

Variación de la morfología de la porosidad en hormigones de altas prestaciones en masa y reforzado con fibras a edades tempranas

Pore morphology variation in plain and fiber-reinforced high-performance concrete during the early age

Álvaro Mena Alonso^{*,a}, Dorys Carmen González Cabrera^b, Jesús Mínguez Algarra^c y Miguel Ángel Vicente Cabrera^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Estudiante de Doctorado, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, ama0104@alu.ubu.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Prof. Contratado Doctor Fijo, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, dgonzalez@ubu.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Prof. Ayudante Doctor, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, jminguez@ubu.es

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Prof. Titular de Universidad, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, mvicente@ubu.es

RESUMEN

En este trabajo se ha analizado la variación de la morfología de la porosidad en dos tipos de hormigón, en masa y reforzado con fibras, y para dos ambientes de curado diferentes, seco y húmedo. El estudio se ha realizado durante la primera semana de curado, y los datos han sido obtenidos mediante tomografía computarizada (TC) y tratados con software de procesamiento digital de imágenes (PDI). Los resultados muestran que las fibras aumentan la rigidez de la matriz, lo que proporciona un aumento de la porosidad y del tamaño de poro, y una reducción del factor de forma, entre otros efectos.

ABSTRACT

In this work, pore morphology variation has been analyzed in two concrete mixtures, plain concrete and fiber reinforced concrete, and under two curing conditions, dry and moisture-saturated. The study has been developed during the first curing week, and the required data has been obtained by means of computerized tomography (CT) and has been processed with a Digital Image Processing (DIP) software. The results show that fibers increase matrix stiffness, which results in an increase of porosity and pore size, as well as a reduction of shape factor, among other effects.

PALABRAS CLAVE: morfología de la porosidad, tomografía computarizada, hormigón reforzado con fibras.

KEYWORDS: pore morphology, computed tomography, fiber-reinforced concrete.

1. Introducción

El hormigón es un material poroso por naturaleza. Esta porosidad, además de ser inevitable, muestra una importante variabilidad entre hormigones diferentes. Por otro lado, aunque en principio la porosidad no es deseable, para algunas necesidades particulares es recomendable diseñar los hormigones con un determinado porcentaje de porosidad.

El contenido de poros tiene una fuerte influencia en el comportamiento macroscópico

del hormigón. En el caso del hormigón fresco, la porosidad modifica su reología [1-3]. En cuanto al hormigón endurecido, ésta tiene un impacto relevante sobre diversas propiedades, tales como la permeabilidad [4-7], el comportamiento bajo ciclos hielo-deshielo [8, 9] y el comportamiento bajo fatiga [10-12] entre otros.

En algunas situaciones determinadas, la porosidad es una propiedad deseable. Se trata del caso de, por ejemplo, los hormigones permeables, empleados en pavimentos de carretera, entre otras aplicaciones. Finalmente, otro

caso singular en el que los poros son beneficiosos es el de los elementos sometidos a ciclos hielo-deshielo [8, 9], puesto que mejoran la respuesta del hormigón y aumenta su vida.

Los poros se pueden clasificar atendiendo a su tamaño en microporos (menores de 1 μm), mesoporos (entre 1 μm y 10 μm) y macroporos (mayores de 10 μm) [13]. Además, existen algunos métodos tradicionales para analizar la porosidad, tales como la adsorción de nitrógeno y la porosimetría por inyección de mercurio [14, 15]. Sin embargo, tienen algunas limitaciones importantes, como que sólo pueden proporcionar la distribución del tamaño de poro y que sólo ofrecen información sobre la porosidad abierta.

En la actualidad, la Tomografía Computarizada (TC) está siendo empleada satisfactoriamente para analizar, en general, la microestructura del hormigón. En los últimos años, ha habido un interés creciente en el estudio de la porosidad [4, 16-23] mediante esta tecnología, ya que permite identificar cada poro individual, y obtener sus parámetros geométricos (posición, volumen, longitud, etc.), independientemente de si son poros cerrados o abiertos. Esto, a su vez, facilita la obtención de otros parámetros de interés, así como de correlaciones.

El uso de hormigones reforzados con fibras para aplicaciones estructurales en ingeniería civil es cada vez mayor. Se trata de una solución muy sugerente, tanto en términos económicos como de mejora del comportamiento mecánico del hormigón [24-28]. Sin embargo, las fibras modifican la microestructura de la matriz cementicia y, en concreto, la porosidad (contenido de poros, distribución de tamaños, forma, etc.). Además, ésta evoluciona de forma apreciable durante los primeros días de curado, lo cual no se ha estudiado hasta la fecha.

En este trabajo, se han estudiado dos hormigones diferentes: hormigón en masa y hormigón reforzado con fibras de acero, curados bajo dos ambientes diferentes: ambiente saturado de humedad y ambiente seco. En todos los casos, la matriz cementicia es la misma.

Todas las probetas han sido escaneadas utilizando un equipo de TC y, posteriormente, se ha obtenido la morfología de los poros mediante rutinas de postproceso personalizadas. Además, se ha estudiado la variación de los parámetros durante las primeras edades de curado.

La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presenta el programa experimental, en la Sección 3 se describen y comentan los resultados de los ensayos y, finalmente, en la Sección 4 se muestran las conclusiones.

2. Programa experimental

En esta sección, se describen los materiales, el proceso de fabricación de las muestras y el procedimiento de escaneo.

2.1 Materiales

Las muestras de ensayo consistieron en un total de 12 cilindros cuyas dimensiones fueron 45.2 mm de diámetro y 50 mm de altura (Figura 1). Del total, 6 de ellas se fabricaron con hormigón en masa (HM) y las 6 restantes con hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). En la Tabla 1 se muestran las dosificaciones de ambas tipologías de hormigón.

Tabla 1. Dosificación de los hormigones.

Materiales	HM	HRFA
Cemento (kg/m^3)	700.0	700.0
Agua (kg/m^3)	217.0	217.0
Superplastificante (kg/m^3)	24.5	24.5
Nanosílice (kg/m^3)	10.5	10.5
Árido fino (0/4) (kg/m^3)	1400.0	1400.0
Fibras metálicas (% en vol.)	0.0%	0.1%

Las muestras de HRFA se reforzaron con 7.8 kg/m^3 de fibras de acero Dramix OL 8/.16 (BEKAERT). Las fibras son de 8 mm de longitud y 0.16 mm de diámetro; es decir, su relación de aspecto es de 50. De acuerdo con la información del fabricante, su resistencia a tracción es de 3000 MPa y su módulo de elasticidad es de 200 GPa.

Además, en ambos hormigones se incluyeron nanosílice MasterRoc MS 685 (BASF), superplastificante Glenium 52 (BASF) y árido sílice con un tamaño máximo de 4 mm, los

cuales se mezclaron con cemento Portland de alta resistencia CEM I 52.5 R.

Adicionalmente, se fabricaron dos prismas de dimensiones 40x40x160 mm; uno por cada tipo de hormigón. De cada uno, se obtuvieron 3 cubos de 40 mm de lado, los cuales fueron ensayados a compresión (de acuerdo con EN 196-1:2016 [29]) para caracterizar la resistencia a compresión. Los valores de la resistencia media a compresión f_{cm} fueron de 68.6 MPa para el HM y 69.2 MPa para el HRFA, con unas desviaciones de 1.7 MPa y 1.9 MPa, respectivamente. Por lo tanto, estadísticamente no se observan diferencias entre en la resistencia a compresión de ambos hormigones.

2.2 Proceso de fabricación

Las 12 muestras se fabricaron en moldes de policloruro de vinilo (PVC) de 45.2 mm de diámetro interior (50 mm de diámetro exterior). En el fondo de cada molde, se soldó un disco de PVC de 60 mm de diámetro y 3 mm de espesor, con el fin de asegurar una junta estanca (Figura 1).

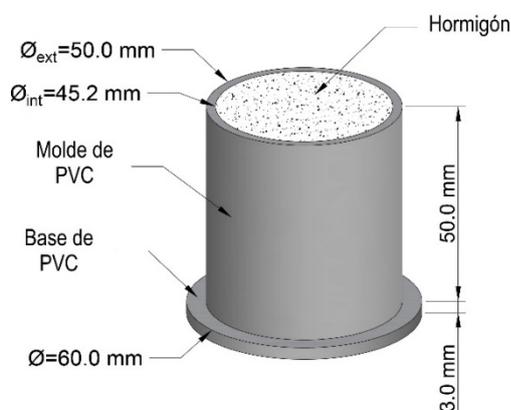


Figura 1. Molde y muestra.

El hormigón se fabricó empleando una mezcladora de mortero de cemento, y de acuerdo con las especificaciones de la normativa EN 196-1:2016 [29]. Los moldes se llenaron en dos partes. No se vibraron, pero sí se aplicaron pequeños golpes en el lateral de las muestras, una vez fueron llenadas, para facilitar la expulsión del aire atrapado. Finalmente, la superficie libre se alisó con una paleta.

Tras la preparación de las muestras, 6 de ellas (3 de HM y 3 de HRFA) se introdujeron en una sala de curado donde se mantuvieron en un ambiente saturado de humedad; es decir, a 20°C y 100% de humedad. Por otro lado, las 6 muestras restantes (de nuevo, 3 de HM y 3 de HRFA) se introdujeron en otra sala de curado donde permanecieron en un ambiente seco; es decir, a 20°C y 60% de humedad. En este artículo, las muestras mantenidas en ambiente húmedo de curado se designarán por las siglas HM-H y HRFA-H, mientras que las que permanecieron en ambiente seco de curado se denominarán HM-S y HRFA-S.

2.3 Procedimiento de escaneo

Todas las muestras se escanearon varias veces a lo largo de la primera semana de curado, puesto que es en la que se espera que se produzcan los cambios más relevantes en la microestructura del hormigón. En concreto, se escanearon durante los días 1, 2, 3, 4 y 7 con un equipo de TC.

El escáner de TC empleado es un dispositivo GE Phoenix v|tome|x equipado con un tubo de rayos X de nano-foco de 300kV/500W. Dicho escáner produjo 2000 imágenes por muestra con un tamaño de vóxel (píxel volumétrico) de $25 \times 25 \times 25 \mu\text{m}^3$. El número total de vóxeles de cada muestra fue de aproximadamente $4.3 \cdot 10^9$.

A continuación, se empleó el software de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) AVIZO (FEI Visualization Sciences Group) para identificar y aislar cada poro individual en el interior de las muestras. En primer lugar, el software identificó los vóxeles que pertenecían a poros; es decir, aquellos que mostraban un nivel de gris bajo un umbral. En este caso, tras analizar los histogramas de distribución de grises, se consideró razonable un valor umbral de 65.

Seguidamente, el software combinó los vóxeles en contacto, de forma que se identificaron y aislaron todos los poros de cada muestra. El resultado final fue una matriz que contenía

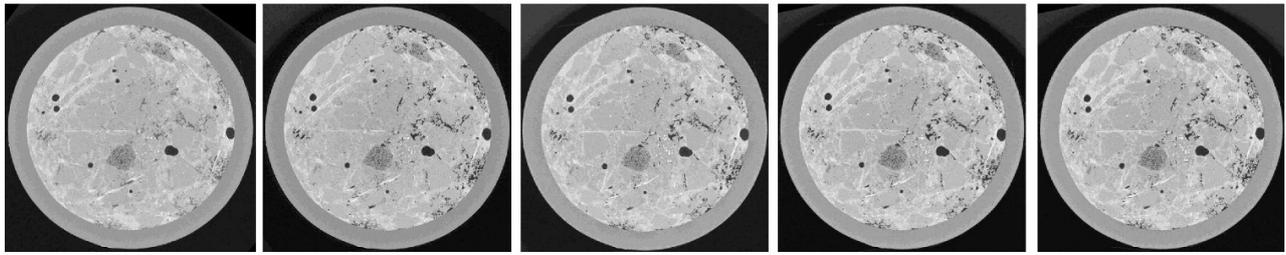


Figura 2. Imágenes pertenecientes al HRFA-S a diferentes edades.

las coordenadas X, Y, Z del centro de gravedad de cada poro. La Figura 2 muestra las imágenes de una de las probetas a lo largo del tiempo de estudio.

Se puede apreciar que una parte importante de los poros más grandes se situaba en el contorno lateral de las muestras. Esto se explica por el efecto pared y una ligera retracción del hormigón. Para evitar la distorsión de los resultados debido a la presencia de estos poros ‘no convencionales’, se optó por descartar del estudio el perímetro lateral de las muestras. En concreto, se analizaron cilindros con un diámetro interior del 90% del diámetro original de las muestras; es decir, con 40.7 mm de diámetro. Adicionalmente, para evitar resultados erróneos se descartaron las secciones de las caras superior e inferior, resultando una altura total de estudio de 49.9 mm.

Otra consideración importante es que los poros con menos de 3 vóxeles en la dirección mayor (es decir, de menos de 75 μm de longitud, aproximadamente) se descartaron, ya que el escáner de TC no tiene la suficiente nitidez como para identificarlos correctamente. Por otro lado, los poros de longitud mayor de 10 mm también se han eliminado, ya que no son representativos.

3. Resultados y discusión

A simple vista, no es posible detectar diferencias significativas entre las muestras de diferentes hormigones ni entre las muestras sometidas a diferentes ambientes de curado. Además, tampoco se puede apreciar su evolución con el tiempo. Por lo tanto, para analizar los datos en profundidad y extraer la información relevante

es necesario el uso de software de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) en combinación con rutinas de postproceso personalizadas. En esta sección, se muestran los resultados de la etapa de postproceso. Los valores mostrados hacen referencia a los valores medios de las 3 muestras de cada tipo de hormigón y ambiente de curado. En todos los casos, se ha observado una baja dispersión de las muestras.

3.1 Volumen total de poros y porosidad

Los primeros parámetros estudiados son el volumen total de poros y la porosidad, la cual se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen de la probeta.

En la Figura 3, se muestra la variación de la porosidad a lo largo del tiempo de estudio.

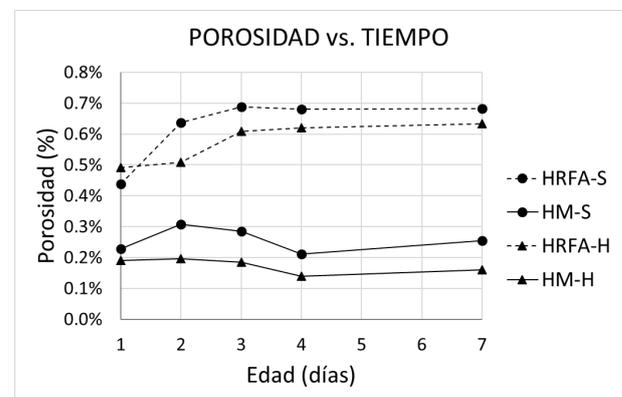


Figura 3. Variación de la porosidad con la edad del hormigón.

A partir de la Figura 3, se pueden obtener algunas conclusiones interesantes. La primera de ellas es que la porosidad es mayor en HRFA que en HM, tanto para ambiente de curado seco como húmedo. Además, dado que las muestras no se vibraron, se concluye que la presencia de fibras provoca un incremento del aire atrapado. Esto coincide con los resultados

de otras investigaciones [30, 31], las cuales observaron que la adición de fibras incrementaba la viscosidad del mortero fresco, dificultando la eliminación del aire atrapado.

Por otro lado, en la Figura 3 también se observa que, para un mismo tipo de hormigón, la porosidad es mayor en las muestras sometidas a ambiente seco de curado que en las mantenidas en ambiente húmedo. Esto se explica por el propio proceso de curado. En el caso de las muestras de ambiente seco (HM-S y HRFA-S) se produjo una mayor pérdida de agua por evaporación, dando lugar a más poros. Por el contrario, en las muestras de ambiente húmedo (HM-H y HRFA-H) el agua permaneció en la probeta y reaccionó más fácilmente con las partículas de cemento, reduciendo de este modo la porosidad.

Con respecto a la variación de la porosidad con el tiempo, se observa que las muestras de HRFA tienen un incremento progresivo de la misma, aunque este fenómeno se ve amortiguado con los días. Por otro lado, en las muestras de HM se aprecia que, pese a ligeras variaciones, la porosidad se mantiene constante para ambos ambientes de curado.

La porosidad en el hormigón es un fenómeno dinámico sobre el que actúan dos fuerzas opuestas. Por un lado, se tiene el proceso de curado, que se basa en el consumo de agua. Al comienzo, la mayor parte de los poros están llenos de agua, por lo que el escáner de TC no los reconoce como tal. Después, conforme avanza la hidratación, el agua reacciona con las partículas de cemento, dando lugar a productos de hidratación. Como consecuencia, el espacio libre es ocupado progresivamente por aire, lo que provoca un incremento de la porosidad interna.

Por otro lado, el aire atrapado en el interior tiende a abandonar las muestras. En su lugar, los espacios dejados tienden a ser ocupados por la pasta de cemento, lo que implica un descenso progresivo de la porosidad. Macroscópicamente, este efecto es conocido como

asentamiento plástico o retracción plástica inicial.

En el caso de las muestras de HRFA, su matriz cementicia es más consistente que en el HM (por la presencia de fibras), por lo que el primer fenómeno prevalece sobre el segundo y, por tanto, el resultado es un incremento progresivo y global de la porosidad. Sin embargo, en las muestras de HM ambos fenómenos están equilibrados, por lo que la variación de la porosidad es mínima.

3.2 Curvas de volumen de poro y curvas porosimétricas

Mediante el empleo software de PDI se puede obtener la geometría exacta de cada poro; en particular, su volumen y su longitud, definida ésta como la distancia máxima entre dos vértices pertenecientes a un mismo poro.

Con esta información, se pueden trazar las curvas de volumen de poro y las curvas porosimétricas, las cuales representan la distribución del tamaño de poro. Las primeras se definen como las gráficas que correlacionan la longitud de un poro con el volumen total de los poros que presentan una longitud igual o menor a dicho poro (Figuras 4 a 7). Las segundas son idénticas, salvo que en este caso el volumen de los poros se representa en términos porcentuales con respecto al total (Figuras 8 a 11).

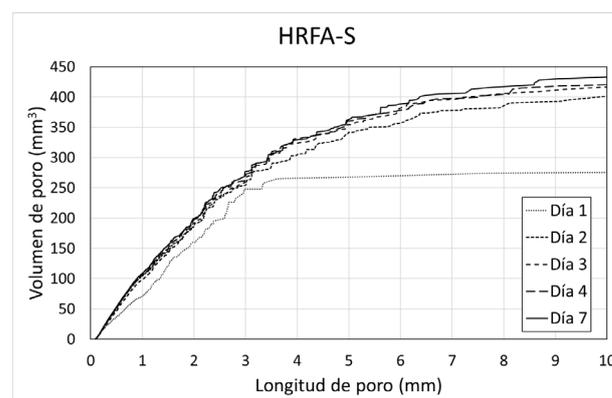


Figura 4. Curvas de volumen de poro. HRFA-S

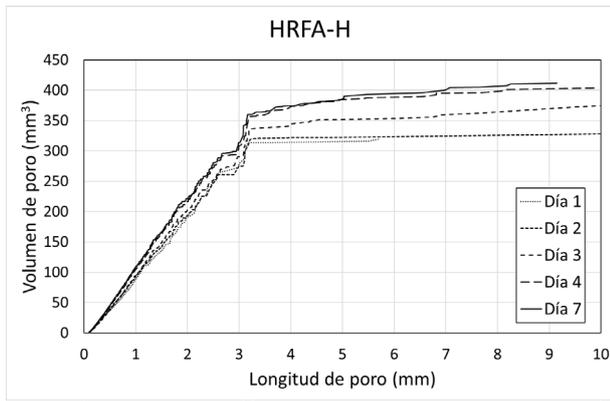


Figura 5. Curvas de volumen de poro. HRFA-H

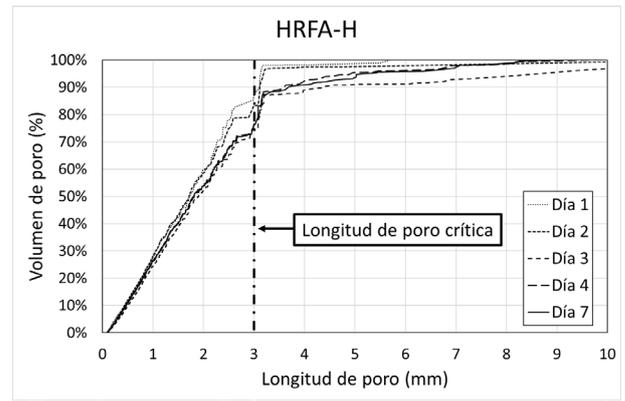


Figura 9. Curvas porosimétricas. HRFA-H

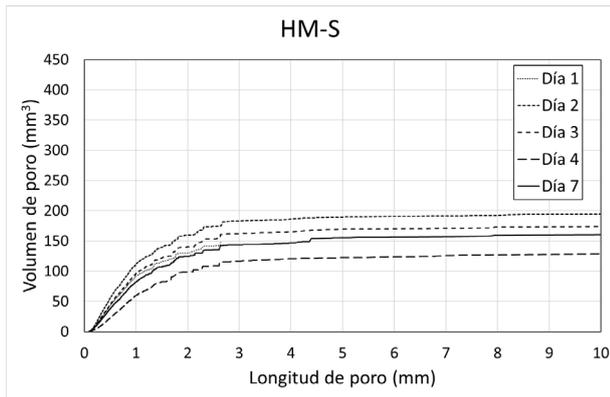


Figura 6. Curvas de volumen de poro. HM-S

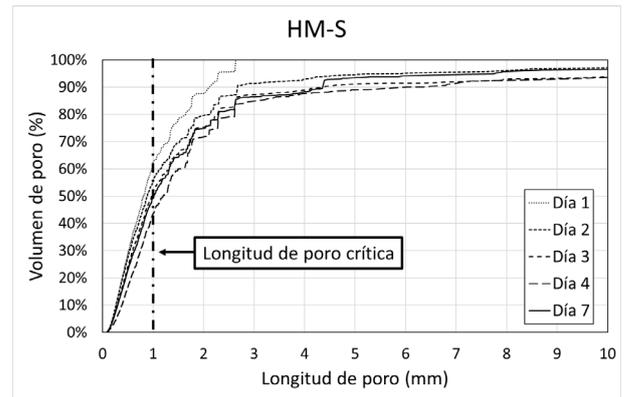


Figura 10. Curvas porosimétricas. HM-S

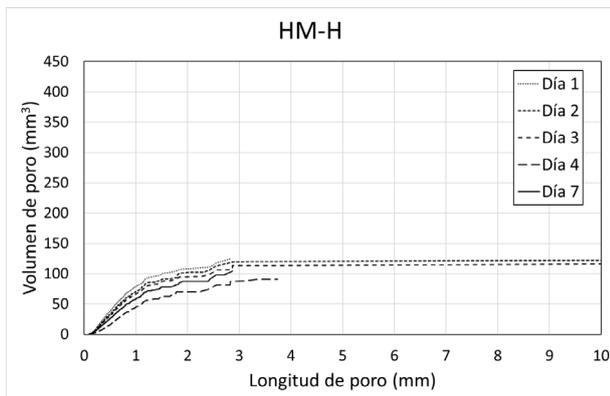


Figura 7. Curvas de volumen de poro. HM-H

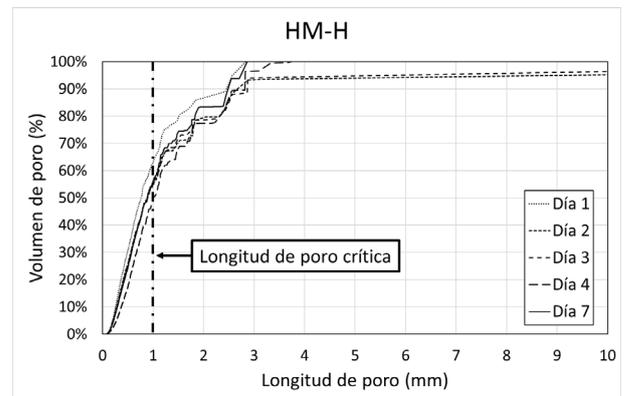


Figura 11. Curvas porosimétricas. HM-M

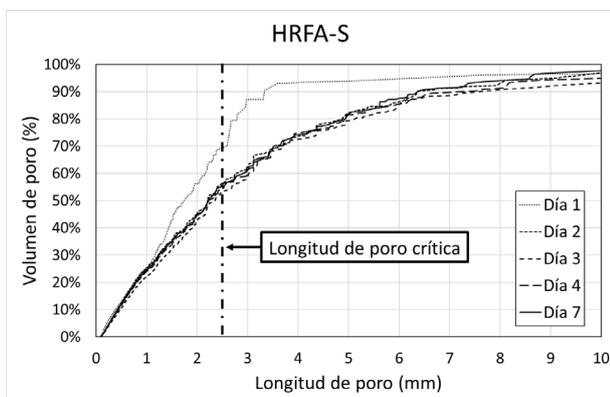


Figura 8. Curvas porosimétricas. HRFA-S

En todos los casos, la longitud máxima se ha limitado a 10 mm, puesto que los poros mayores son residuales.

Las Figuras 4 a 7 revelan que, en general, las curvas de volumen de poro tienen pequeñas variaciones con la edad del hormigón. En todos los casos las curvas de volumen de poro de cada día son homotéticas, lo que indica que las variaciones se producen de manera uniforme para todos los tamaños. No obstante, cabe destacar una excepción en el HRFA-S, donde la curva del día 1 es significativamente inferior al

resto. Esto se explica porque los poros inicialmente estaban llenos de agua, por lo que no se identificaron como tales en ese momento.

En el caso del HRFA, las curvas de los días posteriores se van situando sobre las de los anteriores, lo que indica que se produce un incremento progresivo del volumen de poros. Sin embargo, en el HM no se observan tendencias uniformes. Para el HM-S, no se aprecia este incremento; más aún, se intuye o una estabilización o incluso un descenso progresivo del volumen de poros a medida que pasan los días.

Las Figuras 8 a 11 muestran cómo la curva porosimétrica del primer día se encuentra sobre el resto en todos los casos. Este comportamiento se aprecia más claramente en las muestras mantenidas en ambiente seco que en las mantenidas en ambiente húmedo. En cuanto a las curvas de los días posteriores, son prácticamente idénticas en todos los casos, lo que indica que la distribución final del tamaño de poro se alcanzó aproximadamente el segundo día para todos los casos.

Otra conclusión interesante es que, en ambos ambientes de curado, las curvas porosimétricas de HRFA son inferiores a las de HM, lo que indica que el HRFA es capaz de retener poros mayores. Este fenómeno es muy significativo en el caso del HRFA-S.

Por otro lado, en las Figuras 8 a 11 se aprecia que todas las curvas porosimétricas tienen una rama inicial en la que su pendiente es prácticamente constante hasta un valor de longitud de poro, el cual se puede denominar 'longitud de poro crítica'. Este parámetro se podría definir como la longitud máxima hasta la que la distribución del tamaño de poro permanece uniforme. En el caso de las muestras de HRFA, la longitud de poro crítica es de aproximadamente 3 mm para el HRFA-H y de 2.5 mm para el HRFA-S. En cuanto al HM, este parámetro tiene un valor de 1 mm tanto para el HM-H como para el HM-S.

Todos los resultados mostrados pueden ser explicados en términos de una mayor rigidez de la pasta de cemento por parte del HRFA,

inducida por la adición de fibras. El HRFA es capaz de soportar poros más grandes debido a esa rigidez extra, mientras que en el caso del HM los poros más grandes (y, por tanto, más inestables) colapsan con mayor facilidad.

3.3 Factor de forma de los poros

A partir de los datos de volumen y longitud de cada poro, es posible obtener parámetros de segundo orden que también reflejan la morfología de los poros. En este caso, se ha obtenido el factor de forma, definido como el cociente entre el volumen de un poro y el volumen de la esfera circunscrita a dicho poro, tal y como se muestra en la Ecuación (1):

$$FF = \frac{V_p}{\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot L_p^3} \quad (1)$$

donde V_p es el volumen de poro y L_p es la longitud de poro.

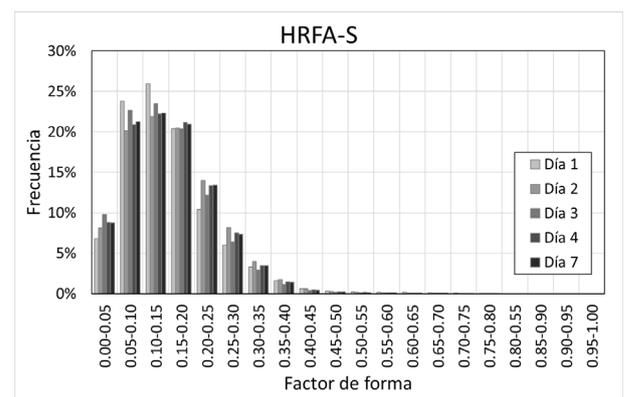


Figura 12. Histogramas del factor de forma HRFA-S

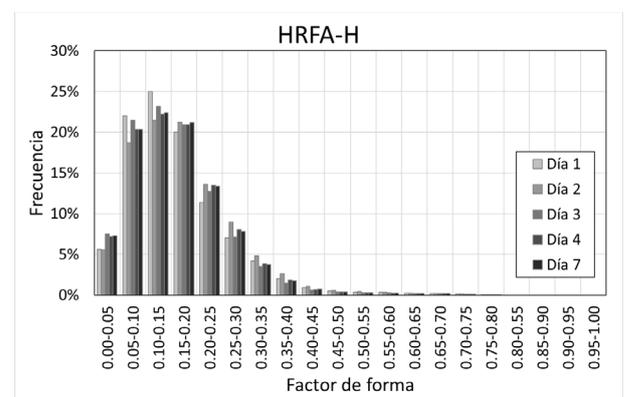


Figura 13. Histogramas del factor de forma HRFA-H

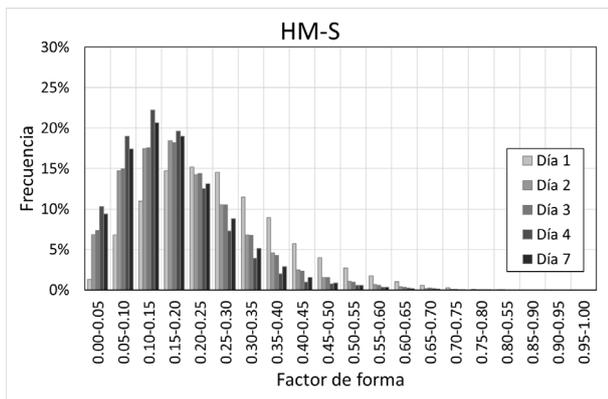


Figura 14. Histogramas del factor de forma HM-S

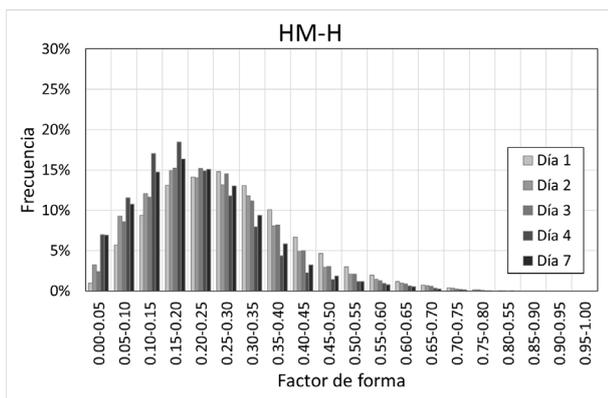


Figura 15. Histogramas del factor de forma HM-H

Las Figuras 12 a 15 muestran los histogramas del factor de forma para todos los tipos de hormigón y ambientes de curado considerados, así como su evolución con el tiempo. Éstas muestran conclusiones interesantes. En primer lugar, se aprecia que, en todos los casos, los poros están lejos de ser esféricos, puesto que el factor de forma está bastante alejado de 1. Por un lado, las muestras de HRFA (para ambos ambientes de curado) tienen un valor modal de entre 0.10 y 0.15, con más del 90% de los poros con un factor de forma inferior a 0.30. En cuanto a las muestras de HM, las de HM-S tienen un valor modal de entre 0.10 y 0.20, mientras que en las de HM-H este valor es algo mayor, de entre 0.15 y 0.25. En ambos casos, más del 90% de los poros tienen un factor de forma inferior a 0.40.

Los resultados observados se explican por el hecho de que los poros son los componentes menos rígidos de la pasta de cemento y, por tanto, tienden a ocupar los espacios dejados por el resto. Estos espacios ‘libres’ no tienen

formas esféricas, sino irregulares o alargadas. En el caso del HRFA, las fibras permiten con su aporte de rigidez que los poros más irregulares y alargados se mantengan estables. Sin embargo, en el caso del HM, estos poros colapsarían, tendiendo hacia formas más esféricas.

En lo que respecta a las variaciones de los histogramas del factor de forma con el tiempo, se observa que para las muestras de HRFA, los histogramas se desplazan hacia factores de forma mayores. Sin embargo, en el HM ocurre todo lo contrario; los histogramas se desplazan hacia valores menores a medida que aumenta la edad del hormigón. No obstante, en ambos casos la variación no es muy relevante.

4. Conclusiones

En este trabajo, se han analizado los cambios en la morfología de los poros en dos tipos de hormigón (en masa y reforzado con fibras de acero) y para dos ambientes de curado (húmedo y seco). Los cambios se han estudiado durante la primera semana de curado, para lo cual se ha empleado un escáner de TC y software de PDI.

La conclusión general es que la presencia de fibras modifica notablemente la morfología de los poros por la rigidez extra que, a primeras edades, proporciona a la pasta de cemento. El resultado es una mayor porosidad, una mayor proporción de poros de mayor tamaño y un factor de forma más pequeño. Estos resultados son de utilidad en el diseño de hormigones que requieren un determinado nivel de porosidad.

Los resultados muestran que la porosidad es mayor en el hormigón reforzado con fibras (HRFA) que en el hormigón en masa (HM), tanto para ambiente de curado seco como húmedo. Además, esto se mantiene a lo largo de todos los días de estudio. Por otro lado, para un mismo tipo de hormigón, la porosidad es mayor en las muestras sometidas a ambiente seco de curado que en las mantenidas en ambiente húmedo. Por otra parte, las muestras de HRFA tienen un incremento progresivo de la porosidad

dad con el tiempo, algo que no se observa en las muestras de HM.

Las curvas de volumen de poros revelan que el HRFA muestra un incremento progresivo del volumen de poro con el tiempo. Sin embargo, en el HM no se observan este fenómeno.

Por su parte, las curvas porosimétricas nos revelan que la distribución final del tamaño de poro se alcanzó aproximadamente el segundo día en todas las situaciones. Este comportamiento se aprecia más claramente en las muestras mantenidas en ambiente seco. Todas las curvas porosimétricas tienen una parte inicial en la que su pendiente es prácticamente constante hasta una 'longitud de poro crítica'. Después, la pendiente disminuye drásticamente.

En cuanto a los histogramas del factor de forma, se aprecia que, en todos los casos, los poros están lejos de ser esféricos. Sin embargo, se observa que el factor de forma es mayor en el HM que en el HRFA, para ambos ambientes de curado. Además, se tiene que para las muestras de HRFA, los histogramas se desplazan hacia factores de forma mayores con el tiempo. Sin embargo, en el HM ocurre lo contrario.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (BIA2015-68678-C2-2-R).

Referencias

- [1] Mehdipour, I.; Khayat, K.H. "Understanding the role of particle packing characteristics in rheophysical properties of cementitious suspensions: A literature review". *Constr. Build. Mater.* (2018), 161, 340–353.
- [2] Lazniewska-Piekarczyk, B. "The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete". *Constr. Build. Mater.* (2012), 31, 310–319.
- [3] Li, Z. "State of workability design technology for fresh concrete in Japan". *Cem. Concr. Res.* (2007), 37, 1308–1320.
- [4] Chandrappa, A.K.; Biligiri, K.P. "Pore Structure Characterization of Pervious Concrete Using X-ray Microcomputed Tomography". *J. Mater. Civ. Eng.* (2018), 30, 04018108.
- [5] Liu, B.; Luo, G.; Xie, Y. "Effect of curing conditions on the permeability of concrete with high volume mineral admixtures". *Constr. Build. Mater.* (2018), 167, 359–371.
- [6] Akand, L.; Yang, M.; Gao, Z. "Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling". *Constr. Build. Mater.* (2016), 114, 547–555.
- [7] Torres-Carrasco, M.; Alonso, M.M.; Guarner, P.; Zamora, A.; Puertas, F. "Alkali-activated slag concretes. Mechanical and durability behaviour". *Hormigón y Acero* (2018), 69, 163–168.
- [8] Ley, M.T.; Welcher, D.; Peery, J.; Khatibmasjedi, S.; LeFlore, J. "Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method". *Constr. Build. Mater.* (2017), 150, 723–737.
- [9] Jin, S.; Zhang, J.; Huang, B. "Fractal analysis of effect of air void on freeze-thaw resistance of concrete". *Constr. Build. Mater.* (2013), 47, 126–130.
- [10] Vicente, M.A.; González, D.C.; Mínguez, J.; Tarifa, M.A.; Ruiz, G. "Influence of the pore morphology of high strength concrete on its fatigue life". *Int. J. Fatigue* (2018), 112, 106–116.
- [11] Vicente, M.A.; Ruiz, G.; González, D.C.; Mínguez, J.; Tarifa, M.; Zhang, X. "CT-Scan study of crack patterns of fiber-reinforced concrete loaded monotonically and under low-cycle fatigue". *Int. J. Fatigue* (2018), 114, 138–147.
- [12] Chen, Y.; Wang, K.; Wang, X.; Zhou, W. "Strength, fracture and fatigue of pervious concrete". *Constr. Build. Mater.* (2013), 42, 97–104.
- [13] Chen, X.; Xu, L.; Wu, S. "Influence of pore structure on mechanical behavior of concrete under high strain rates". *J. Mater. Civ. Eng.* (2016), 28, 04015110.

- [14] Chen, X.; Wu, S.; Zhou, J. “Influence of porosity on compressive and tensile strength of concrete mortar”. *Constr. Build. Mater.* (2013), 40, 869–874.
- [15] Zeng, Q.; Li, K.; Fen-Chong, T.; Dangla, P. “Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash”. *Cem. Concr. Res.* (2012), 42, 194–204.
- [16] Lu, H.; Peterson, K.; Chernoloz, O. “Measurement of entrained air-void parameters in Portland cement concrete using micro X-ray computed tomography”. *Int. J. Pavement Eng.* (2018), 19, 109–121.
- [17] Wang, Y.-S.; Dai, J.-G. X-ray computed tomography for pore-related characterization and simulation of cement mortar matrix”. *Ndt & E Int.* (2017), 86, 28–35.
- [18] Moradian, M.; Hu, Q.; Aboustait, M.; Ley, M.T.; Hanan, J.C.; Xiao, X.; Scherer, G.W.; Zhang, Z. “Direct observation of void evolution during cement hydration”. *Mater. Des.* (2017), 136, 137–149.
- [19] Lu, H.; Alymov, E.; Shah, S.; Peterson, K. “Measurement of air void system in lightweight concrete by X-ray computed tomography”. *Constr. Build. Mater.* (2017), 152, 467–483.
- [20] Vicente, M.A.; Mínguez, J.; González, D.C. “The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: From rocks to concrete”. In *Computed Tomography—Advanced Applications*; Halefoglul, A.M., Ed.; InTech: London, UK, 2017.
- [21] Yuan, J.; Liu, Y.; Li, H.; Yang, C. “Experimental investigation of the variation of concrete pores under the action of freeze-thaw cycles”. *Procedia Eng.* (2016), 161, 583–588.
- [22] Ponikiewski, T.; Katzer, J.; Bugdol, M.; Rudzki, M. Determination of 3D porosity in steel fibre reinforced SCC beams using X-ray computed tomography. *Constr. Build. Mater.* 2014, 68, 333–340.
- [23] Kim, K.Y.; Yun, T.S.; Choo, J.; Kang, D.H.; Shin, H.S. Determination of air-void parameters of hardened cement-based materials using X-ray computed tomography. *Constr. Build. Mater.* 2012, 37, 93–101.
- [24] Gonzalez, D.C.; Moradillo, R.; Mínguez, J.; Martínez, J.A.; Vicente, M.A. “Postcracking residual strengths of fiber-reinforced high-performance concrete after cyclic loading”. *Struct. Concr.* (2018), 19, 340–351.
- [25] Parvez, A.; Foster, S.J. “Fatigue Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Beams”. *J. Struct. Eng.* (2015), 141, 04014117.
- [26] González, D.C.; Vicente, M.A.; Ahmad, S. “Effect of cyclic loading on the residual tensile strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete”. *J. Mater. Civ. Eng.* (2015), 27, 04014241.
- [27] Mínguez, J.; González, D.C.; Vicente, M.A. “Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength”. *Constr. Build. Mater.* (2018), 168, 906–922.
- [28] Al Rikabi, F.T.; Sargand, S.M.; Khoury, I.; Hussein, H.H. “Material properties of synthetic fiber-reinforced concrete under freeze-thaw conditions”. *J. Mater. Civ. Eng.* (2018), 30, 04018090.
- [29] British Standards Institution. “Methods of Testing Cement. Determination of Strength; EN 196-1:2016”; British Standards Institution: London, UK, 2016.
- [30] Domingues, A.; Ceccato, M.R. “Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test”. *Mater. Res.* 18 (6) (2015) 1284–1290.
- [31] Mazaheripour, H.; Ghambarpour, S.; Mirmoradi, S.H.; Hosseinpour, I. “The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete”. *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 351–358.