

Retracción y fluencia de hormigón autocompactante de resistencia moderada

**Ester B. Bermejo
Núñez¹**

**Jaime C. Gálvez
Ruiz¹**

**Manuel
Fernández
Cánovas¹**

RESUMEN

Los estudios sobre el hormigón autocompactante se han centrado en obtener las dosificaciones óptimas, pero hay desconocimiento acerca de su comportamiento a largo plazo, en especial en hormigones de resistencia moderada.

Este trabajo estudia la fluencia y retracción de tres hormigones autocompactantes de resistencia moderada (resistencia característica aproximada de 25 MPa), cuya dosificación y propiedades mecánicas son casi iguales, pero que emplean cementos con distintos tipos de adición. En los tres casos se emplea filler calizo.

El trabajo presenta los resultados de los ensayos de retracción y fluencia, que son comparados con las predicciones del Código Modelo CEB-FIP, del ACI Concrete Practice Manual y del Euro Code 2. Además también se ha obtenido el volumen total de poros y su distribución por tamaños mediante el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio.

PALABRAS CLAVE

Retracción, fluencia, resistencia media, estructura porosa.

¹ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil-Construcción. C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid. ebermejo@caminos.upm.es, jaime.galvez@upm.es, mfcanovas@caminos.upm.es.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón autocompactante (HAC) se desarrolló originariamente en Japón a mediados de los años 80, bajo la dirección del Prof. Okamura [1]. El uso del HAC se ha ido incrementando a lo largo del tiempo, especialmente en el sector de la prefabricación. En comparación con el hormigón convencional (HC), el HAC tiene un alto contenido de finos, se emplean aditivos de última generación y en dosis mayor y, se reduce el volumen de árido grueso. Estas modificaciones de composición influyen en la retracción y fluencia del hormigón.[2-3].

Algunos autores [3-7] indican que la retracción es equivalentes entre un HAC y un HC de similar resistencia a compresión. Otros autores que concluyen que la retracción es mayor en el HAC [8-11].

Hay numerosos estudios sobre la fluencia del HAC pero no existe consenso entre ellos. Algunos autores [7, 12] concluyen que la fluencia es similar en HAC y HC de igual resistencia a compresión. Otros autores [4, 6, 10, 13] afirman que el valor de la fluencia es mayor en un HAC respecto al HC.

En este trabajo se estudia y compara la retracción y la fluencia de tres HACs de resistencia moderada (aproximadamente 25 MPa de resistencia característica). Todos los HACs se han fabricado con los mismos áridos e igual dosificación, únicamente diferenciándose en el tipo y cantidad de cemento empleado y en el contenido de aditivo superplastificante. También se ha caracterizado el estado fresco de los tres HACs y sus propiedades mecánicas en estado endurecido. Además se ha determinado su estructura porosa mediante la realización del ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se han estudiado tres HACs, cuya diferencia principal era el tipo de cemento. Los cementos empleados han sido un cemento portland sin adiciones (CEM I 42,5R), y otros dos cementos portland con adición de escoria (CEM II/A-S 42,5N) y filler calizo, cemento blanco, (BL II/A-L 42,5R). Se utilizó el mismo tipo de árido en todos los HACs: arena de río silícea y un árido grueso rodado, también silíceo, cuyo tamaño máximo era de 16 mm. Se empleó filler calizo cuya granulometría cumple con la norma UNE 12620:2002. La cantidad máxima de partículas finas añadidas (que pasan por el tamiz UNE 0,063 mm), incluidas las adicionadas al cemento, no superó los 250 kg/m³. Como aditivo, se utilizó un superplastificante, SIKA Viscocrete 3425 de tipo policarboxilato modificado en base acuosa. No se han empleado aditivos modificadores de viscosidad.

La Tabla 1 muestra la dosificación de cada HAC. La diferencia entre ellas, radica en el tipo y cantidad de cemento y la cantidad de aditivo, variando entre el 0,8% y el 2,1%. La cantidad de adición de filler calizo adicionada en el hormigón 3 no pudo superar 156 kg/m³, por lo arriba indicado.

El amasado se realizó en una amasadora planetaria de eje vertical con una capacidad máxima de 100 l. Se hicieron dos tipos de probetas cilíndricas (15 Ø x 30 cm de altura y 15 Ø x 40 cm de altura) para la realización de los ensayos correspondientes.

2.2 Ensayos realizados

2.2.1 Estado fresco del hormigón

Los ensayos realizados fueron tres: ensayo de escurrimiento (UNE 83361:2007), ensayo de la caja en L (UNE 83363:2007) y ensayo del embudo en V (UNE 83364:2007), siempre en el mismo orden.

Tabla 1. Dosificaciones propuestas para cada hormigón estudiado (por m³ de hormigón).

Hormigón	1	2	3
Tipo de cemento	CEM I 42,5 R	CEM II/A-S 42,5N	BL II/A-L 42,5R
Adición	Filler Calizo	Filler Calizo	Filler Calizo
Cemento (kg)	350	350	375
Adición (kg)	200	200	156
Agua (kg)	193	193	206
Arena (kg)	960	960	960
Grava (kg)	695	695	695
Aditivo (kg)	7,4 (2,1%)	2,8 (0,8%)	4,3 (1,15%)
a/c	0,55	0,55	0,55

2.2.2 Ensayos sobre la caracterización mecánica

Se hicieron los siguientes ensayos a las edades de 7, 28 y 91 días de las probetas: resistencia a compresión (UNE-EN 12390-3:2003), módulo de elasticidad a compresión (UNE 83316:1996) y resistencia a tracción indirecta (UNE-EN 12390-6:2001).

2.2.3 Ensayos sobre las deformaciones: retracción y fluencia

Los ensayos de retracción y fluencia se han realizado siguiendo la norma ASTM C512, con alguna pequeña modificación. El ensayo de retracción se efectuó sobre una probeta cilíndrica de 15 Ø x 30 cm de altura. El ensayo de fluencia se hizo con probetas cilíndricas de 15 Ø x 40 cm de altura, a una carga del 35-40% de la resistencia a compresión a 28 días. Ambos ensayos se realizaron en una habitación cerrada donde se controlaba y registraba la temperatura (21±1°C) y humedad (50±5%) durante todo el ensayo.

Antes del comienzo de los ensayos, se pegaron cuatro bases de medida DEMEC sobre cada una de las probetas, colocadas en dos generatrices opuestas a 180° y espaciadas 200 mm en vertical. Además en las probetas del ensayo de fluencia, se adhirieron dos placas de acero rectificadas, una en cada base, con resina epoxi con el fin de garantizar el paralelismo y planeidad de las bases de las probetas. La carga, en el ensayo de fluencia, se aplicó mediante un sistema hidráulico, a través de dos platos de carga, uno superior y otro inferior. El superior estaba unido a una rótula al bastidor. El montaje del ensayo se puede observar en la Fig. 1a. Las lecturas de la deformación se realizaron con un reloj comparador mecánico DEMEC con resolución de 1,5 micras, como se muestra en la Fig. 1b.

La Tabla 2 muestra la duración del ensayo, la presión aplicada y la edad inicial de las probetas al comienzo de los ensayos para cada uno de los hormigones estudiados.

a)



b)



Figura 1. Ensayo de fluencia: a) montaje del ensayo, y b) toma de medidas de las deformaciones de una probeta.

Tabla 2. Características del ensayo de fluencia.

Hormigón	1	2	3
Duración del ensayo (días)	333	200	200
Carga (% resistencia a compresión a 28 días)	35	40	40
Tensión aplicada (bares)	135	175	160
Edad inicial del hormigón cuando el ensayo comenzó (días)	70	104	76

2.2.4 Ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio

Los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio se realizaron con un porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que alcanza una presión máxima 228 MPa, y cuyo rango de medida de diámetro de poro es de 0,006 μm a 175 μm . Los ensayos se realizaron a los 91 días de edad de las muestras según la norma ASTM D4404-84 (2004). El tamaño de las muestras empleadas fue de 3,5 g \pm 0,3 g. Previamente a la realización del ensayo, las muestras fueron secadas a una temperatura de 40°C hasta peso constante y, posteriormente se desgasificaron, durante 30 minutos, con una bomba de vacío.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos de hormigón en estado fresco

La Tabla 3 muestra los valores de caracterización del estado fresco de cada hormigón y los compara con los admisibles por la Instrucción EHE-08 [14].

Tabla 3. Resultados de los ensayos de hormigón fresco y comparación con el rango admisible según la Instrucción EHE-08 [14].

Hormigón		1	2	3	Rango admisible (EHE-08)
Extensión de flujo	T_{500} (s)	3	1,2	2	$T_{50} \leq 8$ s
	\varnothing_m (cm)	65	70	65,5	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo V	T_V (s)	14	5,5	8	$4 \text{ s} \leq T_V \leq 20 \text{ s}$
Caja en L	H_2 / H_1	0,63	0,80	0,60	$0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$

3.2 Resultados de los ensayos de caracterización del hormigón endurecido

Las Figs. 2, 3 y 4 muestran los resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad a compresión y resistencia a tracción indirecta para cada uno de los tres HACs a las edades de 7, 28 y 91 días. Los valores corresponden al valor medio de tres probetas ensayadas.

La resistencia a compresión es similar en los tres HACs (Fig. 2), siendo un poco más baja en el hormigón 3, que emplea cemento blanco. El módulo de elasticidad a compresión (Fig. 3) y la resistencia a tracción indirecta (Fig. 4) muestran un comportamiento similar en todos los casos. Prácticamente no hay evolución en el módulo de elasticidad de 28 a 91 días.

3.3 Deformaciones por retracción y fluencia

La Fig. 5 muestra las deformaciones por retracción. Las deformaciones son mayores en el hormigón 2 y menores en el hormigón 1. La Fig. 6 muestra las deformaciones por fluencia, siendo menores en el hormigón 1 respecto al resto de los HACs. La Fig. 7 presenta los valores del coeficiente de fluencia. Se observa que éste es menor en el hormigón 1. Dicho coeficiente ha sido calculado de la siguiente manera:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_t - (\varepsilon_i + \varepsilon_s) \quad (1)$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_i} \quad (2)$$

Donde: ϵ_i : deformación inicial; ϵ_t : deformación total; ϵ_s : retracción; $\varphi(t, t_0)$: coeficiente de fluencia.

3.4 Aplicación de modelos existentes

Los modelos empíricos que estiman las deformaciones por retracción y fluencia en el HC propuestos por la ACI [15], EC-02 [16] y la CEB-FIP 90 [17] se han aplicado a los tres HACs. Las Figs. 8-10 comparan los resultados experimentales y los estimados por los modelos de cálculo de retracción.

Las Figs. 11-13 comparan los resultados experimentales y los estimados por los modelos de cálculo de fluencia. Las Figs. 14-16 muestran los resultados análogos para el coeficiente de fluencia.

3.5 Resultados de los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio

La Fig. 17 compara el diámetro promedio de poro y la porosidad total. Los hormigones 2 y 3 tienen similar diámetro promedio de poro, siendo inferior en el hormigón 1. En cambio, la porosidad es prácticamente igual en los hormigones 1 y 2, siendo ligeramente superior en el hormigón 3.

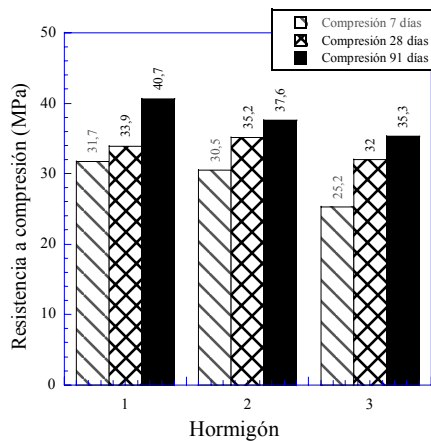


Figura 2. Resistencia a compresión.

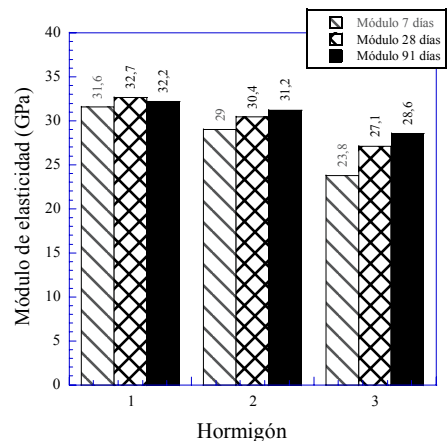


Figura 3. Módulo de elasticidad.

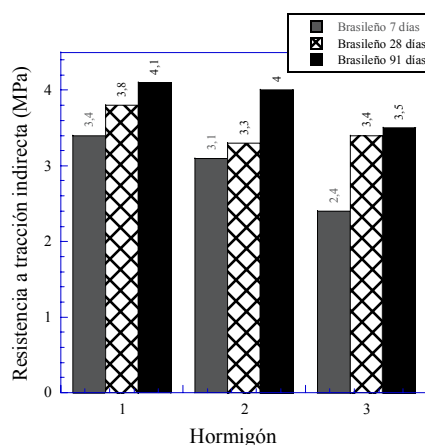


Figura 4. Resistencia de tracción indirecta.

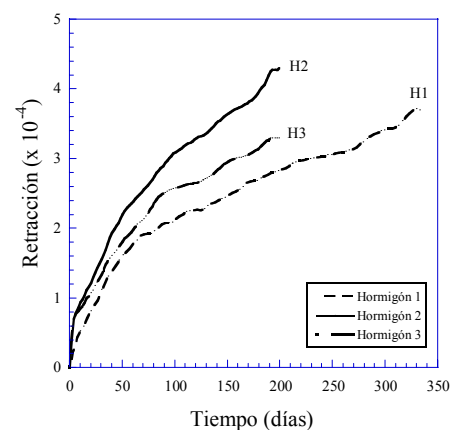


Figura 5. Deformación por retracción.

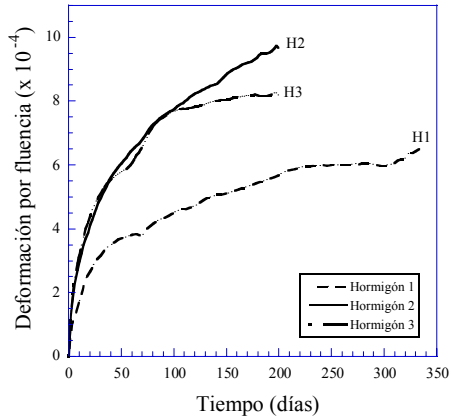


Figura 6. Deformación por fluencia.

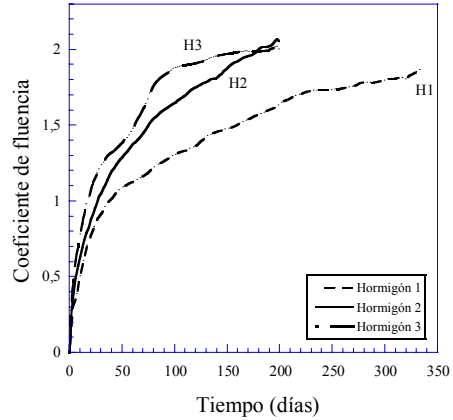


Figura 7. Coeficiente de fluencia.

La Tabla 4 presenta el volumen de macroporos y mesoporos de cada HACs. Como se puede observar la estructura porosa es muy diferente en cada uno de los hormigones estudiados.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Fig. 6 muestra que la deformación por retracción ha sido mayor en el hormigón 2 en comparación a los hormigones 1 y 3. Chopin et al. [18] afirman que los HACs con mayor resistencia a compresión muestran menor retracción, lo que coincide con lo observado en el hormigón 1, que es el de mayor resistencia a compresión, pero no se ajusta bien al hormigón 2 y 3, ya que el primero tiene una mayor retracción pero su resistencia a compresión es ligeramente superior al hormigón 3.

La dosificación del hormigón 3 es la que tiene un mayor contenido de cemento y una elevada relación agua/finos, su retracción debería ser la más elevada, cosa que no ocurre.

Los hormigones 1 y 2, con dosificación similar, deberían mostrar igual retracción, pero no es así. En el hormigón 1 se emplea un cemento portland sin adiciones y en el hormigón 2 el cemento es portland pero con adición de escorias. Neville [19] y Song et al. [20] afirman que la adición y su finura afectan notablemente en la retracción incrementándola.

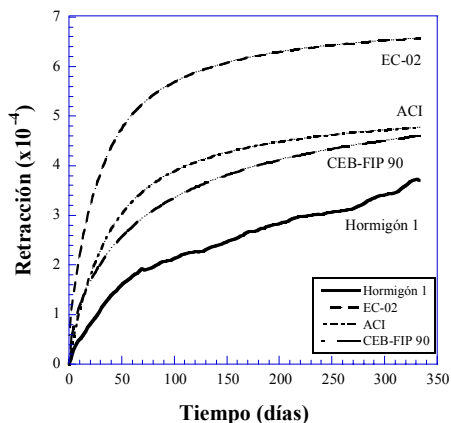


Fig. 8. Deformación por retracción hormigón 1.

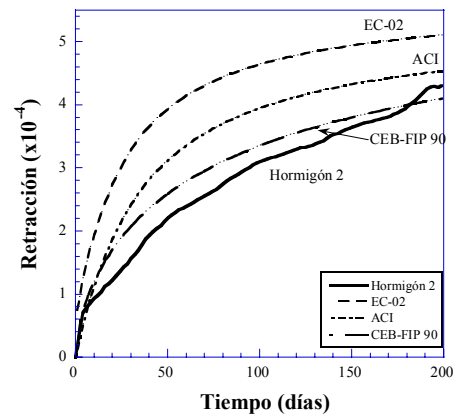


Fig. 9. Deformación por retracción hormigón 2.

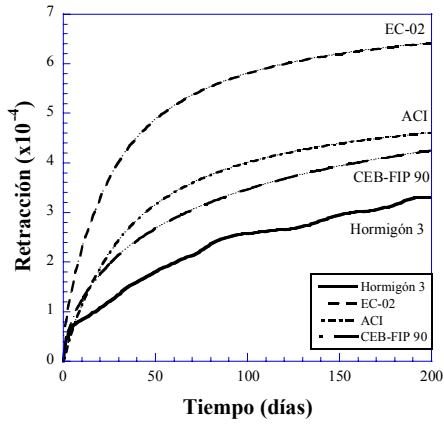


Fig. 10. Deformación por retracción hormigón 3.

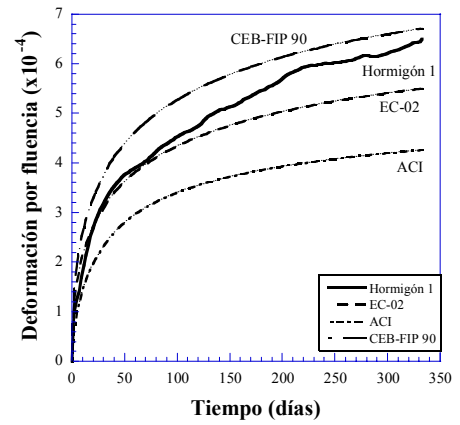


Fig. 11. Deformación por fluencia hormigón 1.

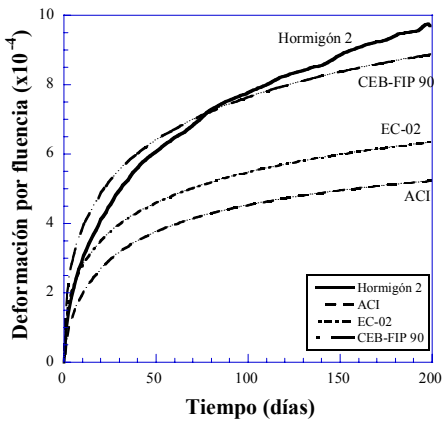


Fig. 12. Deformación por fluencia hormigón 2.

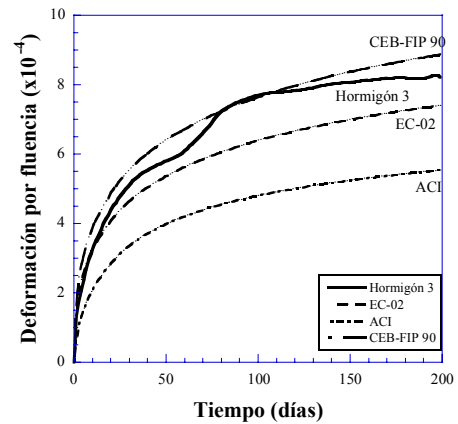


Fig. 13. Deformación por fluencia hormigón 3.

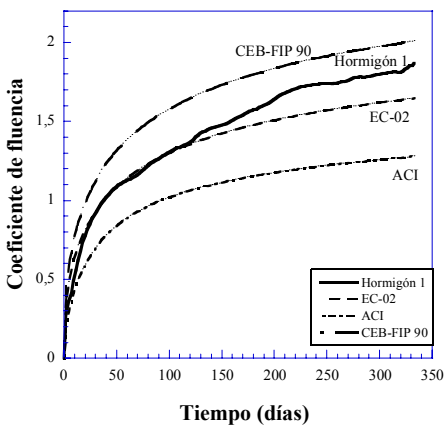


Fig. 14. Coeficiente de fluencia hormigón 1.

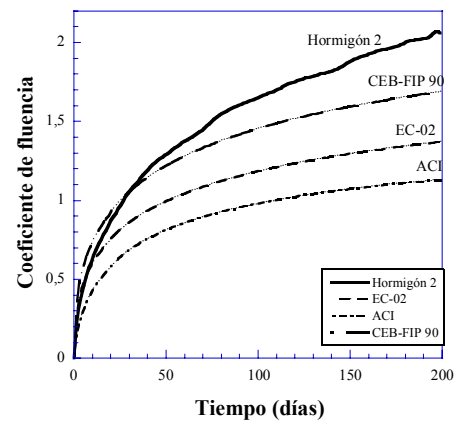


Fig. 15. Coeficiente de fluencia hormigón 2.

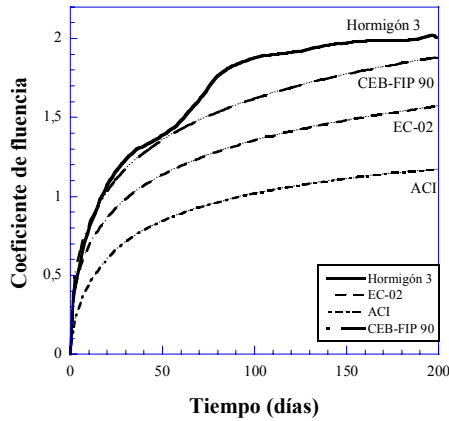


Fig. 16. Coeficiente de fluencia hormigón 3.

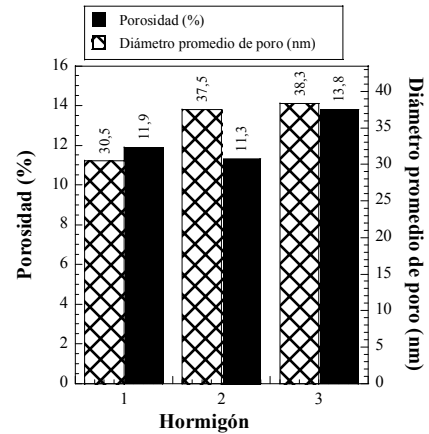


Figura 17. Diámetro promedio de poro y porosidad.

Tabla 4. Volumen de macroporos y mesoporos.

Hormigón	Volumen de macroporos (ml/g)	Volumen de mesoporos (ml/g)
1	0,016	0,038
2	0,036	0,025
3	0,036	0,029

Respecto a los valores obtenidos en el ensayo de fluencia, el hormigón 1 presenta un menor coeficiente de fluencia siendo mayor en el hormigón 2. La principal causa podría deberse a que la tensión aplicada en el hormigón 1 (35% resistencia a compresión 28 días) ha sido inferior respecto a los otros dos hormigones (40% resistencia a compresión 28 días). El coeficiente de fluencia es similar en los hormigones 2 y 3. Chopin et al. [18] concluyen que la tensión aplicada afecta directamente a la fluencia en HACs.

Neville [19] afirma que no se puede generalizar la influencia de las adiciones en la fluencia debido a los datos contradictorios que se recogen en las investigaciones publicadas sobre la utilización de las mismas. Pero, en el caso del HAC, las adiciones juegan un papel muy importante y sí que podrían influir en las deformaciones. Seng et al. [13] observaron que el coeficiente de fluencia incrementaba con el aumento de filler calizo, como ocurre en el caso del hormigón 3. Song et al. [20] indican que la finura de la escoria afecta a edades cortas, en las deformaciones por fluencia, como se observa en el hormigón 2 donde la deformación debería de ser mayor al final del ensayo.

Los valores que se obtienen con el Eurocódigo 2 están sobrevalorados para las deformaciones por retracción, especialmente en los hormigones 1 y 3. Se obtienen mejores resultados con los métodos de cálculo de la ACI y de la CEB-FIP 90, especialmente este último para el caso del hormigón 2.

Y, respecto a las deformaciones y coeficiente de fluencia, la estimación que se obtiene mediante el método de la ACI es demasiado baja. Con el EC-02 se obtiene mejores resultados, especialmente a edades tempranas. Pero el método de la CEB-FIP 90 da una mejor aproximación aunque la estimación es baja para el caso de los hormigones 2 y 3.

Los valores obtenidos de la porosidad total (véase Fig. 17) son muy parecidos en el caso de los hormigones 1 y 2, lo que se corresponde con que sus propiedades mecánicas sean similares. En cambio, la porosidad en el hormigón 3 es superior al resto y sus propiedades mecánicas son ligeramente inferiores a los otros dos casos. En cambio, el diámetro promedio de poro (Fig. 17) es similar en los hormigones 2 y 3, siendo inferior en el caso del hormigón 1. Y, respecto a la distribución de poros, el volumen de macroporos y mesoporos revelan que los hormigones 2 y 3 tienen una estructura similar, pero muy diferente a la del hormigón 1.

El bajo contenido de macroporos del hormigón 1, en comparación con el resto, podría justificar su buen comportamiento frente a retracción y fluencia aunque no es el único parámetro que influye en dicho comportamiento. Por el contrario, los hormigones 2 y 3 presentan una estructura porosa similar y su comportamiento frente a retracción y fluencia es similar.

5. CONCLUSIONES

- Las deformaciones por retracción dependen del tipo de adición que se emplee en el cemento, siendo superiores con la escoria que con el filler calizo. Pero también la resistencia a compresión, el volumen de pasta y la cantidad de cemento influyen, aunque de forma opuesta.
- Los métodos de cálculo de retracción empleados para HCs sobrestiman las deformaciones para HACs, aunque no en todos los casos, por lo que estos modelos no son del todo válidos. El modelo que proporciona una estimación más adecuada es el CEB-FIP 90, dependiente del tipo de hormigón.
- La deformación por fluencia depende de la tensión aplicada y de la cantidad de adición, en este caso, filler calizo. Pero existen otros factores como la resistencia a compresión, el volumen de pasta y el tipo de adición que se emplee.
- Los métodos de cálculo de fluencia empleados para HCs infravaloran la deformación y el coeficiente de fluencia para el caso de los HACs. Se obtienen mejores resultados con el método de cálculo de CEB-FIP 90.
- La porosidad total obtenida en dos hormigones es muy similar, pero su distribución por tamaño de poros es diferente. El volumen de macroporos afecta a las propiedades mecánicas, a la retracción y fluencia aunque no es el único parámetro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen IECA la financiación parcial de los ensayos. Además, agradecen al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión del proyecto BIA-2008-03523, al Ministerio de Fomento la concesión del proyecto MFOM-01/07, y al Ministerio de Educación la beca FPI concedida a D^a Ester Bermejo Núñez.

REFERENCIAS

- [1] OKAMURA, H. - Self Compacting High-Performance Concrete. *Journal of Concrete International*, vol. 19, nº 7, 1997. p. 50-54.
- [2] OKAMURA, H. [et al.] - Self-Compactable High-Performance Concrete in Japan. *ACI special publication SP159-02*, 1996. p. 31-44.
- [3] POPPE, A. [et al.] - Creep and shrinkage of self compacting concrete. *RILEM PRO 42*, 2005. p. 329-336. ISBN: 2-912143-61-6.
- [4] ASSIÉ, S. [et al.] - Durability of self compacting concrete. *RILEM Proceedings PRO 33*, 2003. p. 655-662. ISBN: 2-912143-42-X.
- [5] PONS, G. [et al.] - Creep and Shrinkage of self compacting concrete: A Different Behaviour compared with Vibrated Concrete. *RILEM Proceedings PRO 33*, 2003. p. 645-654. ISBN: 2-912143-42-X.

- [6] VIEIRA, M. [et al.] - Deformability of Hardened SCC. RILEM Proceedings PRO 33, 2003. p. 606-618. ISBN: 2-912143-42-X.
- [7] DE SCHUTTER, G. [et al.] - Self-Compacting Concrete, CRC Press, 2008. 296 p. ISBN 978-1904445-30-2.
- [8] CHAN, Y.W. [et al.] - The analysis of Shrinkage behavior of SCC and OPC under various weather conditions. RILEM Proceedings PRO 17, 2004. ISBN: 2-912143-20-9.
- [9] PERSSON, B. - Shrinkage and creep of high performance self-compacting concrete (HPSCC), ACI special publication SP220-11, 2005. p. 155-179.
- [10] LEEMANN, A. [et al.] - Properties of self-compacting and conventional concrete-differences and similarities, Magazine of Concrete Research, 57 (3), 2005. p. 315-319. ISSN 0024-9831.
- [11] XIE, Y. [et al.] - Influence of aggregate on properties of self consolidating concrete, RILEM Proceedings PRO 42, p. 161-171, 2005. ISBN: 2-912143-61-6.
- [12] FROUST, E. [et al.] - Macroscopic and microscopic behavior of SCC creep and shrinkage. Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials, p. 569-575, 2001.
- [13] SENG, V. [et al.] - Creep and shrinkage of self-compacting concrete with different limestone powder contents. RILEM Proceedings PRO 42, 2005. p. 981-987. ISBN: 2-912143-61-6.
- [14] INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08). Anejo 17, Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante, 2008. p. 569-582. ISBN 978-84-498-0830-2.
- [15] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, Report by Committee 209, 2004.
- [16] EUROCODE 2, EN-1992-1-1. Design of concrete structures: Part 1-1.
- [17] CEB-FIP - Código modelo para hormigón estructural, 1990. ISBN 0-7277-1620-4.
- [18] CHOPIN, D. [et al.] - Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC). Proceedings of the Third International Symposium on Self- Compacting Concrete. RILEM Proceedings PRO 33, 2003. p. 672-683. ISBN: 2-912143-42-X.
- [19] NEVILLE, A.M. - Properties of Concrete, 4th ed., Longman Group, London, England, 1995. 884 p. ISBN 0-582-23070-5.
- [20] SONG, H.W.[et al.] - Early-age creep and shrinkage in self-compacting concrete incorporating GGBFS. Proceedings of the Second International Symposium on SCC, 2001. p. 413-421.