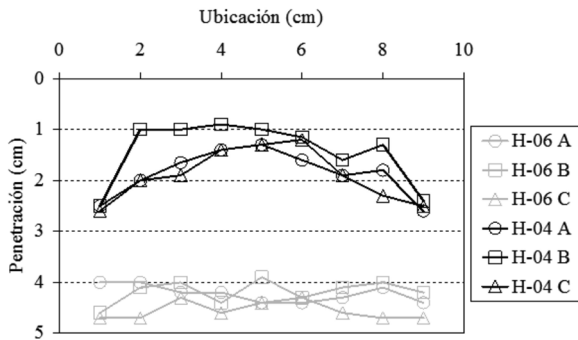


Figura 12. Resultados de migración de cloruro.

### Consistencia de resultados

Respecto a los valores obtenidos mediante los métodos aplicados, puede observarse una sensibilidad diferenciada de cada método a los hormigones H-04 y H-06, con estructuras de poro claramente disímiles en relación a la razón a/c empleada. En la Figura 13 se muestran los resultados relativos tomando como referencia el promedio de resultados entre ambos hormigones, con valor 1.

Los resultados de cada ensayo se comparan con este valor de referencia. En el caso de la permeabilidad al aire, los datos se presentan mediante las inversas de los valores determinados experimentalmente. Los datos del hormigón H-04 presentan en todos los casos indicadores de menor permeabilidad, y por lo tanto valores menores a 1, y los datos del hormigón H-06 evidencian un comportamiento opuesto. Los distintos métodos se han ordenado comenzando por el de mayor sensibilidad, migración de cloruro, y siguiendo en sentido horario con sensibilidades decrecientes hasta la absorción de agua en 24h y la porosidad, determinada mediante este ensayo, como los métodos menos eficaces para determinar las propiedades de transporte del hormigón.

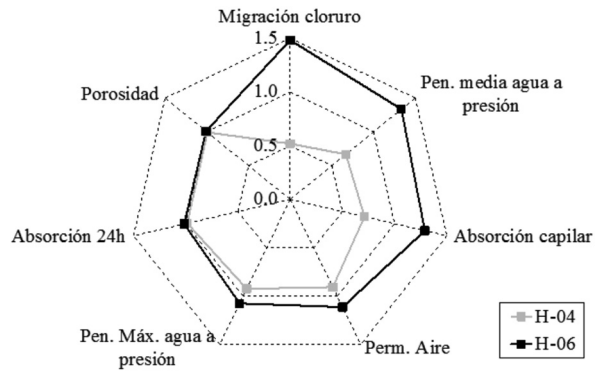


Figura 13. Consistencia de resultados.

### CONCLUSIONES

Se han presentado valoraciones de las propiedades de transporte de hormigones elaborados con Cemento Portland Puzolánico comercial (CPP) curados en forma normalizada. Se observa el mejor desempeño del hormigón H-04 respecto del hormigón H-06. A pesar del lento desarrollo de la hidratación característica de este tipo de cemento, los resultados obtenidos a 28 días muestran efectos sumamente positivos de la acción puzolánica de la adición como reemplazo parcial del clínquer.

Destacando que las evaluaciones fueron efectuadas a los 28 días, y considerando el óptimo nivel resistente evidenciado a los 90 días, incluso por el hormigón H-06, es esperable que a edades mayores se obtengan mejores resultados desde el punto de vista durable, siempre y cuando se garanticen adecuadas condiciones de curado.

Los resultados demuestran la potencialidad del uso del cemento CPP en ambientes agresivos, mostrando resultados en cumplimiento con los requisitos del hormigón para estos tipos de ambientes. También se presentaron evaluaciones complementarias que permiten asociar el cumplimiento de estos límites con la prestación potencial que el material demuestre en servicio.

## REFERENCIAS

- 1.- Torrent, R. Nuevo Enfoque para Asegurar la Vida Útil de Estructuras de Hormigón Armado. Memorias XIV Jornadas Chilenas del Hormigón. Valdivia, Chile, octubre 2003.
- 2.- IRAM 50000. Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires, Argentina, 2000.
- 3.- ASTM C 192/C 192M. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in the Laboratory. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2007.
- 4.- ASTM C 143/C 143M. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2008.
- 5.- ASTM C 138/C 138M. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2001.
- 6.- ASTM C 231. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2008.
- 7.- ASTM C 39/C 39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2005
- 8.- ASTM C 642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshonocken, PA, USA, 2006.
- 9.- IRAM 1554. Hormigón de cemento pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires, Argentina, 1983.
- 10.- CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles. Buenos Aires, Argentina, 2005.
- 11.- IRAM 1871. Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires, Argentina, 2004.
- 12.- Villagrán Zaccardi, Y. A., Taus, V. L., Di Maio, A. A. Apreciaciones sobre el uso de parámetros prescriptivos para asegurar la durabilidad de estructuras de hormigón armado en ambiente marino. Memorias 1er. Simposio Técnico Iberoamericano sobre Estructuras y Materiales para la Construcción. Buenos Aires, Argentina, 36-53, septiembre 2010.
- 13.- Figg, J. W. Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete, Mag. Concr. Res., 25 (85), 213-219, 1973.

14.- NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordest. Espoo, Finlandia, 1999.

15.- de Rooij, M. R., van Dalen, S. M., Bouwmeester, W. J., Koenders, E. A. B. Experimental exercises with the RCM-Method. Proceedings 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec, Canada, 207 - 224, September 2006.

16.- Baroghel-Bouny, V. Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part II: Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters. Proceedings Third RILEM workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete. Madrid, Spain, 137-163, September 2002.