

PERMEABILIDAD Y POROSIDAD EN HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

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

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España
E-mail: ebermejo@caminos.upm.es, amoragues@caminos.upm.es, jcgalvez@caminos.upm.es y
mfcánovas@caminos.upm.es

RESUMEN

Los hormigones autocompactantes (HAC) son relativamente novedosos. La principal diferencia respecto a los hormigones convencionales es su comportamiento en estado fresco. 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, y con frecuencia para hormigones de resistencia alta. Los estudios relativos a la durabilidad de los HAC son escasos, especialmente en el caso de hormigones de resistencia moderada. 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 obtenidos 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 ha realizado el ensayo de penetración de agua bajo presión. A partir de los resultados obtenidos se establecen las conclusiones relativas a los aspectos de durabilidad relacionados con la permeabilidad y la microestructura de la red porosa.

ABSTRACT

The self-compacting concretes (SCC) are relatively novel. The main difference between them and conventional concretes is their workability. Up to date, SCC studies have been focused on optimal dosages development, and their characterization as high performance concretes. Durability studies are scarce, especially for moderate strength concretes. Concrete mechanical properties and their porous structure were evaluated in this study. This paper presents mercury intrusion porosimetry in order to explore the pore diameters, pore size distribution and total porosity. The permeability was measured with water under pressure. The results provide information related to the permeability and microstructure of porous network.

PALABRAS CLAVE: Durabilidad, Hormigón autocompactante, Permeabilidad, Porosidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros trabajos sobre estos hormigones se realizaron en Japón, en 1986, por el profesor Okamura, que introdujo el concepto de HAC. Son hormigones que nacieron como una solución para asegurar la calidad y durabilidad de estructuras fuertemente armadas donde el proceso de vibración era complicado. Desde entonces mucho se ha avanzado en el conocimiento de este tipo de hormigones.

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 [1, 2] 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 mesoporos los que determinan en mayor medida el comportamiento frente a durabilidad por su mayor conexión.

1.1 Objetivos de la investigación

Esta investigación tiene dos objetivos principalmente. El primer objetivo es la adecuación de algunos de los cementos empleados en la confección de hormigones convencionales a la fabricación de HAC. Estos cementos, regulados por la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-07), deben incorporar los finos necesarios para conseguir mezclas con la fluidez y cohesión adecuadas a las características de los HAC, cumpliendo con los requisitos de resistencia mecánica y durabilidad de acuerdo al uso y ambiente en que serán empleados. El proyecto se centra en la obtención de hormigones de resistencia característica 30 N/mm^2 , de modo que pequeñas modificaciones permitan conseguir HAC con resistencias características comprendidas entre 25 y 35 N/mm^2 . El segundo objetivo es estudiar la porosidad de estos hormigones realizados y relacionarla con la permeabilidad al agua bajo presión y con la resistencia a compresión.

En este trabajo de investigación se han estudiado ocho tipos de cementos y, los criterios adoptados han sido los siguientes:

- La cantidad máxima de cemento a emplear sería de 300 kg/m^3 , pudiendo llegar excepcionalmente a 350 kg/m^3 .
- Tamaño máximo de árido: 16 mm.
- La cantidad máxima de partículas finas añadidas o filler (que pasan por el tamiz UNE 0,063 mm), incluidas las adicionadas al cemento, no debería superar los 250 kg/m^3 de hormigón.
- Por razones de economía, la cantidad de aditivo a emplear debería reducirse a la menor posible.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Materiales empleados

Se han utilizado los siguientes materiales:

Cemento

Los cementos empleados en el estudio han sido los siguientes: 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; CEM II B/L 32,5 N; Tipo BL II A/L 42,5 R.

Áridos

El árido empleado ha sido arena silíceo de río y árido grueso rodado de naturaleza silíceo. 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.

Adiciones

Se han empleado dos adiciones:

- Filler calizo. Se ha utilizado con todos los tipos de cementos.

- 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^3 de hormigón. Cuando el cemento empleado contenía adición inerte de tipo calizo (L) se ha contabilizado ésta como parte de la cantidad máxima de adición.

Aditivo

En todos los hormigones fabricados se ha empleado el mismo aditivo superplastificante, SIKA Viscocrete 3425, basado en policarboxilatos modificados en base acuosa. No se han empleado aditivos modificadores de viscosidad.

2.2. Fabricación de las probetas

En este estudio se han realizado ensayos previos con cada uno de los cementos empleados hasta encajar la dosificación adecuada que permitiese clasificar al hormigón como autocompactante de resistencia característica 30 N/mm^2 . Los criterios para aceptar o rechazar las dosificaciones en función de los resultados de fluidez, cohesión y capacidad de paso, se fijaron a partir de la bibliografía consultada [3, 4, 5].

Una vez adoptada la dosificación idónea para cada cemento utilizado, se confeccionó una amasada para cada dosificación y se hormigonaron probetas cilíndricas de $15 \phi \times 30 \text{ cm}$ para la realización de ensayos a compresión, módulo de elasticidad, tracción indirecta, penetración de agua a presión y ensayo de porosimetría.

2.3. Ensayos realizados del hormigón en estado fresco

Los ensayos realizados fueron tres: extensión de flujo (UNE-EN 83361:2007), caja en L (UNE-EN 83363:2007) y embudo V (UNE-EN 83364:2007), siempre en el mismo orden.

2.4. Ensayos realizados del hormigón endurecido

A las edades de 7, 28 y 91 días, desde la fecha de confección del hormigón, se procedió a la realización de los ensayos de hormigón endurecido. Estos consistieron en resistencia a compresión (UNE-EN 12390-3:2003), módulo de elasticidad (UNE-UNE 83316:1996), resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2001) y penetración de agua a presión (UNE-EN 12390-8), pero este último ensayo solamente se realizó a la edad de 91 días.

2.5. 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 µm.

Los ensayos se realizaron a los 91 días de edad de las muestras. Los ensayos se han efectuado de acuerdo con la 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

Las Tablas 1 y 2 presentan las dosificaciones empleadas para cada uno de los hormigones estudiados. Corresponden a 1 m³ de hormigón, y las mismas han permitido obtener, en general, hormigones de resistencia característica superior a 30 N/mm² que cumplen con los requisitos de HAC en estado fresco.

Tabla 1. Dosificaciones propuestas (I).

Hormigón	1	2	3	4	5
Tipo de cemento	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
Adición	Ceniza volante	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo
Cemento (kg)	280	300	325	350	325
Adición (kg)	200	200	200	200	220
Agua (kg)	140	150	162	193	179
Arena (kg)	960	960	960	960	960
Grava (kg)	695	695	695	695	695
Aditivo (kg)	4,620 (1,65%)	3,900 (1,30%)	6,500 (2%)	7,350 (2,10%)	7,052 (2,17%)
a/c	0,50	0,50	0,50	0,55	0,55

Tabla 2. Dosificaciones propuestas (II).

Hormigón	6	7	8	9
Tipo de cemento	CEM II A/S 42,5 N	BL II A/L 42,5 R	CEM II A/P 42,5 R	CEM II B/L 32,5 N
Adición	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo	Filler calizo
Cemento (kg)	350	375	350	350
Adición (kg)	200	156	200	110
Agua (kg)	193	206	193	193
Arena (kg)	960	960	960	960
Grava (kg)	695	695	695	695
Aditivo (kg)	2,800 (0,80%)	4,312 (1,15%)	6,335 (1,81%)	6,650 (1,90%)
a/c	0,55	0,55	0,55	0,55

3.2. Resultados de los ensayos de hormigón en estado fresco

Las Tabla 3 y 4 muestran un resumen de los valores obtenidos en los ensayos de caracterización del HAC en estado fresco (extensión de flujo, embudo V y caja en L) para cada uno de los hormigones estudiados.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de hormigón fresco (I).

Hormigón		1	2	3	4	5
Extensión de flujo	Tiempo (s)	2,5	4	3	3	4,8
	Diam. medio (cm)	75	70,5	69,3	65	70
Embudo V	Tiempo (s)	9	6	9	14	12
Caja en L	T ₆₀₀ (s)	5,8	3	6	3	3
	H ₂ / H ₁	0,75	0,80	0,71	0,63	0,76

Tabla 4. Resultados de los ensayos de hormigón fresco (II).

Hormigón		6	7	8	9
Extensión de flujo	Tiempo (s)	1,2	2	3	7
	Diam. medio (cm)	70	65,5	62,5	64
Embudo V	Tiempo (s)	5,5	8,5	10	13
Caja en L	T ₆₀₀ (s)	1,4	2	3	4
	H ₂ / H ₁	0,80	0,60	0,64	0,80

3.3. Resultados de los ensayos del hormigón endurecido

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran los resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a tracción indirecta (ensayo de brasileño) para cada hormigón. Los valores presentados corresponden al valor medio de 3 probetas ensayadas. En el caso del hormigón 9 solamente se realizaron ensayos de compresión, módulo de elasticidad y ensayo de tracción indirecta a 28 días y ensayo de compresión a 7 días.

Como se muestra en la Figura 1, el valor de la resistencia a compresión, a 28 días, varía aproximadamente entre 25 y 50 MPa.

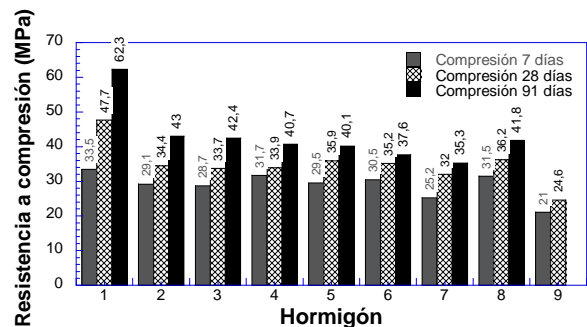


Figura 1. Resistencia a compresión.

Como se muestra en la Figura 2, el valor del módulo de elasticidad, a 28 días, se sitúa, aproximadamente, entre 23 y 36 GPa, dependiendo del tipo de hormigón.

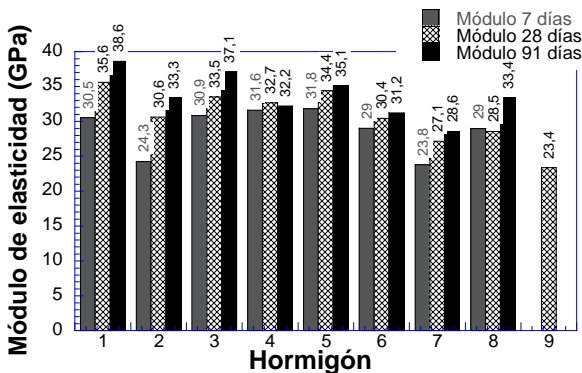


Figura 2. Módulo de elasticidad.

Como se muestra en la Figura 3, el valor del ensayo de tracción indirecta, a 28 días, presenta una menor dispersión que los anteriores ensayos situándose, aproximadamente, entre 3 y 4,5 MPa.

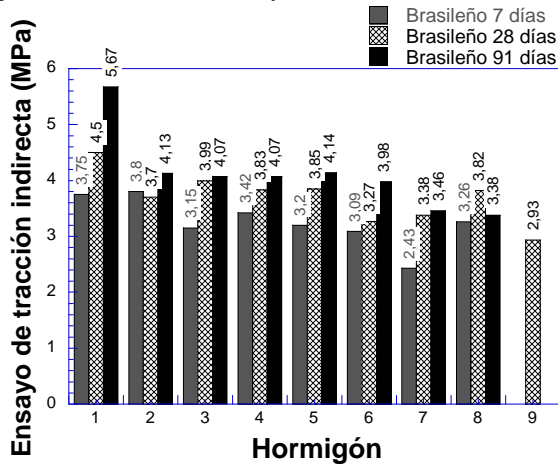


Figura 3. Resistencia a tracción indirecta.

3.3. Resultados de los ensayos de permeabilidad de agua y porosimetría por intrusión de mercurio

Estos ensayos no se han realizado con el hormigón 9 (CEM II B/L 32,5N) debido a que, a 28 días de edad, no se alcanza la resistencia solicitada.

En la Figura 4 se muestran los resultados de diámetro medio de poro 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.

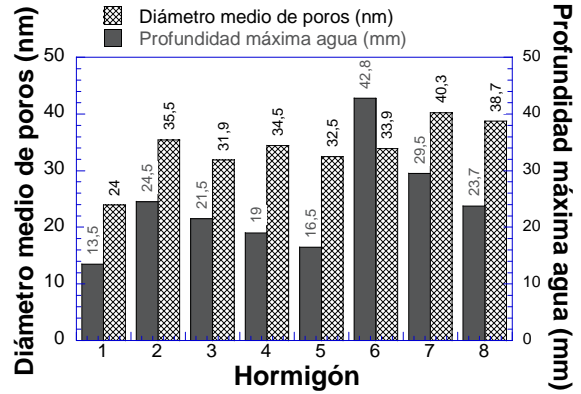


Figura 4. Diámetro medio de poro y permeabilidad al agua.

En la Figura 5 se puede observar el porcentaje de porosidad total y la resistencia a compresión a los 91 días de edad.

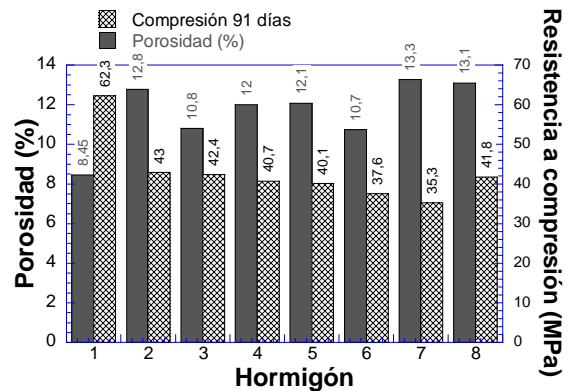


Figura 5. Porosidad total y resistencia a compresión a los 91 días.

La Figura 6 muestra la profundidad máxima de penetración de agua y la resistencia a compresión a los 91 días de edad.

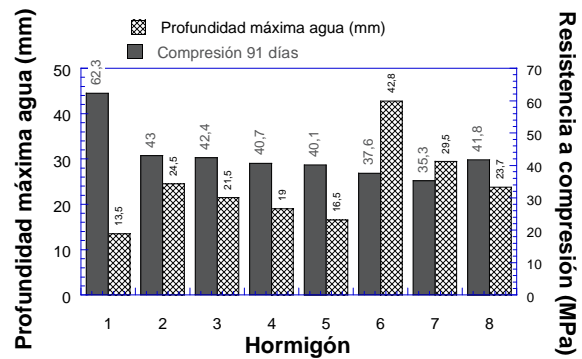


Figura 6. Penetración de agua a presión y resistencia a compresión a los 91 días.

En la Figura 7 se puede ver la distribución de poros en los hormigones estudiados.

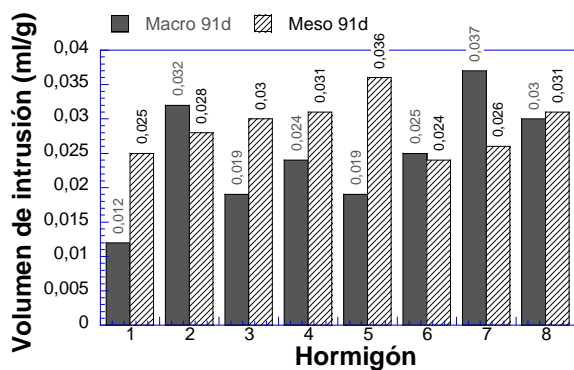


Figura 7. Distribución de poros por intrusión de mercurio a los 91 días de edad.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Si se observan las Tablas 3 y 4, se ve que cuatro de los hormigones ensayados poseen un coeficiente de bloqueo en la caja en L por debajo del límite que se establece en el Anejo 17 de la EHE y ello se debe a que cuando se hicieron los ensayos no se disponía aún de dicho anejo, por lo que dicho límite se estableció de acuerdo con lo indicado en la bibliografía existente; así Gettu et al. [5, 6], comenta que con hormigones con coeficientes más bajos, hasta 0,60, se han obtenido resultados aceptables en aplicaciones estructurales (Tviksta [7]).

Se ha intentado ajustar las dosificaciones a un contenido de cemento inferior a 350 kg/m^3 de hormigón. En algunos casos se ha podido reducir esta cantidad, pero en otros no, al no alcanzarse la resistencia prevista de 30 N/mm^2 . La relación agua/cemento ha sido 0,55 a excepción de los tres primeros hormigones en los que se ha reducido a 0,50. La razón ha sido que con el resto de los cementos, si se reducía la relación agua/cemento había que añadir más de un 2% de aditivo y el hormigón perdía fluidez rápidamente con lo que no se cumplían las condiciones de autocompactabilidad.

En cuanto a los aditivos cabe indicar que en los ensayos que se han hecho con agentes modificadores de viscosidad, su empleo no ha mejorado apreciablemente el comportamiento de la masa fresca de hormigón, por lo que se ha desechado su uso, entre otras razones por economía. En cuanto al superplastificante, se ha observado que un contenido superior al 2% del peso de cemento provoca una pérdida de fluidez rápida del hormigón por lo que se ha intentado reducir su cantidad aproximadamente al 1,5%, aunque en algunos casos ha sido imposible y se ha tenido que llegar al 2%. Conviene destacar que se ha trabajado con un solo tipo de aditivo superplastificante, y que muy probablemente sea conveniente realizar pruebas complementarias que permitan adoptar el aditivo idóneo para cada cemento.

En cuanto a las propiedades mecánicas, cuando se usan adiciones activas, como las cenizas volantes, la resistencia a 28 días es mayor que en el resto de los

hormigones en los que se ha utilizado como adición filler calizo.

Con el cemento blanco estudiado se alcanza una resistencia a compresión a 28 días ligeramente superior a 30 N/mm^2 . La razón de esta resistencia más baja respecto a los hormigones hechos con otros cementos es que, aparte del filler calizo que se le añade para tener la fluidez necesaria, el propio cemento ya tiene incorporado un 25% de filler calizo.

Análogo razonamiento se hace para el cemento CEM II B-L 32,5 N, que apenas llega a los 25 N/mm^2 de resistencia a compresión a los 28 días, pero en este caso el cemento tiene un 40% de adición caliza. Aunque se han empleado 350 kg/m^3 de cemento, el aumento de la cantidad de cemento no ha mejorado la resistencia de forma significativa por lo que no parece viable obtener una resistencia media de 30 MPa. Probablemente habría que emplear más de 400 kg/m^3 de cemento o usar adiciones activas como las cenizas volantes.

Respecto a la durabilidad, 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:

- Respecto a los aditivos, hay que realizar pruebas de compatibilidad entre diferentes tipos de aditivos, si se usa más de un tipo, y entre el aditivo y el cemento, para así adoptar el aditivo más idóneo para cada tipo de cemento.
 - Si se utiliza más de un 2% de aditivo superplastificante se produce una rápida pérdida de fluidez en el hormigón.
 - Los cementos que tienen incorporado como adición complementaria filler calizo es más difícil conseguir resistencias medias, sin sobrepasar los 350 kg/m³ de cemento, respecto a otros cementos que no tienen filler calizo como adición complementaria.
 - Cuando se utiliza como adición al hormigón cenizas volantes se obtiene una mejora en las características mecánicas, 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 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 42,5N posee, frente a hormigones de igual resistencia fabricados con los otros tipos de cementos, una porosidad similar, pero con un radio medio de poro mayor que el que presentan estos, de aquí su mayor penetración al 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

- [1] Garrido Romero, L. (2006) Comportamiento estructural del hormigón autocompactante. Caracterización de propiedades mecánicas y análisis de durabilidad. *Jornada técnicos sobre aspectos prácticos del hormigón estructural*. IECA. Málaga.
- [2] Fernández Gómez, F. y Burón Maestro, M. (2007) Determinación de las características mecánicas de un hormigón autocompactante H-30. *Cemento y Hormigón*, 903 pp. 52-65.
- [3] Fernández Gómez, F. y Burón Maestro, M. (2005) *Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante*. IECA.
- [4] EFCA, EFNARC. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Mayo 2005.
- [5] Gettu, R. y Agulló, L. (2004) Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización (Parte II) *Cemento y Hormigón*, 862 pp. 32-55.
- [6] Gettu, R. y Agulló, L. (2004) Estado del arte del hormigón autocompactante y su caracterización (Parte I) *Cemento y Hormigón*, 861 pp. 50-67.
- [7] Tviksta, L. *Guidelines, Report of Task 9: End Product, Rational Production and Improved Working Environment through using Self-Compacting Concrete*, Brite EuRam project BRPR-CT96-0366, pp. 48.