

CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA POROSA DEL HORMIGÓN

Taus, V. L.¹

RESUMEN

En el presente trabajo se estudian hormigones de diferentes características tecnológicas desde el punto de vista durable. Se analiza comparativamente la estructura porosa de distintos hormigones mediante diferentes técnicas de ensayo que permiten evaluar propiedades relacionadas con la penetrabilidad de los agentes agresivos del medio ambiente a la red porosa del hormigón, tales como la permeabilidad al aire, la penetración de agua a presión y la absorción capilar. Se estudia tal comportamiento a través de la evaluación que el estacionamiento prolongado en ambiente húmedo produce sobre la hidratación del hormigón. Para ello se elaboraron hormigones de diferentes niveles resistentes, algunos de los cuales fueron curados en forma normalizada, mientras que otros se mantuvieron en ambiente húmedo durante un período próximo a los 7 meses.

INTRODUCCIÓN

Es conocido que el hormigón de una estructura por el sólo hecho de ser lo suficientemente resistente, no asegura un comportamiento y aptitud en servicio adecuados durante su vida útil. La permanencia en el tiempo de sus características resistentes funcionales, estéticas y de seguridad estará condicionada no sólo por la calidad intrínseca del hormigón, sino también por la interacción con el medio ambiente que lo rodea para las condiciones particulares de emplazamiento. Es así que estructuras ejecutadas ignorando este concepto, pero cumpliendo estrictamente los requisitos resistentes, al cabo de algunos años comenzaron a mostrar signos visibles de deterioro (1).

Estas razones motivaron el estudio e investigación de las cuestiones relacionadas con la "capacidad" de la estructura para mantener tales propiedades durante el lapso de tiempo para la cual había sido proyectada. Se introdujeron así los conceptos de vida útil o en servicio de las estructuras.

Hoy en día los temas que involucran estos conceptos se encuentran, en algunos casos, contemplados en normativas y reglamentaciones mientras que en otros aún son materia de estudio y análisis. Consecuentemente, existe una fuerte tendencia hacia la obtención de metodologías que permitan evaluar aquellas propiedades de los hormigones que se encuentran directamente relacionados con su durabilidad (2-3). Metodologías que, en la mayoría de los casos dependen de manera directa de la facilidad con la que los agentes agresivos ingresan y se mueven en el interior de la estructura porosa del hormigón.

¹ Becario CIC-LEMIT.

Directores: A. A. Di Maio – (Investigador CONICET-LEMIT)

L. P. Traversa – (Investigador CIC-LEMIT - Director del LEMIT)

valetaus@hotmail.com

La mayoría de los ataques al hormigón se producen por el ingreso de agentes agresivos en su masa desde el medio circundante ya sea por difusión y/o absorción capilar. Este ingreso será tanto más importante dependiendo de la calidad del hormigón de los primeros centímetros exteriores de las estructuras, que se denomina hormigón de recubrimiento. Esta capa actúa como barrera física de protección condicionando el ingreso de las sustancias agresivas externas que pueden degradar tanto al hormigón como a las armaduras. Su calidad dependerá de la estructura de poros y, fundamentalmente, de la distribución y conectividad de los mismos (2,4).

Se recurre entonces al estudio de la estructura porosa del hormigón a través de índices característicos, que representan a un determinado mecanismo de transporte. En el hormigón los agentes externos no ingresan por un único mecanismo de transporte, sino que habitualmente se superponen y actúan conjuntamente. Por ello para analizar el comportamiento integral de un determinado hormigón frente a las diferentes formas de transporte, se aplican técnicas de laboratorio que permiten cuantificar la calidad del mismo en lo que a su estructura porosa se refiere.

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar las características que adquiere la estructura porosa de hormigones de diferentes niveles de resistencia cuando son sometidos a una misma condición de exposición (ambiente húmedo) durante tiempos diferenciados (28 días y 210 días) y su comportamiento respecto de los diferentes mecanismos de transporte. Para ello sobre los hormigones en estudio se realizan ensayos de absorción, densidad, porosidad, penetración de agua a presión, permeabilidad al aire y absorción capilar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se evaluaron hormigones de razones agua-cemento 0.40, 0.50, y 0.60, elaborados con cemento portland compuesto (CPC 40), arena natural silicea y piedra partida granítica de tamaño máximo 25.4 mm. Una serie de cada uno de dichos hormigones, fue curada en cámara húmeda ($T: 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; HR: 95 %) durante 28 días (28d c.h.) y otra se mantuvo estacionada durante 210 días en ambiente húmedo con una humedad relativa superior al 90% (210d e.a.h.), con el fin de determinar la influencia que la exposición prolongada en ambiente húmedo ejerce sobre las diferentes propiedades, fundamentalmente las relacionadas con el transporte de fluidos a través de la estructura porosa del hormigón.

Materiales y mezclas

En la Tabla 1 se informan las proporciones de los materiales y las propiedades en estado fresco de cada una de los hormigones en estudio. Como parámetro de caracterización de estos últimos se determinó la resistencia a compresión a la edad de 28 días sobre probetas cilíndricas de 150x300 mm según Norma IRAM 1546, obteniendo niveles de resistencia comprendidos entre 24 y 38 MPa.

Tabla 1: Proporciones de las mezclas en kg/m³ y propiedades en estado fresco.

Materiales constituyentes y propiedades en estado fresco		Hormigones		
		Razón a/c		
		0.40	0.50	0.60
Agua		165	165	165
Cemento		412	330	275
Agregado fino	A. Argentina	165	178	189
	A. Oriental	655	712	749
Agregado grueso	PPG 6-20	200	200	200
	PPG 10-30	800	800	800
Asentamiento (mm)		70	65	60
Contenido de aire (%)		2.1	2.3	3.3
PUV (kg/m ³)		2423	2408	2380

Propiedades evaluadas

Absorción de agua, densidad y porosidad

En la Tabla 2 se presentan, para las dos edades evaluadas los valores de absorción de agua en 24 hs y las densidades seca (Ds) y en condición saturada superficie seca (Dsss) determinados de acuerdo a la norma ASTM C 642-90. Además, se informa la porosidad calculada como porcentaje del volumen de agua absorbida en 24 hs respecto del volumen total.

Del análisis comparativo entre los hormigones curados durante 28 días en cámara húmeda y los estacionados durante 210 días en ambiente húmedo se desprende que el aumento en el tiempo de permanencia bajo similares condiciones de humedad origina un hormigón de menor porosidad y absorción. En cuanto a la densidad, tanto la seca como la saturada superficie seca, se esperaría un aumento de la misma debido a una mayor hidratación del cemento, sin embargo la menor densidad observada en el caso de la exposición húmeda de 210 días resulta tan poco significativa, que podría suponerse se encuentra dentro del rango de dispersión propio del ensayo.

Tabla 2: Absorción, porosidad y densidades de los hormigones en estudio.

Propiedades	Hormigones					
	Curado en cámara húmeda durante 28 días			Estacionado en ambiente húmedo durante 210 días		
	Razón a/c					
	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60
Absorción (%)	5.08	5.25	5.29	4.88	4.88	5.08
Porosidad (%)	11.84	11.95	12.07	11.28	11.19	11.57
Dsss (kg/m ³)	2434	2411	2411	2424	2404	2396
Ds (kg/m ³)	2316	2293	2292	2312	2292	2280

Penetración de agua a presión

La permeabilidad suele utilizarse como parámetro de caracterización de la aptitud que un cuerpo poroso (hormigón) ofrece a ser penetrado por un fluido cuando aquél se encuentra sometido a un diferencial de presión. Existen estructuras en las que dicho parámetro permite evaluar tal capacidad, como lo es el caso de un dique o un depósito. Una metodología empleada para calificar esta propiedad la constituye el ensayo de penetración de agua a presión. El procedimiento para la ejecución del mismo se llevó a cabo siguiendo la indicaciones de la Norma IRAM 1554 (5).

El equipo utilizado consiste en un permeámetro de carga variable que permite aplicar escalones de agua a presión sobre las muestras bajo ensayo. El ensayo consiste básicamente en someter a la probeta a una serie de escalones de presión variables durante un intervalo de tiempo normalizado. La interpretación del mismo lo constituye la medición del perfil de agua penetrado en la muestra.

Para llevar a cabo este ensayo se moldearon probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 150 mm de altura. Sobre la cara de ensayo (cara superior o de moldeo) se coloca un aro de goma para evitar posibles pérdidas de agua, el que presenta un área circular que delimita la zona de contacto del agua con la probeta, siendo su magnitud dependiente de las dimensiones de la muestra bajo ensayo.

Durante el ensayo se incrementa la presión de agua según intervalos de tiempo prefijados por Norma, desde 1 kg/cm^2 , al inicio del ensayo, hasta 7 kg/cm^2 a la finalización del mismo. Luego la muestra es seccionada en dos partes, pudiéndose determinar en cada una de ellas el perfil de agua penetrado. Dicho perfil es relevado al milímetro determinándose las penetraciones media y máxima, las que según la reglamentación vigente no deben ser superiores a 30 mm y 50 mm, respectivamente (Proyecto de Reglamento CIRSOC 201-2002) (6).

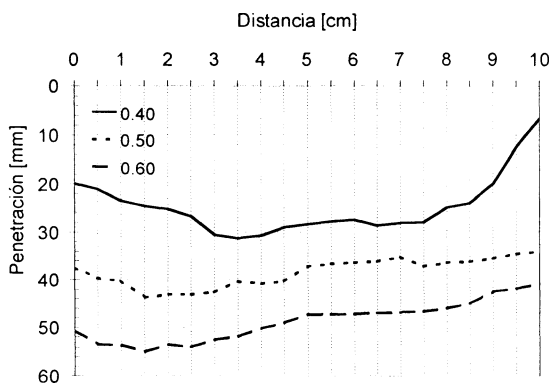


Figura 3: Perfiles de penetración de agua en probetas de razones agua-cemento 0.40, 0.50 y 0.60 curadas en cámara húmeda durante 28 días (28d c.h.).

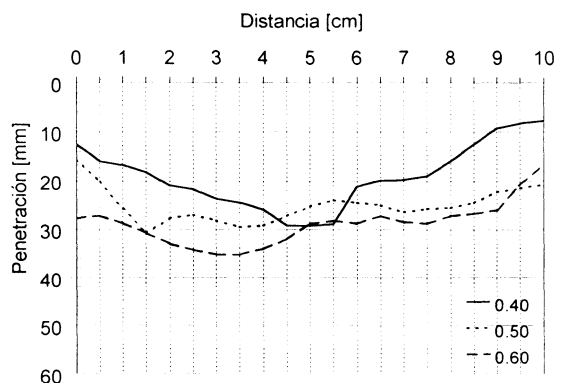


Figura 4: Perfiles de penetración de agua en probetas de razones agua-cemento 0.40, 0.50 y 0.60 estacionadas en ambiente húmedo durante 210 días (210d e.a.h.).

En las Figs. 3 y 4 se presentan los perfiles de penetración de agua de los distintos hormigones curados en cámara húmeda durante 28 días y estacionados en ambiente húmedo durante 210 días respectivamente, estos resultados corresponden al promedio de tres muestras de ensayo. Puede advertirse, en el caso de los hormigones estacionados 210 días en ambiente húmedo, que si bien existe una diferenciación entre las penetraciones medias en función de la razón agua-cemento, un tiempo de exposición a ambiente húmedo, excesivamente prolongado como el que se estudia, produce un cerramiento de la estructura porosa tal que los respectivos perfiles de penetración exhiben una cierta tendencia a la superposición (Fig. 4).

En la Fig. 5 se han representado en forma comparativa los perfiles de penetración para las distintas razones agua-cemento de los hormigones de 28 y 210 días de permanencia en ambiente húmedo (28d c.h. y 210d e.a.h.). En todos los casos se encontró que la exposición prolongada en un ambiente de humedad relativa elevada da como resultado un hormigón de menor penetración. Esto se debe a que hay un mayor desarrollo de los productos de hidratación no sólo como consecuencia del tiempo transcurrido sino además por las condiciones óptimas (temperatura y humedad) en las que este fenómeno continúa su evolución a través del tiempo. El mayor volumen de los productos de hidratación genera una menor porosidad que se traduce en un hormigón de mayor calidad. La menor penetración de los perfiles de agua encontrada en los distintos hormigones estacionados en ambiente húmedo durante 210 días se torna más significativa cuanto mayor es la razón agua-cemento.

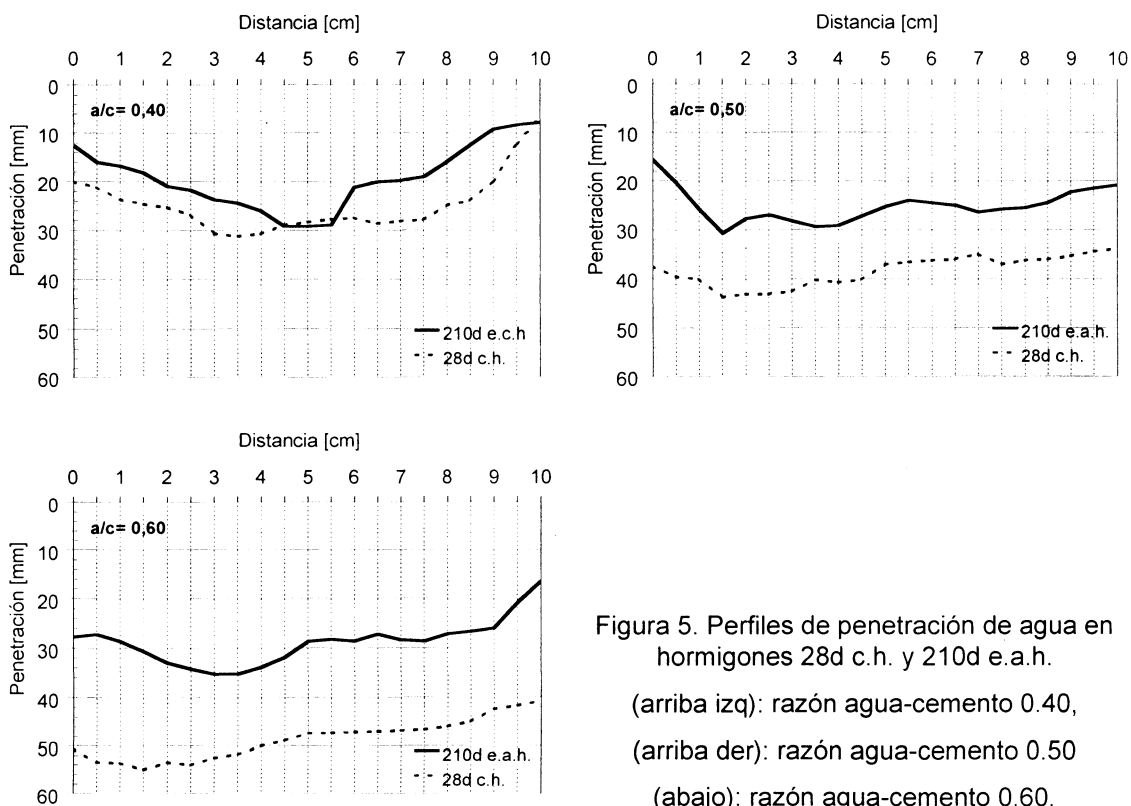


Figura 5. Perfiles de penetración de agua en hormigones 28d c.h. y 210d e.a.h.
 (arriba izq): razón agua-cemento 0.40,
 (arriba der): razón agua-cemento 0.50
 (abajo): razón agua-cemento 0.60.

Tanto las penetraciones medias como las máximas son inferiores a los límites impuestos por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 en el caso de los hormigones expuestos a ambiente húmedo durante 210 días. Sin embargo en el caso del curado húmedo a 28 días la penetración media es excedida en los hormigones de razones agua-cemento 0.50 y 0.60, mientras que la máxima es superada en el hormigón de razón agua-cemento 0.60.

Absorción Capilar

Otro de los fenómenos de transporte que se produce en el hormigón endurecido lo constituye la succión capilar. Este mecanismo de transporte es inducido por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del hormigón. Es una propiedad hidráulica fácilmente mensurable, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar (7, 8). Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos ambientales (9).

Mediante este ensayo se obtiene otro parámetro representativo de la estructura porosa del hormigón y su respuesta al ingreso de los agentes agresivos desde el exterior. Este parámetro es cuantificado a través de la velocidad de succión capilar o "sorptivity", que representa la velocidad de penetración del líquido por capilaridad.

Los ensayos se realizaron siguiendo las especificaciones indicadas en el Proyecto de Norma IRAM 1871 (10). El ensayo consiste en el registro a intervalos de tiempos prefijados según Norma de la cantidad de agua absorbida por la muestra cuando una de las caras de la misma se encuentra en contacto con agua.

En los ensayos realizados se emplearon como muestras de ensayo prismas de 70x100x50 mm que fueron acondicionados mediante un secado en estufa a 50 °C hasta peso constante. Esta instancia del preacondicionamiento es de suma importancia dado que los resultados de ensayo son fuertemente dependientes del contenido de humedad inicial de la muestra. (7,8,10). Con el fin de lograr una impermeabilización lateral, las muestras fueron pintadas con pintura epoxi. Finalmente se llevó a cabo el ensayo colocando una de las caras de las probetas inmersa en agua una profundidad de 3mm.

En la Fig. 6 se presentan las curvas de absorción capilar correspondientes a hormigones de razones agua-cemento 0.40, 0.50 y 0.60 curados en cámara húmeda durante 28 días y estacionados en ambiente húmedo durante 210 días. Se puede observar que para igual razón agua-cemento un mayor tiempo de exposición en ambiente húmedo implica una menor absorción capilar. Esto es debido a que la incidencia de la porosidad capilar en los mecanismos de transporte se atenúa cuando los procesos de hidratación continúan en el tiempo como consecuencia de la reducción simultánea de la conectividad y del tamaño (radio) de los capilares. El curado húmedo induce por lo tanto un menor volumen poroso, efecto que se torna más significativo con la duración del mismo.

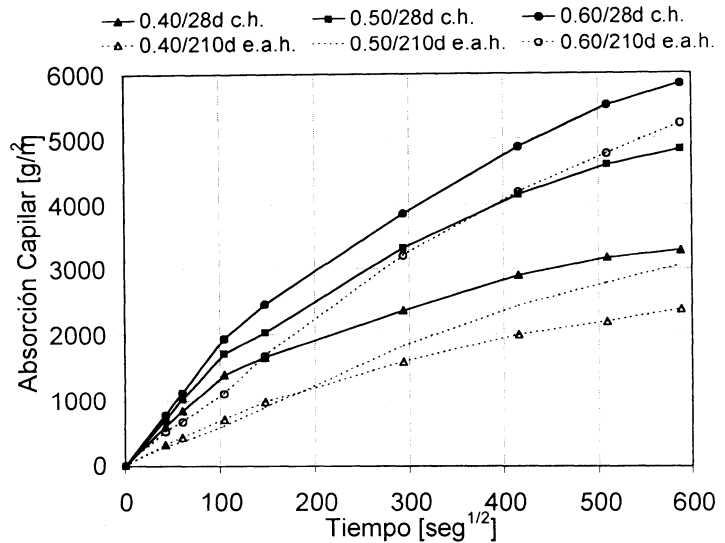


Figura 6: Absorción capilar medida en hormigones 28d c.h. y 210d e.a.h.

En cuanto a la velocidad de succión capilar (Tabla 3) se observa que este efecto se hace más significativo conforme se reduce la razón agua-cemento, así, para un valor de la razón agua-cemento de 0.40 la velocidad de absorción capilar de los hormigones estacionados 210 días en ambiente húmedo se reduce aproximadamente un 30% respecto a la de un curado húmedo de tan sólo un mes, mientras que para la razón 0.60 la reducción es de sólo el 15%. Esto puede atribuirse a dos efectos combinados: por un lado al hecho de que para un mismo tiempo de curado la fracción conectada (porosidad capilar) se reduce más rápidamente en razones agua-cemento bajas, y por el otro a la incidencia de la prolongación del tiempo de exposición en condiciones de humedad y temperatura propicias para el desarrollo de la hidratación.

Tabla 3: Velocidad de ascensión capilar (Vs) de los hormigones en estudio.

Razón agua-cemento y condiciones de exposición	Velocidad de Succión Capilar, V_s [g/(m ² *seg ^{1/2})]	Coefficiente de correlación lineal (R^2)
0.40 / 28d c.h.	6.52	0.939
0.50 / 28d c.h.	8.04	0.963
0.60 / 28d c.h.	10.49	0.973
0.40 / 210d e.a.h.	4.45	0.986
0.50 / 210d e.a.h.	5.90	0.998
0.60 / 210d e.a.h.	8.91	0.989

Permeabilidad al aire

Otro parámetro de caracterización de la estructura de poros y capilares del hormigón lo constituye la evaluación de la permeabilidad a los gases. Existen numerosos métodos de evaluación. En todos ellos se opera bajo el mismo principio: se genera una sobrepresión o una depresión en una cámara convenientemente sellada al hormigón de recubrimiento, y se mide la velocidad con que la presión en la cámara retorna a la situación de equilibrio. Este valor se asocia con la permeabilidad del hormigón a los gases.

En este caso se trabajó con un equipo comercial, POROSCOPE modelo P 6000, único en el país, que permite mediante la evaluación de la permeabilidad al aire del hormigón, estudiar la calidad del hormigón de recubrimiento. El mismo está basado en el método de Figg. El método consiste en conformar una celda de ensayo, alcanzar una determinada presión de aire en la cámara y evaluar el tiempo en que la presión se restituye al valor inicial. Este tiempo se emplea como parámetro de caracterización de la permeabilidad al aire del hormigón, considerándose que cuanto mayor es este tiempo tanto mas cerrado y menos poroso resulta el hormigón de recubrimiento.

Para la realización de este ensayo se moldearon probetas prismáticas de 70x100x430mm sobre las cuales se conformaron 5 celdas de ensayo. Por lo que los valores que se informan corresponden al promedio de las determinaciones sobre estos 5 orificios.

En la Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos para las distintas razones agua-cemento de los hormigones curados durante 28 días en cámara húmeda y los expuestos durante 210 días en ambiente húmedo. Se observa para ambos grupos de hormigones que al aumentar la razón agua-cemento se reduce el tiempo de ensayo. Esto implica que a mayor razón agua-cemento la estructura del hormigón resulta más permeable. Si se comparan ambas curvas se encuentra que el tiempo de ensayo para las razones agua-cemento más altas, si bien es superior en el caso del hormigón 210d e.a.h, no muestra una diferencia significativa en lo que respecta a su permeabilidad al aire. Durante el transcurso de la hidratación del cemento se produce la segmentación de los capilares y el llenado de poros y vacíos con los productos de hidratación, un mayor tiempo en condiciones de humedad y temperatura apropiadas hace que este proceso continúe y que el nivel de segmentación aumente con el mismo.

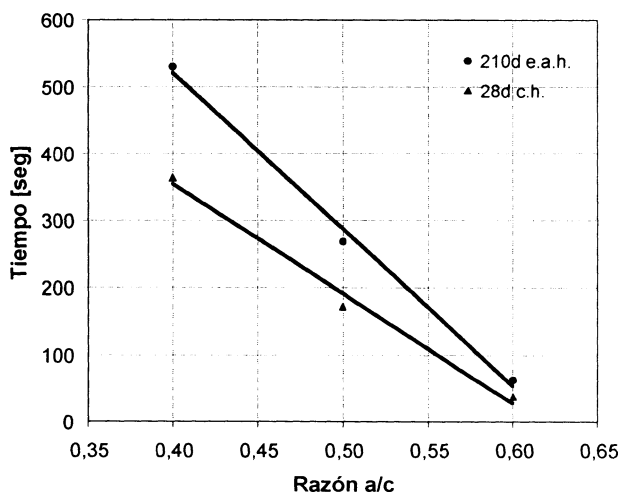


Figura 7: Permeabilidad al aire en hormigones 28d c.h. y 210d e.a.h.

CONSIDERACIONES FINALES

Del análisis de los parámetros representativos de las diferentes propiedades de transporte evaluadas en los hormigones en estudio surge que:

- Para el estudio de la calidad de un determinado hormigón desde el punto de vista durable, se requiere de la evaluación de diferentes propiedades relacionadas con la estructura interna de poros y capilares.
- Mediante la aplicación de distintas técnicas de ensayo de laboratorio pueden evaluarse en forma aislada los diferentes mecanismos de transporte a los que pueden estar sometidas las estructuras en condiciones reales de servicio. Un solo parámetro individual brinda una información incompleta y no es determinante en la evaluación de la calidad y durabilidad de un determinado hormigón, ya que habitualmente en las estructuras en servicio, tales fenómenos se superponen y actúan en forma conjunta. Se hace necesario, entonces, el análisis y estudio de todos los parámetros representativos de las diferentes propiedades del hormigón en forma integral, realizándose una investigación conjunta e interactiva entre los mismos.
- Los resultados obtenidos mediante las distintas metodologías de ensayo confirman el mejor comportamiento durable de los hormigones de mayor nivel resistente (menores razones agua-cemento) elaborados con el mismo conjunto de materiales y curados en condiciones similares.
- El estacionamiento en ambientes húmedos ($HR > 90\%$) durante un tiempo prolongado origina un refinamiento de los capilares y una disminución de los poros debido al desarrollo de los productos de hidratación. Este hecho se observa en todos los ensayos realizados.
- En el ensayo de penetración de agua a presión se advierte que el aumento del tiempo de exposición en un ambiente húmedo mejora las características del hormigón respecto a su permeabilidad. Se observa, en el caso de los hormigones estacionados en ambiente húmedo durante 210 días, que a pesar de que los correspondientes a las razones agua-cemento menores acusan mejor comportamiento, esta diferencia no es significativa respecto a los de mayor razón agua-cemento. Se concluye que para curados excesivamente prolongados como el estudiado, no existe una diferenciación importante de tal propiedad entre hormigones de distintos niveles resistentes. Otra cuestión importante de destacar es el hecho de que la mayor penetración de los perfiles de agua exhibida en los hormigones de mayor tiempo de exposición en ambiente húmedo se torna más importante para las razones agua-cemento más elevadas. Esto último puede deberse al hecho de que para razones agua-cemento altas existe un mayor volumen poroso (poros capilares conectados y no conectados) que puede ser ocupado por los productos de hidratación.
- La respuesta del hormigón frente a los ensayos de absorción capilar y permeabilidad al aire ponen en evidencia el mayor nivel de hidratación alcanzado en los hormigones expuestos durante 210 días a ambiente húmedo. Para igual razón agua-cemento un mayor tiempo de exposición implica una menor absorción capilar. En cuanto a la velocidad de succión capilar se observa que este efecto se hace más significativo

conforme se reduce la razón agua-cemento, lo que puede encontrar su explicación en el hecho de que para un mismo tiempo de curado la fracción conectada (porosidad capilar) se reduce más rápidamente en razones agua-cemento bajas.

Respecto a la permeabilidad al aire, se aprecia una tendencia similar a la observada en el ensayo de succión capilar. Para razones agua-cemento mayores se obtienen los menores tiempos de ensayo, asociado esto a la existencia de una matriz más interconectada. El aumento en el tiempo de exposición húmeda mejora sustancialmente su estructura porosa, pero sólo en el caso de las razones agua-cemento bajas; para razones agua-cemento mayores, se observan mejoras pero poco significativas.

REFERENCIAS

- (1) Di Maio, A. A. y Traversa, L. P. "Comportamiento de estructuras de hormigón armado construidas en distintos ambientes de la Provincia de Buenos Aires" Proc. XII Reunión Técnica AATH, La Plata, Argentina, 1995, pp. 415-426.
- (2) Fernández Luco, L. "Durabilidad del Hormigón Estructural". Proc. XIV Reunión Técnica AATH. Olavaria, Argentina. 2001, capítulo 1 pp. 1-45.
- (3) Di Maio, A. A. y L. P. Traversa. "Determinación de la calidad del hormigón de recubrimiento mediante la evaluación de la permeabilidad." Proc. IV Conferencia Científico-Técnica de la Construcción. La Habana, Cuba, 2000.
- (4) Eperjesi, L., Ferreyra Hirschi, E., Saralegui, G. y Giovambattista, A. "Influencia de las adiciones activas en la calidad del hormigón superficial." Proc. 1^{er} Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Bs As, Argentina, 1998, pp. 571-578.
- (5) IRAM 1554. Hormigón de Cemento Pórtland. "Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido", 1983.
- (6) CIRSOC 201-2002 "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón" (discusión pública).
- (7) Hall, C. "Water sorptivity of mortars and concretes: a review. Magazine of Concrete Research. Vol 41, N° 147, 1989, pp. 51-61.
- (8) Sabir, B. B., Wild, S. and O'Farrell, M. "A water sorptivity test for mortar and concrete." Materials and Structures. Vol 31. 1998, pp. 568-574.
- (9) CYTED. DURAR. "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado." 1997, pp. 117-121.
- (10) IRAM 1871 (en tratamiento). "Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido".
- (11) Taus, V. L. "Determinación de la Absorción Capilar en Hormigones Convencionales y Reciclados" Ciencia y Tecnología del Hormigón N° 10, 2003. pp 7-16.
- (12) Taus, V. L. "Evaluación de parámetros relacionados con la durabilidad del hormigón". Revista Hormigón N° 40, 2004. pp 51-60.