

Permeabilidad, porosidad y resistencia a compresión de hormigones autocompactables

Permeability, porosity and compressive strength of self-compacting concretes

M.O. VALCUENDE ^(*), C. PARRA ^(**), J. BENLLOCH ^(*)

^(*) Universidad Politécnica de Valencia

^(**) Universidad Politécnica de Cartagena

Persona de contacto/Corresponding author: mvalcuen@csa.upv.es

Fecha de envío: 22-XII-04

Fecha de aceptación: 19 V-05

ESPAÑA

RESUMEN

En este trabajo experimental se estudia la penetración de agua en hormigones autocompactables, analizando al mismo tiempo su estructura porosa, pues gran parte de los procesos de deterioro que afectan a la durabilidad de las estructuras están condicionados por estos dos aspectos. Para ello se han fabricado dos tipos de hormigones, uno autocompactable y otro tradicional vibrado, con diferentes relaciones A/C y distintos tipos de cemento. Tras determinar la permeabilidad al agua bajo presión, la resistencia a compresión y las distribuciones de tamaño de poro, los resultados obtenidos ponen de manifiesto que los hormigones autocompactables presentan menor porosidad capilar que los tradicionales, lo que les confiere mejores prestaciones frente a la penetración de agua. Asimismo, dichos hormigones alcanzan mayores resistencias, si bien, cuando para su fabricación se emplean grandes cantidades de finos calizos cuyo equivalente de arena es bajo la tendencia se invierte, obteniéndose peores resultados. Por último, se ha establecido una relación de tipo lineal entre la profundidad de penetración de agua y la resistencia a compresión. Dicha relación depende a su vez del tipo de hormigón, dado que los hormigones autocompactables son menos permeables que los tradicionales para una misma resistencia.

SUMMARY

Most deterioration affecting the durability of self-compacting concrete structures is mediated by water penetration in the concrete, a condition related to its porous structure. The present study analyzes these two factors. To this end, two types of concrete were prepared, a self-compacting and a traditional vibrated concrete, with different W/C ratios and different types of cement. The results of low-pressure water testing to evaluate permeability and analyses to determine compressive strength and pore size distribution showed that self-compacting concrete has lower capillary porosity than traditional concrete, which would explain its greater resistance to water penetration. Such concrete likewise reached higher strength values, except where large proportions of lime powder with low sand equivalents were used in its manufacture, when lower strength was recorded. Lastly, the depth of water penetration and compressive strength were found to be linearly correlated. That correlation was seen to depend, in turn, on the type of concrete, since for any given strength level, self-compacting concrete was less permeable than the traditional material.

PALABRAS CLAVE: hormigón autocompactable, durabilidad, permeabilidad, porosidad, resistencia a compresión

KEYWORDS: self-compacting concrete, durability, permeability, porosity, compressive strength.

1. INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo que desde los años 70 están teniendo los aditivos ha dado lugar a la aparición de los denominados hormigones especiales o de altas prestaciones. Uno de los más recientes es sin duda el hormigón autocompactable (HAC), pudiendo definirse como aquél que es capaz de fluir en el interior del encofrado, pasando entre las armaduras y consolidándose únicamente bajo

I. INTRODUCTION

The intense development of admixtures since the nineteen seventies has given rise to the appearance of so-called special or high performance concretes. Self-compacting concrete (SCC), one of the most recent of such materials, may be defined to be concrete able to flow throughout the formwork, surround reinforcing bars and consolidate

la acción de su propio peso sin necesidad de compactación y sin presentar segregación o exudación (1).

Los primeros trabajos de investigación con este material tienen su origen en Japón y datan de mediados de los años 80. Dichos trabajos fueron presentados por el profesor Ozawa en la Segunda Conferencia del Este de Asia y del Pacífico sobre Ingeniería Estructural y Construcción (EASEC-2) en enero de 1989. El objetivo era obtener un hormigón de gran calidad, independientemente de la profesionalidad de los operarios durante el proceso de ejecución de la obra. El interés suscitado por este nuevo material se ha visto posteriormente refrendado por la celebración de tres simposios internacionales de carácter monográfico, auspiciados por la RILEM y celebrados en Estocolmo (1999), Tokio (2001) y Reykjavik (2003).

Aunque los HAC ya están siendo utilizados en la práctica en diferentes tipos de estructuras (2,3), su uso está todavía muy limitado. En este sentido, si se analiza la bibliografía existente, es fácil observar que raramente se aborda el estudio de las propiedades del hormigón endurecido; gran parte de los trabajos publicados hasta la fecha se centran en el diseño de mezclas (4,5,6), en el estudio de nuevos aditivos y adiciones (7,8), en el análisis de las propiedades reológicas del hormigón en estado fresco (9,10,11) y en la caracterización de ensayos que garanticen una correcta puesta en obra del material (12,13).

Por lo que respecta a la durabilidad, en general los HAC tienden a presentar un buen comportamiento, si bien los beneficios que se obtienen en estado endurecido son todavía poco conocidos y varían según las propiedades analizadas. Así, por ejemplo, mientras que la permeabilidad al oxígeno (14,15,16) o la penetración de cloruros (16,17,18) pueden llegar a reducirse en más de un 50%, cuando se analiza la absorción de agua los resultados son dispares pues dependen bastante del tipo de finos empleado (14,19). Algunos investigadores, como Jooss y Reinhardt (20) o De Schutter et al. (14) han estudiado también la permeabilidad al agua en hormigones con relaciones A/C iguales a 0,45, obteniendo mejoras del coeficiente de permeabilidad que oscilan entre un 13 y un 38%.

2. OBJETIVOS Y PLAN EXPERIMENTAL

El objetivo que se plantea en esta investigación es estudiar la penetración de agua en hormigones autocompactables, analizando al mismo tiempo su estructura porosa, pues gran parte de los procesos de deterioro que afectan a la durabilidad de las estructuras están condicionados por estos dos aspectos.

De acuerdo con este objetivo, el plan experimental, enmarcado dentro de un proyecto de investigación más

under its own weight, with no need for mechanical consolidation and no segregation or bleeding (1).

The earliest research on this material was conducted in Japan in the mid nineteen eighties. The papers stemming from these studies were presented by Professor Ozawa at the Second East Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2) in January 1989. The objective pursued was to obtain high quality cast-in-place concrete regardless of the skill of the workers involved in its placement. The interest sparked by this new material prompted RILEM to sponsor three international symposia on the subject, held in Stockholm (1999), Tokyo (2000) and Reykjavik (2003).

Although SCC is now being used in practice in different types of structures (2,3), its application is still very limited. In this regard, an analysis of the literature reveals that the study of hardened concrete is rarely addressed; most of the papers published to date focus on mix design (4,5,6), the study of new admixtures and additions (7,8), the analysis of the rheological properties of fresh concrete (9,10,11) and the characterization of tests guaranteeing proper casting of the material (12,13).

Whilst as a general rule SCC tends to perform well in terms of durability, the benefits obtained in the hardened concrete are still poorly defined and vary depending on the properties analyzed. Whereas oxygen permeability (14,15,16) or chloride penetration (16,17,18), for instance, may drop by over 50%, water absorption results tend to be range widely, since this parameter depends on the type of fines used (14,19). Nonetheless, when authors such as Jooss and Reinhardt (20) or De Schutter et al. (14) studied water permeability in concrete with W/C ratios of 0.45, they obtained an improvement in the permeability coefficient of from 13 to 38%.

2. OBJECTIVES AND WORKING PLAN

The purpose of the present study was to analyze water penetration in and the porous structure of self-compacting concrete, since most deterioration affecting the durability of structures made from such concrete is associated with these two circumstances.

In keeping with this objective, our working plan, which formed a part of a broader research project, involved the

amplio, ha consistido en la fabricación de dos tipos de hormigones: uno, autocompactable (A) y otro, tradicional (T), actuando este último como hormigón de referencia. Con el fin de cubrir el rango habitual de resistencias utilizadas en edificación, para cada tipo de hormigón se han realizado cuatro amasadas distintas, empleándose para ello 3 relaciones A/C (0,65, 0,55 y 0,45) y dos clases resistentes de cemento Portland con adiciones (32,5 y 42,5). En cada amasada se han fabricado cuatro probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, que se desmoldaron a las 24 horas y se mantuvieron en una cámara de curado a 20 °C y HR superior al 95% hasta alcanzar la edad de 90 días. Para la confección de las probetas de hormigón autocompactable, el hormigón se colocó sin compactar, llenándose los moldes de una sola tongada.

Los ensayos realizados en las probetas han sido dos: determinación de la resistencia a compresión del hormigón (f_c) y determinación de la profundidad máxima de penetración de agua bajo presión (Z_{max}). Este último ensayo se ha hecho de acuerdo con la norma europea EN 12.390-8, según la cual se aplica agua sobre una de las caras de la probeta a una presión de 500 ± 50 kPa durante 72 horas. Transcurrido este tiempo la probeta se abre por la mitad (ensayo brasileño) y se mide la profundidad de penetración de agua. Las características de cada amasada, así como los resultados obtenidos son los recogidos en las Tablas 1 y 2.

Paralelamente, con el fin de analizar la estructura porosa del hormigón, se han determinado también las distribuciones de tamaño de poro con un porosímetro de mercurio de la marca Micromeritics, modelo AutoPore III. Para la realización de este ensayo se tomaron dos muestras de unos 2 g de peso aproximadamente de los hormigones fabricados con una relación A/C igual a 0,65. Las muestras se secaron previamente en estufa a 110 °C. Un resumen de los resultados está recogido en la Tabla 2.

TABLE 1/TABLE 1
Dosisificación de los hormigones
Concrete dosing

Amasada Mix	Aqua Water (*) (kg)	Cemento Cement (kg/m ³)	Aditivo Admixture (kg/m ³)	Grava Gravel (kg/m ³)	Arena gruesa Course sand (kg/m ³)	Arena fina Fine sand (kg/m ³)	Finos totales Total fine particles (kg/m ³)	Aqua / Finos Water / fines (m ³ /m ³)
A-65-32	175,06	275	4,68	824,30	223,10	892,20	486,67	1,06
A-55-32	174,64	325	5,20	806,00	436,20	654,30	522,60	1,00
A-55-42	174,90	325	4,88	806,00	436,20	654,30	522,60	1,00
A-45-42	175,20	400	6,00	777,20	630,90	420,60	580,09	0,92
T-65-32	177,21	275	1,93	824,55	1115,57	---	445,45	1,17
T-55-32	176,93	325	2,28	806,50	1091,10	---	491,75	1,07
T-55-42	177,45	325	1,63	806,50	1091,10	---	491,75	1,07
T-45-42	178,40	400	2,00	777,70	1052,20	---	562,17	0,95

(*) No está incluida el agua que aporta el aditivo. Excludes admixture water

preparation of two types of concrete: a self-compacting concrete (A) and a traditional (T) concrete used as a control. Four different batches of each type of concrete were prepared to cover the standard strength range required of building concrete. Three W/C ratios (0.65, 0.55 and 0.45) and two strengths (32.5 and 42.5) of portland cement with additions were used. Four cylindrical specimens measuring 150 mm in diameter and 300 mm high were made from each batch: once removed from their moulds after 24 hours, they were cured in a moist closet at 20 °C and RH of over 95% for 90 days. The self-compacting concrete specimens were made without consolidating the material, which was poured into the moulds as a single lift.

The specimens were tested for concrete compressive strength (f_c) and the maximum depth of water penetration when injected under pressure (Z_{max}). The latter test was conducted as specified in European standard EN 12390-8, squirting water on to one of the faces of the specimen at a pressure of 500 ± 50 kPa for 72 hours. The specimen was then split along a diametrical plane (splitting or indirect tensile test) and the depth of water penetration measured. Tables 1 and 2 give the characteristics of each batch and the results obtained.

In parallel, the porous structure of the concrete was determined by finding pore size distribution with a Micromeritics AutoPore III mercury porosimeter. This test was run on approximately 2 g of sample taken from the concretes with a W/C ratio of 0.65, which were dried at 110 °C prior to testing. A summary of the results can be found in Table 2.

TABLA 2 / TABLE 2
 Características de las amasadas y resultados de los ensayos
Mix characteristics and test results

Amasada <i>Mix</i>	Hormigón <i>Concrete</i>	A/C <i>W/C</i>	Cemento <i>Cement</i>	f_c (MPa)	Z_{max} (mm)	Porosidad abierta <i>Open porosity (%)</i>
A-65-32	A	0,65	CEM 32,5	32,74	44	13,8
A-55-32	A	0,55	CEM 32,5	40,74	36	---
A-55-42	A	0,55	CEM 42,5	52,21	30	---
A-45-42	A	0,45	CEM 42,5	64,89	14	---
T-65-32	T	0,65	CEM 32,5	36,27	48	16,7
T-55-32	T	0,55	CEM 32,5	40,74	44	---
T-55-42	T	0,55	CEM 42,5	49,71	40	---
T-45-42	T	0,45	CEM 42,5	60,41	27	---

TABLA 3 / TABLE 3
 Características y composición del cemento
Cement characteristics and composition

Tipo de cemento <i>Type of cement</i>	Finura Blaine <i>Blaine fineness</i> (cm ² /g)	Resistencia <i>Strength</i> (MPa)	Composición /Composition			
			Clíker <i>Clinker</i> (%)	Caliza <i>Lime</i> (%)	Cenizas <i>Ash</i> (%)	Yeso <i>Gypsum</i> (%)
CEM II/B-M (V-LL) 32,5 N	4681	39,42	66,0	15,3	14,4	4,3
CEM II/B-M (V-LL) 42,5 R	4901	48,07	66,0	10,5	19,0	4,5

Para la fabricación de los hormigones autocompactable se han utilizado áridos de machaqueo calizos, empleándose dos tipos de arenas, una fina 0/2 y otra gruesa 0/4, y una grava 4/12, con un contenido en finos (<0,063 mm) del 19,2, 14,4 y 1,0%, respectivamente. En la arena 0/2 se realizó el ensayo de azul de metileno, obteniendo un valor de 0,36 g de azul/100 g de finos debido, en este caso, a la presencia de minerales arcillosos. El equivalente de arena (EA) de dicha arena es de 64. Por lo que respecta al cemento, la mitad de las amasadas se han fabricado con un cemento tipo CEM II / B-M (V-LL) 32,5 N y la otra mitad con un CEM II / B-M (V-LL) 42,5 R, cuyas características son las recogidas en la Tabla 3. El aditivo utilizado ha sido el Glenium C303 SCC, ajustándose su dosificación hasta conseguir en el hormigón las características adecuadas de fluidez y viscosidad. A tal fin se hicieron los ensayos de mini-slump, cono de Marsh, slump-flow, V-funnel y L-box.

El procedimiento de dosificación empleado es el propuesto por Gettu et al. (21). Se fundamenta en una optimización por separado de la composición de la pasta y del esqueleto granular del árido. La pasta, en el caso propuesto, está constituida por cemento, filler calizo, agua y superplasticante, mientras que el esqueleto granular se define por la relación óptima entre arena y grava que proporciona la estructura de máxima compacidad en seco y sin compactar.

The self-compacting concretes were made with a crushed lime aggregate and two types of sand, fine 0/2 and coarse 0/4, as well as 4/12 gravel, with fines (<0.063 mm) contents of 19.2%, 14.4% and 1.0%, respectively. When the 0/2 sand was tested with the methylene blue method, a value of 0.36 g of blue/100 g of fines was obtained due, in this case, to the presence of clay minerals. The sand equivalent (SE) of this sand was 64. In half of the batches the cement was CEM II B-M (V-LL) 32.5 N, while CEM II / B-M (V-LL) 42.5 R was used in the other half. Their respective characteristics are shown in Table 3. The admixture used was Glenium C303 SCC, in doses adjusted to obtain suitable fluidity and viscosity, determined by mini-slump, Marsh cone, slump-flow, V-funnel and L-box tests.

The dosing procedure was as proposed by Gettu et al. (21), which calls for optimizing the paste composition and the granular skeleton of the aggregate separately. In the present case the paste consisted in cement, lime filler, water and a superplasticizer, whilst the granular skeleton was the optimum sand / gravel ratio that yielded the aggregate mix with the maximum dry uncompacted density.

Una vez establecidas las distintas mezclas se fabricaron los correspondientes hormigones tradicionales, manteniendo los mismos materiales y las mismas dosificaciones empleadas para la confección de los hormigones autocompactables, excepción hecha del tipo de aditivo, que fue el Glenium C355, y de la composición de la arena, que pasó a ser sólo arena de la gruesa (arena 0/4). Este último cambio se hizo con el objeto de reducir el contenido de finos e intentar así ajustarse a las prescripciones que marca la instrucción española EHE al respecto. El asiento en el cono de Abrams de todos estos hormigones osciló entre 14 y 16 cm. Para la fabricación de las probetas los moldes se llenaron en dos tongadas, compactándose el hormigón mediante picado con barra.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Permeabilidad y porosidad

Como era de esperar, tanto en el caso de los hormigones autocompactables (hormigones tipo A) como en el de los hormigones tradicionales (hormigones tipo T), a medida que disminuye la relación A/C disminuye la permeabilidad. Lógicamente, estas mejoras obedecen a cambios en la microestructura de la pasta de cemento, siendo menos porosa cuanta menor es la cantidad de agua utilizada en la dosificación.

Por otro lado, centrando el análisis sólo en las dos dosificaciones realizadas con la misma relación A/C (A/C = 0,55), fácilmente se observa que la utilización de cementos de mayor clase resistente proporciona hormigones más impermeables. La disminución de permeabilidad registrada es del 16,7% en el hormigón autocompactable y del 9,1% en el hormigón tradicional (Figura 1). Este hecho se debe fundamentalmente a diferencias en la composición química y finura del cemento (Tabla 3). Así, por ejemplo, el mayor contenido de cenizas volantes que presenta el cemento CEM 42,5 R en relación con el CEM 32,5 N le proporciona una menor porosidad, pues las cenizas son capaces de combinarse con la cal procedente de la hidratación de los componentes activos del cemento portland para dar compuestos parecidos a los procedentes de la hidratación del cemento, especialmente silicatos hidratados, que colmatan los poros y cierran los conductos capilares. Por otra parte, cuanto más finamente se muele un cemento más rápidamente y con mayor eficiencia se producen las reacciones de hidratación, por lo que el grado de hidratación es mayor a una misma edad y, por lo tanto, la porosidad es menor.

Por lo que respecta al comportamiento de los hormigones autocompactables en relación con los tradicionales, claramente se observa que los primeros presentan siempre una menor permeabilidad. Este mejor comportamiento también se refleja en los ensayos de porosidad realizados

The traditional concretes were manufactured in accordance with the above results, and the same materials and doses were then used to prepare the self-compacting concretes, with the exception of the admixture, which was Glenium C355, and the sand composition, as only coarse sand (0/4) was used. The latter change was made to reduce the fines content to spanish code EHE requirements. Slump was found to range from 14 to 16 cm in all these concretes. Two lifts of concrete were placed in the moulds to make the specimens, and consolidated by manual rodding.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Permeability and porosity

As might be expected, both in self-compacting (type A) and traditional (type T) concrete, permeability declined with the W/C ratio. These findings are due to changes in the cement paste microstructure, whose porosity declines with the water dosage.

Focusing on two batches made with different cements but the same W/C ratio (W/C = 0.55), it can be readily seen that higher strength cements yield less permeable concretes. Permeability declined by 16.7% in the self-compacting and 9.1% in traditional concretes made with the 42.5 R cement (Figure 1). This finding is due essentially to differences in the chemical composition and fineness of the two cements (Table 3). The higher fly ash content in CEM 42.5 R compared to CEM 32.5 N, for instance, lowers concrete porosity: as the ash combines with the lime resulting from the hydration of the active components of the Portland cement, the pores are filled and the capillary spaces closed by the compounds formed, which are similar to those resulting from cement hydration, particularly hydrated silicates. Moreover, the finer a cement is ground, the quicker and more efficient are the hydration reactions, leading to a higher degree of hydration and consequently lower porosity at any given age.

Self-compacting concretes, in turn, are perceptibly less permeable than the traditional materials. This better performance was observed in the porosity tests conducted

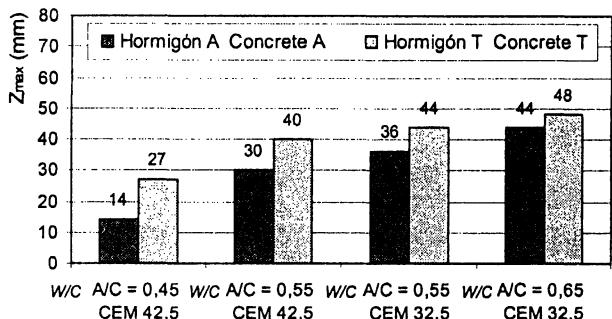


Figura 1.- Profundidad máxima de penetración de agua bajo presión (EN 12.390-8).

Figure 1.- Maximum depth of penetration, low-pressure water test (EN 12.390-8).

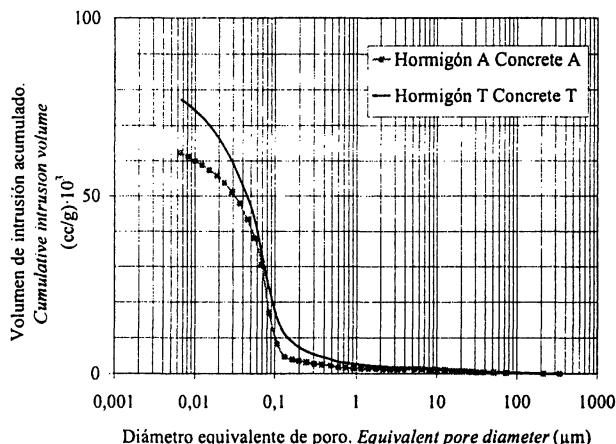


Figura 3.- Distribución de tamaños de poro normalizada.

Figure 3.- Standardized pore size distribution.

con los hormigones A-65-32 y T-65-32. De hecho, tal y como se aprecia en la Figura 3 el hormigón tradicional es más poroso, siendo el volumen total de poros abiertos un 21,01% mayor (Tabla 2).

Ahora bien, a efectos de durabilidad, no interesa tanto el volumen total de poros como su tamaño o distribución. En este sentido, aunque podría apuntarse que la estructura porosa del hormigón A-65-32 es ligeramente más fina que la del T-65-32, realmente la distribución de tamaños de poro es, en términos relativos, muy similar en ambos casos, pues las diferencias son mínimas y, por lo tanto, dentro de los márgenes de error propios del ensayo (Figura 4).

No obstante, si se analiza la Figura 3 se observa que tanto el contenido total de poros capilares (tamaño entre $0,01\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$) como el de poros de gel (tamaño inferior a $0,01\mu\text{m}$) es menor en el hormigón A-65-32. Este hecho es el que justifica la menor permeabilidad al agua que han presentado los hormigones autocompactables, reducción que, en el caso concreto de los hormigones fabrica-

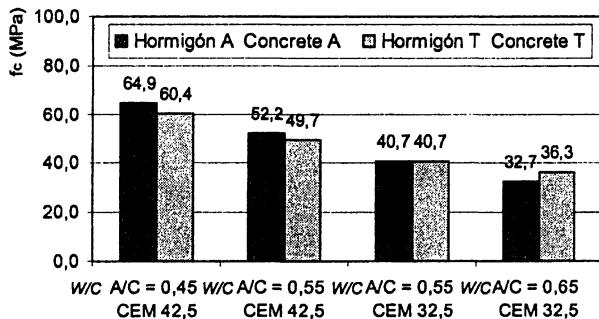


Figura 2.- Resistencia a compresión.

Figure 2.- Compressive strength.

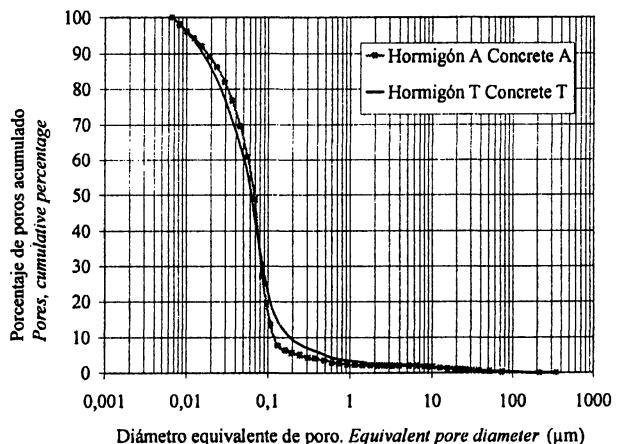


Figura 4.- Distribución de tamaños de poro.

Figure 4.- Pore size distribution.

with concretes A-65-32 and T-65-32. As Figure 3 shows, the traditional concrete was more porous, with a 21.01% greater open pore volume (Table 2).

The total volume of pores has less of an impact on durability, however, than size or distribution. In this regard, although the porous structure was slightly finer in concrete A-65-32 than in concrete T-65-32, the pore size distribution was very similar in the two, relatively speaking, as the differences found were very small and therefore within the margin of error of the test itself (Figure 4).

Nonetheless, Figure 3 shows both the total capillary pore content (size from $0,01$ to $1\mu\text{m}$) and the total gel-size pore content (under $0,01\mu\text{m}$) to be smaller in concrete A-65-32. This finding explains the lower water permeability in self-compacting than traditional concretes. In concretes made with a W/C ratio of 0.65, the difference recorded came to 8.33%. In any event,

dos con relación A/C igual a 0,65, ha sido del 8,33 %. En cualquier caso, hay que señalar que son los poros capilares y no los poros de gel los que verdaderamente han incidido sobre la permeabilidad pues, debido al reducido tamaño de los segundos, difícilmente va a poder penetrar el agua en ellos.

En definitiva, del análisis microestructural realizado se desprende que, mediante la utilización de superplastificantes adecuados, se pueden fabricar hormigones que sin necesidad de ser vibrados presentan una distribución de poros similar a la de los hormigones tradicionales pero con algo menos de porosidad capilar, lo que les confiere mejores prestaciones frente a la permeabilidad al agua y, por lo tanto, desde ese punto de vista, mayor durabilidad.

3.2. Resistencia a compresión

Para las distintas relaciones A/C y los distintos tipos de cemento utilizados, los valores de resistencia obtenidos en los hormigones autocompactables han sido muy similares a los obtenidos en los hormigones tradicionales (Figura 2).

No obstante, aunque las discrepancias registradas son en todos los casos inferiores al 10%, existen diferencias de comportamiento resistente entre ambos tipos de hormigones en función del contenido de finos calizos utilizados en la mezcla. Así, por ejemplo, en los hormigones menos resistentes y, por lo tanto, en los que más contenido de finos hubo que utilizar para compensar la falta de cemento, se observa una pérdida de resistencia de los hormigones autocompactables en relación con los tradicionales. Además, estas pérdidas son mayores cuanto mayor es el contenido de finos calizos utilizados. Por el contrario, cuando el contenido de cemento es importante, la tendencia se invierte, presentando mejor comportamiento los hormigones autocompactables. De hecho, los hormigones autocompactables con relaciones A/C iguales a 0,65, 0,55 y 0,45 se dosificaron, respectivamente, con un 46,66, un 34,93 y un 23,25% más de finos calizos que los correspondientes hormigones tradicionales, obteniéndose resistencias un 9,92% menores en los primeros, sensiblemente iguales en los segundos y un 6,93% mayores en los terceros.

En definitiva, en este trabajo se observa que existen dos factores que inciden de forma opuesta sobre la resistencia a compresión. Por un lado, según lo visto en el apartado anterior, los hormigones autocompactables son algo menos porosos y su estructura porosa es ligeramente más fina que la de los hormigones tradicionales, por lo que su resistencia debería de ser un poco mayor; pero, por otro lado, un exceso en el contenido de finos aportados por los áridos se traduce en pérdidas de resistencia. Este efecto contrapuesto es probablemente debido a la calidad de los

permeability is actually impacted by the capillary rather than the gel-size pores, whose small size makes them virtually water-impenetrable.

In summary, the microstructural analysis conducted shows that the use of suitable superplasticizers yields concretes that, without vibration, have a pore size distribution similar to and capillary porosity smaller than achieved in traditional concretes after consolidation. The resulting lower permeability to water makes such concretes more durable in this regard.

3.2. Compressive strength

The strength values obtained for self-compacting concretes were very similar to the values for traditional concretes for all the W/C ratios and cement types tested (Figure 2).

Nonetheless, although the discrepancies recorded were under 10% in all cases, strength performance differed between the two concretes depending on the lime fines used in the mix. In the lower strength concretes, for instance, in which more fines had to be added to compensate for the lack of cement, the strength found for self-compacting concretes was lower than for traditional concretes. Moreover, the higher the fines content used, the wider the gap between the two. On the contrary, when the amount of cement used was larger, the reverse was observed, with the self-compacting concretes performing better. Specifically, the lime fines contents in self-compacting concretes with W/C ratios of 0.65, 0.55 and 0.45 were respectively 46.66, 34.93 and 23.35% higher than in the traditional concretes, while the respective SCC strength values were 9.92% lower, appreciably the same and 6.93% higher than the traditional material.

In short, this study found that the two factors impacting compressive strength have opposite effects. On the one hand, as seen in the preceding item, since self-compacting concretes are somewhat less porous and their porous structure is slightly finer than traditional concretes, they should have slightly higher strength values; but on the other hand, an excess in the fines content in the aggregate translates into strength losses. This counter-effect is very likely due to the quality of the fines used (low SE and essentially high methylene blue value), inasmuch as the

finos utilizados (EA bajo y valor de azul de metileno sensiblemente alto), pues la presencia de minerales arcillosos afecta a la adherencia árido-pasta y contrarresta los efectos beneficiosos que sobre la resistencia del hormigón aportan, en general, los finos calizos, como son: la formación de una matriz cementante más densa (al ocupar los espacios entre las partículas de cemento que, de otro modo, estarían ocupados por agua), el incremento durante los primeros días de la velocidad de hidratación de algunos de los compuestos del clínker, en especial del C₃S, o la disminución del tamaño de los cristales de portlandita al actuar los finos como centros de nucleación de los hidratos formados durante las reacciones de hidratación (22). Así pues, dependiendo del contenido de finos utilizado en la mezcla, la unión de ambos factores podrá afectar de forma diferente a la resistencia. En cualquier caso, dentro del rango de resistencias analizadas, las diferencias entre ambos tipos de hormigones son poco importantes.

Por lo que respecta a la relación entre resistencia a compresión y profundidad de penetración de agua, en la Figura 5 se puede observar que existe bastante correlación entre ambos parámetros (coeficientes de correlación R² superiores a 0,95), si bien dicha relación también depende del tipo de hormigón dado que los hormigones autocompactables son menos permeables que los tradicionales para una misma resistencia.

En los dos supuestos analizados (hormigones A y T), a medida que aumenta la resistencia disminuye la permeabilidad, siendo la pendiente de la recta de regresión prácticamente la misma en ambos casos. En este sentido, de acuerdo con los resultados obtenidos, dicha relación podría expresarse de la siguiente forma:

$$Z_{\max} = -0,8654 f_c + k$$

donde Z_{max} es la máxima profundidad de penetración de agua, expresada en mm, f_c es la resistencia a compresión del hormigón, expresada en MPa y k es una constante

presence of clay minerals affects the aggregate-paste bond, countering the generally beneficial effects of lime fines on strength. These effects include: formation of a denser cementitious matrix (by occupying the spaces between cement particles that would otherwise be occupied by water), and the early age increase in the hydration rate of some of the clinker components, in particular C₃S, with the concomitant decline in the size of the portlandite crystals, in which the fines act as nucleation sites for the hydrates formed during the hydration reactions (22). Depending on the fines content used in the mix, then, the combination of the two factors may affect strength in one way or the other. In any event, in the range of strengths analyzed, the differences found between the two types of concretes were minor.

Compression strength and depth of water penetration, in turn, were found to be closely correlated as shown in Figure 5 (correlation coefficients R² of over 0.95). This relationship, however, also depends on the type of concrete used, since self-compacting concretes are less permeable than the traditional materials at any given strength.

In the cases analyzed (concretes A and T), permeability declined as strength rose, while the slope of the regression line was practically the same in both. Further to the results obtained, the relationship may be expressed as follows:

where Z_{max} is the maximum depth of water penetration expressed in mm, f_c is concrete compressive strength expressed in MPa and k is a constant that depends on the

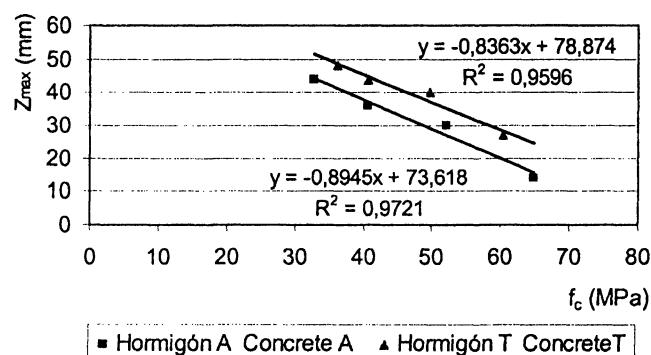


Figura 5.- Relación entre resistencia a compresión y profundidad máxima de penetración de agua.

Figure 5.- relationship between compressive strength and maximum depth of water penetration.

que depende del tipo de hormigón. En esta investigación los valores que se obtienen del coeficiente k son 72,23 para el hormigón autocompactable y 80,24 para el tradicional. La aplicación de esta ecuación proporciona excelentes ajustes con los valores reales de Z_{max} , siendo el coeficiente de correlación R^2 superior a 0,97.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el trabajo experimental realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Mediante la utilización de aditivos superplasticificantes adecuados se pueden fabricar hormigones que, sin necesidad de ser vibrados, presentan una distribución de poros similar a la de los hormigones tradicionales pero con algo menos de porosidad capilar, lo que les confiere mejores prestaciones frente a la penetración de agua y, por lo tanto, desde ese punto de vista, mayor durabilidad.
- Aunque tradicionalmente se vienen elaborando HAC de gran resistencia, también es posible fabricar hormigones que cubran el rango habitual de resistencias manejadas en edificación, es decir, entre 25 y 30 MPa.
- Los hormigones autocompactables tienden a presentar una mejor resistencia a compresión que los hormigones tradicionales. No obstante, cuando para su fabricación se emplean grandes cantidades de finos calizos cuyo equivalente de arena es bajo la tendencia se invierte, obteniéndose peores resultados. En cualquier caso, dentro del rango de resistencias analizadas, las diferencias entre ambos tipos de hormigones son poco importantes.
- Existe una relación de tipo lineal entre la profundidad máxima de penetración de agua y la resistencia a compresión. Dicha relación depende a su vez del tipo de hormigón, dado que los hormigones autocompactables son menos permeables que los tradicionales para una misma resistencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo manifiestan su agradecimiento a los técnicos de laboratorio R. Calabuig y J. Martínez y al Instituto de Tecnología Cerámica de Castellón por su desinteresada colaboración en la realización de los ensayos. Asimismo, se agradece al Área de Apoyo Lingüístico a la I+D+i de la Universidad Politécnica de Valencia su ayuda en la traducción de este artículo. Finalmente, reseñar que los materiales utilizados en este estudio han sido gentilmente suministrados por CEMEX, DEGUSSA y HORLESA.

type of concrete. In the present study the values found for coefficient k were 72.23 for self-compacting concrete and 80.24 for the traditional product. This equation provided an excellent fit to the real values of Z_{max} , with a correlation coefficient of over 0.97.

4. CONCLUSIONS

The following conclusions may be drawn from the experimental results:

- The use of suitable superplasticizers yields concretes that, with no need for vibration, have a pore size distribution similar to traditional concretes, but with less capillary porosity. The resulting lower permeability to water makes such concretes more durable in this regard.*
- Although traditionally SCC has been manufactured as high-strength concrete, the standard strengths used in building, i.e., values of 25 and 30 MPa, can also be made.*
- Self-compacting concretes tend to have higher compression strength values than traditional concretes. Nonetheless, when large amounts of lime fines with a low sand equivalent are used in its manufacture, SCC is found to have lower strength values. In any event, in the range of strengths analyzed, the differences between the two types of concretes are minor.*
- Maximum depth of water penetration and compressive strength are linearly correlated. That correlation depends, in turn, on the type of concrete, since for any given strength level, self-compacting concrete is less permeable than traditional concrete.*

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors of this paper express their gratitude to laboratory technicians R. Calabuig and J. Martínez and the Castellón Institute of Ceramic Technology for their selfless co-operation in conducting the tests. The R&D+i Linguistic Support Division of the University Polytechnic of Valencia is likewise thanked for their assistance in translating this article. Finally, the materials used in this study were kindly supplied by CEMEX, DEGUSSA and HORLESA.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) H. Okamura: *Self-compacting high-performance concrete*. Concrete International, Vol. 19, nº 7 (1997), pp. 50-54.
- (2) J. Botte, J. Burdin, M. Zermatten: *SCC tunnel applications: Cleuson Dixence project and Loetschberg basis tunnel, Switzerland*. Proceedings of 1st international RILEM symposium on self compacting concrete, pp. 681-693. Stocholm, 1999.
- (3) P. Borralleras: *Obras y realizaciones con hormigón autocompactable (HAC)*. Hormigón y Acero, nº 228-229 (2003), pp. 149-159.
- (4) N. Su, K. Hsu, H. Chai: *A simple mix design method for self-compacting concrete*. Cem. Concr. Res., Vol. 31, nº 12 (2001), pp. 1799-1807.
- (5) P. C. Gomes: *Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña (2002).
- (6) Y. Xie, B. Liu, J. Yin, S. Zhou: *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash*. Cem. Concr. Res., Vol. 32, nº 3 (2002), pp. 477-480.
- (7) M. Sari, E. Prat, J. F. Labastire: *High strength self-compacting concrete. Original solutions associating organic and inorganic admixtures*. Cement and Concrete Research, Vol. 29, nº 6 (1999), pp. 813-818.
- (8) M. Lachemi, K. M. A. Hossain, V. Lambros, P. C. Nkinamubanzi, N. Bouzoubaâ: *Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures*. Cem. Concr. Res., Vol. 34, nº 6 (2004), pp. 917-926.
- (9) F. De Larrard, C. F. Ferraris, T. Sedran: *Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material*. Materials and Structures, Vol. 31, nº 211 (1998), pp. 494-498.
- (10) A. W. Saak, H. M. Jennings, S. P. Shah: *Characterization of the rheological properties of cement paste for use in self-compacting concrete*. Proceedings of 1st international RILEM symposium on self compacting concrete (1999), pp. 83-94. Stocholm.
- (11) M. R. Geiker, M. Brandl, L. N. Thrane, D. H. Bager, O. Wallevik: *The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete*. Cem. Concr. Res., Vol. 32, nº 11 (2002), pp. 1791-1795.
- (12) G. Buchenau, B. Hillemeier: *Quality-test to prove the flow behaviour of SCC on site*. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete (2003), pp. 837-843. Reykjavik.
- (13) V. K. Bui, D. Montgomery, I. Hinczak, K. Turner: *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 32, nº 9 (2002), pp. 1489-1496.
- (14) G. De Schutter, K. Audenaert, V. Boel, L. Vandewalle, D. Dupont, G. Heirman, J. Vantomme, J. D'hemricourt: *Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a belgian research project*. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete, pp. 799-807. Reykjavik, 2003.
- (15) S. Assié, G. Escadeillas, G. Marchese: *Durability of self compacting concrete*. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete (2003), pp. 655-662. Reykjavik.
- (16) W. Zhu, P. Bartos: *Permeation properties of self compacting concretes*. Cem. Concr. Res. Vol. 33, nº 7 (2003), pp. 921-926.
- (17) F. Jacobs, F. Hunkeler: *Ecological performance of self-compacting concrete*. Proceedings of 2nd international RILEM symposium on self compacting concrete (2001), pp. 707-714. Tokyo.
- (18) K. Audenaert, G. De Schutter: *Chloride penetration in self compacting concrete*. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete (2003), pp. 818-825. Reykjavik.
- (19) V. Boel, K. Audenaert, G. De Schutter: *Behaviour of self-compacting concrete concerning frost action with deicing salts*. Proceedings of 3rd international RILEM symposium on self compacting concrete (2003), pp. 837-843. Reykjavik.
- (20) M. Jooss, H. W. Reinhardt: *Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature*. Cem. Concr. Res., Vol. 32, nº 9 (2002), pp. 1497-1504
- (21) R. Gettu, P.C. Gomes, L. Agulló: *Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia. Dosificación y métodos de caracterización*. Proceedings II congreso de ACHE (2002), pp. 13-22. Madrid.
- (22) V. B. Bosiljkov. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. Cem. Concr. Res., Vol. 33, nº 9 (2003), pp. 1.279-1.286
