

1<sup>er</sup> Congreso Español sobre Hormigón Autocompactantes. Valencia, 18-19 de febrero 2008

## Permeabilidad de hormigones autocompactantes

**E.B. Bermejo Nuñez, A. Moragues Terrades, J.C. Gálvez Ruiz y M. Fernández Cánovas**

Dpto. de Ingeniería Civil-Construcción, Universidad Politécnica de Madrid, España

### RESUMEN

Los hormigones autocompactantes (HAC) son relativamente novedosos. Hasta ahora, los estudios desarrollados se han centrado en obtener dosificaciones óptimas para que estos hormigones presenten comportamiento en estado fresco que permita caracterizarlos como autocompactantes. Sin embargo, lo relativo a la durabilidad de los HAC es escaso, especialmente en el caso de hormigones de resistencias moderadas.

Este trabajo presenta los resultados de los ensayos de permeabilidad de HAC de resistencia característica 30 MPa, con objeto de estudiar uno de los aspectos importantes de la durabilidad. En los hormigones confeccionados se han realizado ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio, que permiten conocer el tamaño y distribución de poros, así como la porosidad total del hormigón. Además, se han completado los ensayos de porosimetría con los de penetración de agua bajo presión.

### 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), vigente en España, define la durabilidad del hormigón como “su capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas o químicas agresivas y proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos embebidos en el hormigón durante la vida de servicio de la estructura”.

El principal rasgo distintivo de los HAC frente a los hormigones convencionales es su comportamiento en estado fresco. Su composición es diferente, tienen un alto contenido de finos, incluyen aditivos en dosis mayores y reducen el contenido de árido grueso. A lo largo de los últimos años se ha estudiado de forma notable la influencia de estos parámetros en las características reológicas y mecánicas, existiendo, no obstante, lagunas en cuanto a algunos aspectos relacionados con su durabilidad.

Según diversos autores (Garrido, 2006; Fernández et al, 2007) este tipo de hormigón presenta una durabilidad igual o superior a la del hormigón convencional, que se justifica por su diferente micro-estructura. Sin embargo se ha encontrado, en general, una falta de relación de las características que pueden afectar a la durabilidad y resistencia con la porosidad.

En el estudio de la durabilidad es importante conocer la posibilidad de penetración de los agentes agresivos a través de la red de poros y capilares. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) clasifica a los poros en: *micro-poros* ( $\phi < 2$  nm), *meso-poros* ( $2 \text{ nm} < \phi < 50$  nm) y *macro-poros* ( $\phi > 50$  nm). De todos ellos, son los

## **Permeabilidad de hormigones autocompactantes**

mesoporos los que determinan en mayor medida el comportamiento frente a durabilidad por su mayor conexión.

### **1.1. Objetivos**

El objetivo del presente trabajo es estudiar la porosidad de HAC realizados con diferentes cementos y modificados con filler y relacionarla con la permeabilidad al agua bajo presión y con la resistencia a compresión.

Los hormigones elegidos para este estudio cumplen con las condiciones de fluidez y de cohesión adecuadas para ser caracterizados como HAC.

## **2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

### **2.1. Materiales empleados**

Se han utilizado los siguientes materiales:

#### **2.1.1. Cemento**

Los cementos ensayados, que cumplen con la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-07), han sido:

- CEM I 42,5 R.
- CEM II A/V 42,5 N.
- CEM II A/S 42,5 N.
- TIPO I 42,5 R/SR.
- CEM II A/P 42,5 R.
- CEM II A/V 42,5 R.
- TIPO BL II A/L 42,5 R.

#### **2.1.2. Áridos**

El árido empleado ha sido arena silícea de río y árido grueso rodado de naturaleza silícea. El tamaño máximo del árido se ha fijado en 16 mm. El módulo granulométrico de la arena ha sido 3,70 y el del árido grueso de 6,66.

#### **2.1.3. Adiciones**

Se han empleado dos tipos de adiciones:

- Filler calizo, que se ha utilizado con todos los cementos estudiados.
- Ceniza volante, procedente de la Central Térmica de Andorra (Teruel). Se ha empleado únicamente con el cemento sulfo-resistente (Tipo I 42,5 R/SR).

La cantidad máxima de adición a añadir al HAC ha sido 250 kg/m<sup>3</sup> de hormigón, si bien, cuando el cemento empleado contenía adición inerte de tipo calizo (L) se ha contabilizado ésta como parte de la cantidad de filler añadido.

#### **2.1.4. Aditivos**

En todas las dosificaciones se ha empleado el mismo aditivo superfluidificante, SIKA Viscocrete 3425, basado en policarboxilato modificado en base acuosa.

## **2.2. Ensayo de penetración de agua**

El ensayo de penetración de agua a presión (UNE-EN 12390-8) se realizó sobre probetas cilíndricas de 15  $\Phi$  x 30 cm a los 91 días de edad.

## **2.3. Ensayo de porosimetría**

Los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio se llevaron a cabo con un porosímetro modelo Autopore IV 9500, de Micromeritics, que opera hasta una presión de 33.000 psi (228 MPa) y cuyo rango de medida de diámetro de poro es de 0,006 hasta 175  $\mu$ m.

Los ensayos se realizaron a los 91 días de edad de las muestras. Los ensayos se han efectuado de acuerdo con norma ASTM D4404-84 (2004).

Aunque no existe consenso entre los investigadores respecto a cuáles deben ser las condiciones de preparación de la muestra, en nuestro caso el tratamiento previo elegido ha consistido en el secado de la misma a una temperatura de 40°C, hasta peso constante, y, en la posterior desgasificación durante 30 minutos mediante bomba de vacío.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Dosificaciones adoptadas para los hormigones**

La Tabla 1 presenta las dosificaciones empleadas para cada uno de los hormigones estudiados. Corresponden a 1 m<sup>3</sup> de hormigón, y las mismas han permitido obtener hormigones de resistencia característica superior a 30 N/mm<sup>2</sup> que cumplen con los requisitos de HAC en estado fresco.

**Tabla 1. Dosificaciones propuestas para cada hormigón estudiado**

<b>Hormigón</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Tipo de cemento</b>	I 42,5 R/SR	CEM II A/V 42,5 N	CEM II A/V 42,5 R	CEM I 42,5 R	I 42,5 R/SR	CEM II A/S 42,5 N	BL II A/L 42,5 R	CEM II A/P 42,5 R
<b>Tipo de adición</b>	Ceniza volante	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo
<b>Cemento (kg)</b>	280	300	325	350	325	350	375	350
<b>Adición (kg)</b>	200	200	200	200	220	200	156	200
<b>Agua (kg)</b>	140	150	162	193	179	193	206	193
<b>Arena (kg)</b>	960	960	960	960	960	960	960	960
<b>Grava (kg)</b>	695	695	695	695	695	695	695	695
<b>Aditivo (kg)</b>	4,620 (1,65%)	3,900 (1,30%)	6,500 (2%)	7,350 (2,10%)	7,052 (2,17%)	2,800 (0,80%)	4,312 (1,15%)	6,335 (1,81%)
<b>a/c</b>	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

## Permeabilidad de hormigones autocompactantes

### 3.2. Permeabilidad al agua y porosimetría por intrusión de mercurio

En la Figura 1 se muestran los resultados de diámetro medio de poro (nm) y la profundidad máxima de penetración de agua (mm) para cada uno de los hormigones estudiados. Los valores corresponden al valor medio de 3 probetas ensayadas.

Los menores valores de penetración de agua y diámetro medio de poro los presenta el hormigón 1 (I 42,5 R/SR), que utiliza como adición cenizas volantes. En los hormigones que tienen como adición filler calizo, este diámetro medio está comprendido entre 32 y 40 nm, pero los valores de la penetración máxima presentan diferencias significativas entre los distintos hormigones. El hormigón que mayor penetración de agua muestra es el hormigón 6 (CEM II A/S 42,5 N).

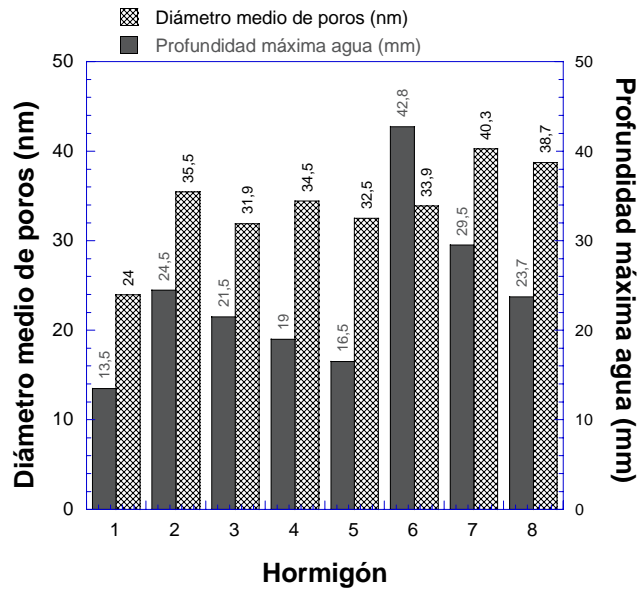


Figura 1. Diámetro medio de poro y permeabilidad al agua

En la Figura 2 se puede observar el porcentaje de porosidad total y la resistencia a compresión a los 91 días de edad. Se puede observar que el hormigón 1 (I 42,5 R/SR), que contiene como adición cenizas volantes, es el que presenta una mayor resistencia y un menor valor de porosidad total respecto al resto de los hormigones. Los hormigones que mayor porosidad presentan son los hormigones 7 (BL II A/L 42,5 R) y 8 (CEM II A/P 42,5 R). El hormigón 7 posee el menor valor de resistencia y el mayor valor de porosidad.

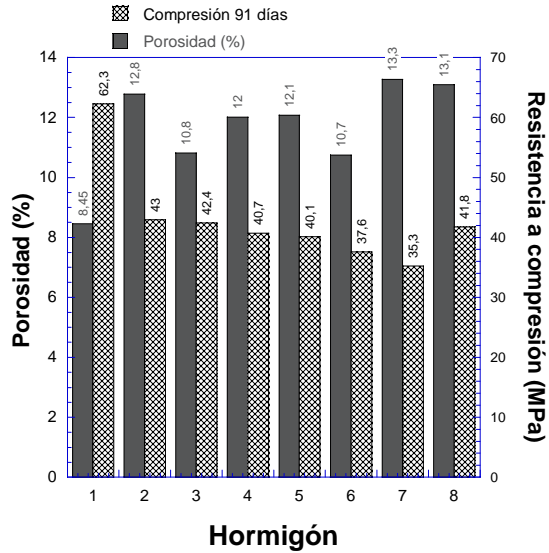


Figura 2. Porosidad total y resistencia a compresión a los 91 días

La Figura 3 muestra la profundidad máxima de penetración de agua y la resistencia a compresión a los 91 días de edad. Se puede observar que el hormigón 1 (I 42,5 R/SR) es el que menor penetración de agua presenta y mayor resistencia a compresión tiene. Se observa que a menor resistencia a compresión, la penetración al agua bajo presión aumenta. El hormigón 6 (CEM II A/S 42,5 N) es el que muestra una mayor penetración de agua.

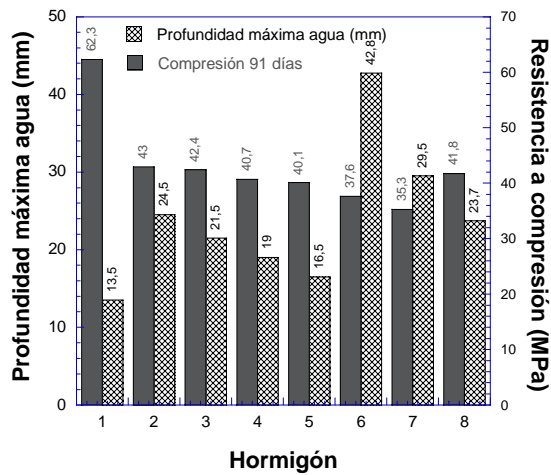


Figura 3. Penetración de agua a presión y resistencia a compresión a los 91 días

## Permeabilidad de hormigones autocompactantes

En la Figura 4 se puede ver la distribución de poros en los hormigones estudiados. Se puede observar que existe una gran diferencia entre los tipos de poros de los distintos hormigones. El hormigón 1 (I 42,5 R/SR) es el que menos *macro-poros* posee, lo que resulta coherente con el resto de los ensayos realizados. Los hormigones 7 (BL II A/L 42,5 R) y 8 (CEM II A/P 42,5 R) muestran una distribución porosa similar, siendo también semejantes en los resultados obtenidos de otros ensayos.

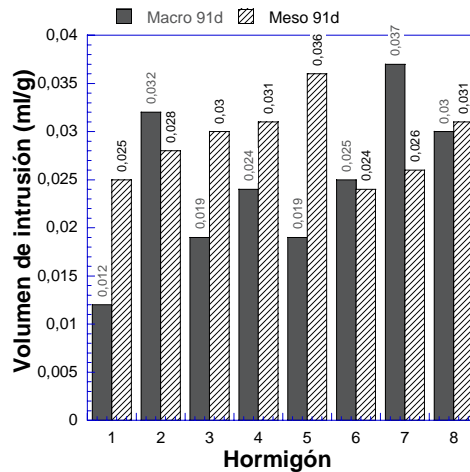


Figura 4. Distribución de poros por intrusión de mercurio a los 91 días de edad

Por último, en la Figura 5 se presenta la comparación de la distribución de poros entre los hormigones que poseen las mayores diferencias en penetración máxima de agua a los 91 días: hormigón 1 (I 42,5 R/SR) y hormigón 6 (CEM II A/S 42,5 N).

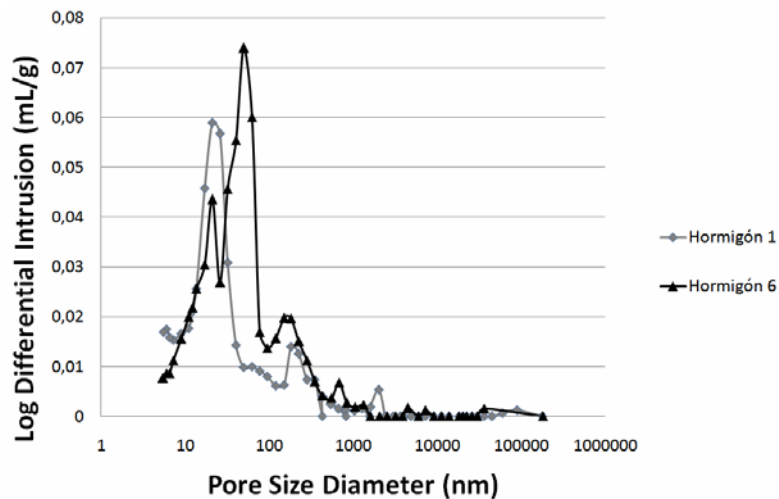


Figura 5. Comparación de distribución de poros entre la hormigón 1 y la hormigón 6

#### **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El hormigón 1, que contiene 280 kg de cemento I 42,5 R/SR y una relación a/c 0,50, es el que presenta menor porosidad y permeabilidad al agua, y mayor resistencia a compresión (ensayos a los 91 días). En términos generales, los resultados obtenidos muestran un hormigón poco poroso, resistente y poco permeable. No sólo se ha obtenido una porosidad total pequeña, sino que también se ha reducido sensiblemente el tamaño del poro. Estos resultados corroboran que la adición de cenizas volantes crea centros de nucleación en los poros que aumenta la compacidad de la matriz y con ello dificulta la penetración del agua y de los agentes agresivos.

El resto de los hormigones, con adición de filler calizo, muestran diferencias significativas tanto en resistencia a compresión como en permeabilidad con respecto al hormigón con adición de cenizas volantes.

En todas las amasadas con filler calizo se obtuvo un diámetro medio de poro parecido, situándose en un rango que va desde 32 nm hasta 40 nm. Sin embargo, entre ellas existen diferencias importantes en cuanto a la profundidad de penetración de agua bajo presión, lo que muestra que el radio medio del poro no es el único parámetro que influye en la misma. El valor de la porosidad total y el porcentaje de macroporosidad pueden ser factores determinantes en este fenómeno.

Del mismo modo, la relación entre la profundidad de penetración de agua bajo presión y la resistencia a compresión no está completamente clara. Si bien se observa una tendencia general a disminuir dicha resistencia cuando aumenta la penetración. Este efecto, lógico, por otra parte, se presenta igualmente en los hormigones tradicionales. Los dos valores mayores de profundidad de penetración de agua los presentan los hormigones que han obtenido menores valores de resistencia: 6 y 7. El resto de ellos presentan resistencias similares entorno a los 40 MPa que no difieren en ningún caso más del 10%. Sin embargo, los valores de profundidad de penetración de agua muestran valores claramente diferentes. En algunos casos las diferencias alcanzan el 80%.

Los valores de profundidad de penetración de agua se interpretan mejor si se comparan los valores de macroporosidad de los distintos hormigones. Así los hormigones 2, 7 y 8 presentan elevadas profundidades de penetración, destacando la penetración del 7 que muestra el mayor porcentaje de macroporos de las muestras estudiadas. Los resultados obtenidos muestran claramente que si bien todos los parámetros estudiados están relacionados y existe una clara conexión en los valores extremos, pequeñas variaciones de los mismos no afectan del mismo modo a todos los parámetros.

#### **5. CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Cuando se utiliza como adición al hormigón cenizas volantes se obtiene una mejora en las características mecánicas, en la disminución de la porosidad y de la profundidad de penetración del agua, con respecto al empleo de filler calizo, es decir, el uso de las cenizas volantes como adición mejora las propiedades

## Permeabilidad de hormigones autocompactantes

mecánicas y disminuye la permeabilidad de los HAC lo que coincide con los hormigones convencionales.

- Del ensayo de penetración de agua se desprende que existe una tendencia generalizada a que la resistencia a compresión sea tanto menor cuanto mayor sea ésta. Para hormigones de resistencias a compresión similares el volumen de macroporos determina el comportamiento frente a gradientes hidráulicos.
- La porosidad total afecta a los valores de resistencia a compresión. A mayor valor de porosidad menor es esta resistencia. Tanto los valores de resistencia como los de porosidad presentan dispersiones en torno al 15% por lo que la relación observada está limitada a esta dispersión.
- El hormigón fabricado con un cemento tipo CEM II A/S 42,5 N, posee una porosidad similar frente a los fabricados con los otros tipos de cementos de igual resistencia, pero con un radio medio de poro mayor que el que presentan éstos, de aquí su mayor penetración de agua. Este hecho puede justificarse por la forma irregular de las escorias, lo que provoca un peor sellado de los poros.

Todo ello pone de manifiesto que el comportamiento frente a la penetración al agua a presión de los HAC está determinado no sólo por la dosificación del hormigón, que afecta a las propiedades reológicas y mecánicas, sino también al porcentaje de macroporos y a su distribución.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) la financiación parcial de los ensayos realizados. Además agradecen al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión del proyecto BIA 2005-09250-C03-02 y al Ministerio de Fomento el proyecto MFOM 2004/9.

Así mismo, E.B. Bermejo Núñez desea agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia su beca FPI.

## REFERENCIAS

Anejo 17. "Hormigón autocompactante". Propuesta de modificación de la Instrucción EHE, Ministerio de Fomento, julio 2007.

ASSIÉ, S., ESCADEILLAS, G. and WALLER, V. (2006). Estimates of self-compacting concrete "potencial" durability, *en Construction and Building Materials*, 21 pp. 1909-1917.

ASTM D 4404 – 84 (2004). Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry.

Comité Euro-International du Béton. (1992). Durable Concrete Structure, Thomas Telford Ltd.: Londres. pp. 1 – 19.

COOK, R.A. and HOVER, K.C. (1993). Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors, *en ACI Material Journals*, 90-M16 pp. 152-161.

EFCA y EFNARC. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.

FERNÁNDEZ GÓMEZ, J. Y BURÓN MAESTRO M. (2005). Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante, IECA.



**E. Bermejo Núñez, A. Moragues Terrades, J.C. Gálvez Ruiz, M. Fernández Cánovas**

FERNÁNDEZ GÓMEZ, J. y BURÓN MAESTRO, M. (2007). Determinación de las características mecánicas de un hormigón autocompactante H-30, en *Cemento y Hormigón*, 903 pp. 52-65.

GARRIDO ROMERO, L. (2006). Comportamiento estructural del hormigón autocompactante. Caracterización de propiedades mecánicas y análisis de durabilidad, en *Jornada técnica sobre aspectos prácticos del hormigón estructural*. IECA. Málaga.

GETTU, R. y AGULLÓ, L. (Abril 2004). Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte I), en *Cemento y Hormigón*, 861 pp. 50-67.

GETTU, R. y AGULLÓ, L. (Mayo 2004). Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte II), en *Cemento y Hormigón*, 862 pp. 32-55.

Instrucción Española de Hormigón Estructural – EHE (1998), Ministerio de Fomento.

Instrucción para la Recepción de Cementos RC-07. Propuesta de modificación de la Instrucción RC-03, de julio de 2007.

LEEMANN, A., MÜNCH, B., GASSER, P. and HOLZER, L. (2006). Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete, en *Cement and Concrete Research*, 36 pp. 1425-1433.

UNE-EN 12390-8:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.

OKAMURA, H. (1997). Self Compacting High-Performance Concrete, en *Concr. Int.*, Vol 19, nº 7, pp. 50-54.

YE, G., LIU, X., DE SCHUTTER, G., TAERWE, L. and VANDEVELDE, P. (2007). Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature, en *Cement and Concrete Research*, 37 pp. 978-987.

ZHU, W. and BARTOS, PJM. (2003). Permeation properties of self-compacting concrete, en *Cement and Concrete Research*, 33 pp. 921-926.