

Monitorización a edades tempranas, microestructura y comportamiento endurecido de HAC con combinación de filler y adiciones minerales

G. Barluenga, J. Puentes, I. Palomar

Departamento de Arquitectura, Universidad de Alcalá, España.

RESUMEN

Los hormigones autocompactantes (HAC) incorporan componentes con bajo consumo de energía en su fabricación, como filleres minerales, y requieren menos energía para su colocación y trabajo en obra. Por ello, son considerados hormigones más eficientes que los convencionales. Pero no es fácil conseguir mejoras en las prestaciones mecánicas de los HAC sin un aumento significativo del contenido de cemento.

La combinación de filleres minerales con pequeñas cantidades de adiciones activas, entre 5-10 % del cemento, es una opción prometedora, ya que puede mejorar el comportamiento endurecido sin incrementar significativamente la cantidad de energía consumida en la producción de HAC.

Para evaluar la influencia de diferentes tipos de adiciones activas (microsilíce, nanosilíce y metacaolín) en pastas fluidas y HAC, se ha realizado un estudio experimental considerando parámetros a edades tempranas y en estado endurecido.

A edades tempranas (primeras 24 horas) se ha monitorizado la temperatura, la velocidad de propagación de ultrasonidos, la pérdida de peso, la retracción por secado y el riesgo de fisuración temprana de muestras sometidas a desecación superficial (flujo de aire de 3 m/s). Este conjunto de parámetros permite cuantificar la evolución de la reacción, de la microestructura, de los intercambios de calor y agua con el ambiente y de los riesgos de fisuración por secado. En estado endurecido, se han caracterizado la densidad, permeabilidad, tamaño de poro, así como la resistencia a compresión.

Los resultados experimentales permiten identificar la influencia del uso de adiciones activas en HAC durante las primeras edades, en la evolución de la microestructura, en los riesgos de fisuración temprana por secado y en la estructura porosa y permeabilidad de pastas y hormigones, que pueden condicionar su durabilidad.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante; Edades tempranas; Adiciones minerales; Microestructura; Propiedades físicas y mecánicas.

1.- INTRODUCCIÓN

Los hormigones autocompactantes (HAC) presentan muchas ventajas con respecto a los hormigones convencionales (HC) y pueden satisfacer muchas de las exigencias requeridas a los hormigones actuales. Entre ellas, cabe destacar: Eficiencia energética y

HAC con combinación de filler y adiciones minerales

sostenibilidad; reducción de riesgos de los daños producidos por efectos adversos (ambientales, ejecución, accidentes) y garantías de mantenimiento de las prestaciones en el tiempo y durabilidad. Para conseguir una fluidez elevada en estado fresco y resistencias mecánicas adecuadas en estado endurecido se incorporan adiciones en gran cantidad, lo que incrementa el volumen de pasta [1]. El uso de adiciones minerales, filleres y adiciones activas, producen cambios en el material tanto en estado fresco como en la microestructura en estado endurecido, lo que modifica sus prestaciones y condiciona su durabilidad. Entre las variables que pueden afectar a la reacción destacan la naturaleza y tamaño de partícula de la adición [2-7].

La mayor parte de los cambios en la microestructura ocurren en el proceso de hidratación, que se produce principalmente en las primeras 12-24 horas. Este periodo incluye el paso del material de un comportamiento plástico (estado fresco) a rígido (estado endurecido) [8, 9]. La evolución del proceso de hidratación se suele estudiar mediante la monitorización de parámetros calorimétricos [2-3, 10] y la evolución de la microestructura se puede analizar mediante la monitorización de la velocidad de propagación de ultrasonidos (UPV) a través de muestras en condiciones conocidas [9, 11-14]. La combinación de ambos parámetros permite identificar los cambios que se producen en el material a edades tempranas [12-15].

Durante este periodo de tiempo, las condiciones ambientales afectan en gran medida al desarrollo de las reacciones de hidratación y condicionan la evolución de la microestructura y las prestaciones del material [7]. Una de las consecuencias más habituales de la influencia del ambiente en el hormigón a edades tempranas es la fisuración producida por retracción por secado [16-18]. Este fenómeno afecta especialmente a los HAC, debido a que tienen un mayor contenido de pasta que los HC, y puede reducir las prestaciones y condicionar la durabilidad [19-20]. Otra cuestión a considerar es la influencia del tipo y tamaño de las adiciones en la microestructura del esqueleto del HAC una vez endurecido, que condiciona las prestaciones, físicas y mecánicas, y la durabilidad [21].

Para identificar cómo influye la composición de los HAC en las prestaciones a edades tempranas y en estado endurecido y poder establecer relaciones entre ambas etapas, se ha planteado un estudio experimental sobre pastas fluidas y HAC con diferentes adiciones: filler calizo, microsílíce, nanosílíce y metacaolín. A edades tempranas se pretende identificar los cambios producidos en el proceso de reacción, la evolución de la microestructura, los intercambios de calor y agua con el ambiente, la retracción y los riesgos de fisuración por secado. En estado endurecido, se ha evaluado la resistencia y la rigidez mediante UPV, la porosidad y la permeabilidad.

2.- MATERIALES Y DOSIFICACIONES

La tabla 1 recoge las dosificaciones utilizadas para la fabricación de los hormigones. Se parte de una dosificación de referencia sólo con cemento y sin aditivo (HREF). Ésta se modifica incluyendo un aditivo reductor de agua de amplio espectro, obteniendo una consistencia autocompactante (HREFG). Posteriormente se sustituye el 50 % del cemento por filler calizo (HCA) y se obtiene una dosificación tipo de HAC con filler. Se estudian tres dosificaciones más, en las que una parte del filler, entre el 5-10 %, se sustituye por adiciones activas: microsílíce (HCAMS), nanosílíce (HCANS) y

metacaolín (HCAMC). En todos los casos, la relación agua/finos (0,36) y la cantidad de pasta permanece constante, para poder comparar los resultados. Las pastas constitutivas de las dosificaciones empleadas también se han estudiado para evaluar su comportamiento y poder compararlo con las muestras de hormigones, debido a la elevada cantidad de pasta de los HAC. La tabla 1 también incluye el asiento de la dosificación HREF (no autocompactante y consistencia seca) y de anillo J de las dosificaciones de referencia autocompactantes (HREFG y HCA). En ninguna de las dosificaciones se ha identificado signos aparentes de segregación en estado fresco.

Tabla 1. Componentes y dosificaciones de los HAC estudiados

Composición	HREF	HREF G	HCA	HCAMS	HCANS	HCAMC
Cemento CEM I 42,5 R	700	700	350	350	350	350
Grava silícea (4-20 mm)	790	790	790	790	790	790
Arena silícea (0-4 mm) (Humedad 6.25%)	691	691	691	691	691	691
Filler calizo (Betocarb P1-DA)	-	-	350	315	332,50	332,50
Microsílice (MEYCO MS610)	-	-	-	35	-	-
Nano-sílice (MEYCO MS685)	-	-	-	-	79.45	-
Metacaolín (Burgess Optipozz)	-	-	-	-	-	17,50
Agua (*)	209	198,7	204	204	142	204
Aditivo (Glenium ACE425)	-	10,50	5,25	5,25	5,25	5,25
Asiento (mm)	24	-	-	-	-	-
J-ring <i>d_{ff}</i> (***) mm	-	875	815	-	-	-
<i>CbE</i> (***) %	-	37 %	29 %	-	-	-
Agua/cemento (**)	0,36	0,36	0,71	0,71	0,71	0,71
Agua/finos (c + adiciones) (**)	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

(*) Agua líquida añadida. (**) Incluye el agua incorporada con los componentes (arena húmeda, aditivo y nano-sílice). (***)UNE 83362 :2007- Caracterización de Fluidez en presencia de barras. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.

3.- MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1.- Monitorización de temperatura y UPV a Edades tempranas

Durante las primeras 24 horas se han monitorizado la temperatura en el interior de la muestra y la velocidad de propagación de ultrasonidos (UPV) de muestras de 150 x 100 x 70 mm en condiciones de laboratorio (20±2 °C, 50±10 %HR).

En la Figura 1 se puede observar que existen cuatro etapas que se repiten en todas las muestras: inducción, aceleración, incremento hasta el valor máximo y enfriamiento. Están relacionadas con el proceso de hidratación y las reacciones puzolánicas posteriores en su caso [13]. La inclusión de filler reduce el efecto retardante del aditivo y las adiciones activas aumentan la t_{max} de la muestra. Aunque el cálculo de calor es menos aproximado que en los procedimientos convencionales (calorimetría isoterma y

HAC con combinación de filler y adiciones minerales

semi-adiabática), la monitorización directa de la temperatura no modifica el perfil térmico de la muestra, por lo que la velocidad de la reacción no se ve alterada [2, 15].

Considerando la diferencia de temperatura entre la muestra y el ambiente, que es siempre positiva durante las primeras 24 horas debido a que la reacción es exotérmica, se puede estimar la cantidad de calor producida por la muestra como la suma del calor acumulado y del calor cedido al ambiente [15]. De este modo se puede definir un índice de reacción ($I_{r,24}$) que corresponde a la fracción de calor producida por la muestra con respecto al calor producido a las 24 horas [15].

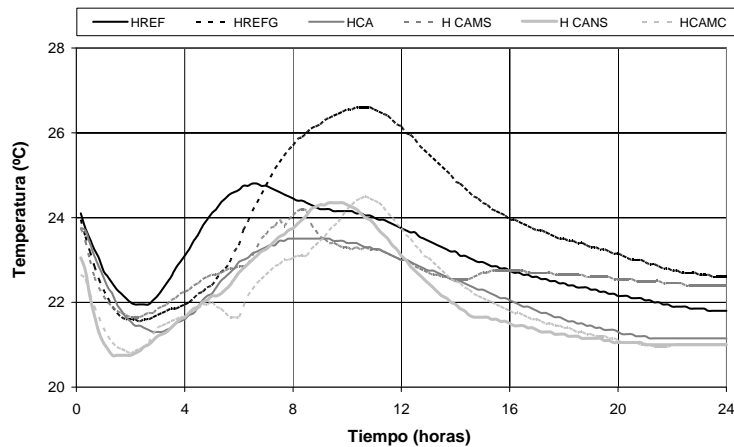


Figura 1. Evolución de la temperatura de HAC (primeras 24 h)

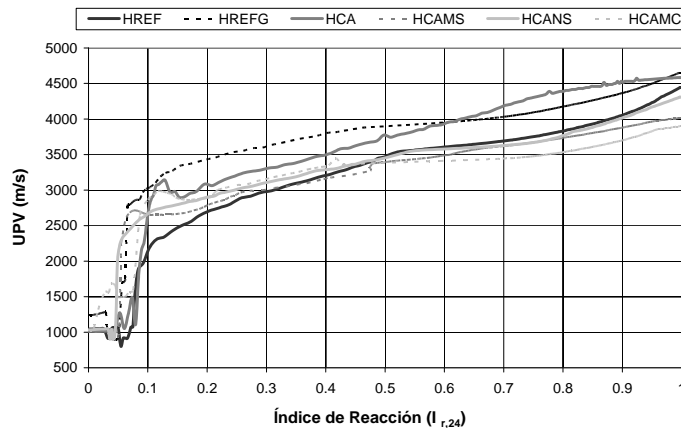


Figura 2. Evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos durante 24 horas en función del índice de reacción a 24 horas ($I_{r,24}$)

La Fig. 2 presenta la evolución de la UPV en relación con el $I_{r,24}$, donde se pueden identificar las tres etapas principales de la evolución de la microestructura: estado plástico, semi-rígido y rígido [15]. Se observa un paso de plástico a rígido muy rápido y se produce antes de 4 h en todos los casos, correspondiendo a un $I_{r,24}$ de 0,05 a 0,1.

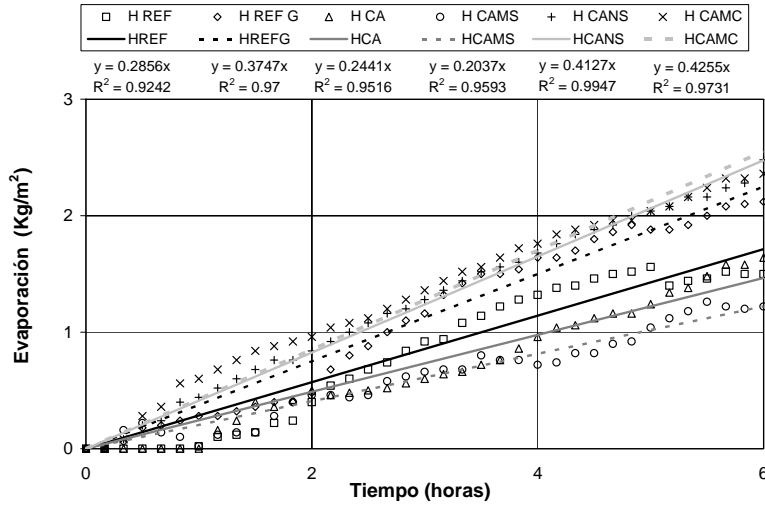


Figura 3. Evaporación de HAC durante las primeras horas. (flujo de aire de 3 m/s durante las primeras 6 horas)

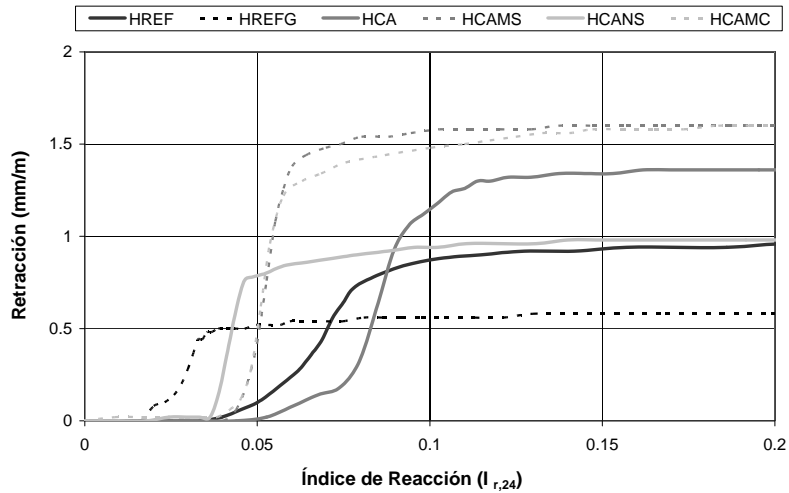


Figura 4. Retracción en función del índice de reacción ($I_{r,24}$)

3.2.- Evaporación, retracción y fisuración a edades tempranas

Durante las 24 horas se monitorizaron en muestras de 500 x 100 x 50 mm, sometidas al efecto de un flujo de aire de 3 m/s y en las mismas condiciones de laboratorio, la tasa de evaporación, midiendo la pérdida de peso (Fig. 3) [16], y la retracción libre (Fig. 4).

Los valores obtenidos corresponden a la retracción por secado ya que las muestras de pastas selladas (cubiertas por una lámina plástica) no produjeron ni pérdida de peso ni retracción por secado, como era de esperar [13]. Para evaluar el riesgo de fisuración por secado a edades tempranas [16], se fabricaron losas de 400 x 400 x 40 mm y de 600 x

HAC con combinación de filler y adiciones minerales

900 x 50 mm (Losa Kraai modificada [17]) en las que se incluyeron perfiles metálicos anclados a la base del molde, para impedir el desplazamiento horizontal, y se aplicó una corriente de aire de 3 m/s mediante un ventilador para forzar la fisuración superficial por retracción a edades tempranas. El área fisurada y la longitud máxima de fisura se recogen en la Tabla 2. Los procedimientos de ensayo de retracción, evaporación y fisuración se pueden consultar en la bibliografía [12-13, 19].

Tabla 2. Área fisurada y longitud máxima de fisura medida sobre losas de 40 x 40 y Kraai modificada (3 m/s durante 6 horas)

Dosif.	Fisuración (400 x 400 mm)		Ensayo Kraai (900 x 600 mm)	
	Área fisurada (mm ² /m ²)	Máx. Longitud de fisura (mm)	Área fisurada (mm ² /m ²)	Máx. Longitud de fisura (mm)
HREF	5,92	18	2,41	26
HREF G	150,23	50	-	-
HCA	43,72	51	344,63	275
HCA MS	402,37	35	1270,74	85
HCA NS	356,34	34	1923,15	80
HCA MC	1188,30	178	536,02	95

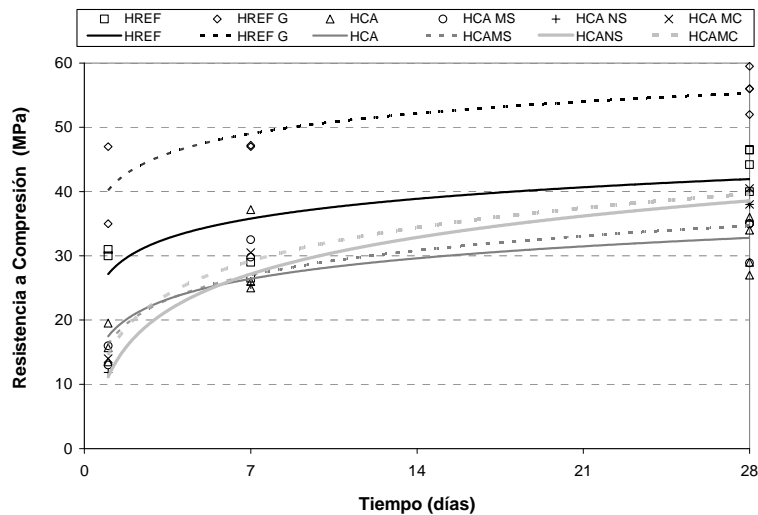


Figura 5. Evolución de la resistencia a compresión de HAC

3.2.- Resistencia a compresión y UPV

Se caracterizó el comportamiento en estado endurecido mediante ensayos de resistencia a compresión en probetas cúbicas de 10 cm a diferentes edades (Fig. 5). La tabla 3 presenta los resultados del módulo de ultrasonidos medido a 28 días, relacionado con la rigidez en estado endurecido y calculado de acuerdo con la literatura [13].

Tabla 3. Velocidad de propagación de ultrasonidos y $E_{\text{ultrasonidos}}$ a 28 días

	HREF	HREF G	HCA	HCAMS	HCANS	HCAMC
UPV (m/s)	4439,7	4701,5	4660,7	4757,50	4369	4566
D ap (g/cm ³)	2,35	2,38	2,31	2,33	2,31	2,25
$E_{\text{ultrasonidos}}$ (GPa)	24,52	26,63	24,87	25,83	23,31	23,12

3.3.- Porosidad y permeabilidad

La estructura porosa del material se ha estudiado en muestras de pastas extraídas de los ensayos de retracción libre (sometidas a viento y selladas) de acuerdo con la norma ASTM D4404-84 (2004) para suelos y rocas que es de aplicación a hormigones [21]. La tabla 4 presenta los valores de porosidad y de diámetro promedio de los poros.

Tabla 4. Porosidad y diámetro promedio de poro (Porosimetría de Mercurio) de pastas con desecación superficial forzada y selladas

<i>Muestras viento</i>	<i>D medio (μ)</i>	<i>% Por.</i>	<i>Muestras selladas</i>	<i>D medio (μ)</i>	<i>% Por.</i>
REF V	0,6714	7,21	REF T	0,1545	10,64
REFG V	0,3635	7,60	REFG T	0,1561	9,15
CA V	0,5839	8,92	CA T	0,3797	9,47
CAMS V	0,5894	8,83	CAMS T	0,3209	5,99
CANS V	0,4166	5,02	CANS T	0,2912	7,90
CAMC V	0,3677	6,48	CAMC T	0,3568	8,39

La permeabilidad al vapor de agua se ha medido en muestras de pasta, extraídas de los ensayos de retracción libre (sometidas a viento y selladas), mediante el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 15.803. La Tabla 5 recoge los valores del coeficiente de permeabilidad y permeabilidad.

Tabla 5. Coeficiente de permeabilidad y Permeabilidad de pastas con desecación superficial forzada y selladas

<i>Muestras viento</i>	<i>Coef. Perm. g/m² 24h.mmHg</i>	<i>Permeabilidad g/m².h por cm</i>	<i>Muestras selladas</i>	<i>Coef Perm. g/m² 24h.mmHg</i>	<i>Permeabilidad g/m².h cm</i>
REF V	0,44	3,06	REF T	0,63	3,36
REFG V	0,51	3,18	REFG T	0,58	2,41
CA V	0,61	4,47	CA T	0,77	4,49
CAMS V	0,58	5,94	CAMS T	0,51	4,59
CANS V	0,44	3,06	CANS T	0,55	4,35
CAMC V	0,45	2,09	CAMC T	0,53	3,66

4.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La inclusión de adiciones en los HAC modifica el comportamiento del material durante las edades tempranas. Los procesos de hidratación del cemento se ven alterados por la presencia de aditivo (HREF) y por la inclusión de filler calizo (HCA). El aditivo retarda el proceso térmico (Fig. 1) y este retardo se atenúa al incluir filler calizo [2-3]. Igualmente, si se considera el índice de reacción de la muestra respecto a la evolución de la microestructura (Fig. 2) se observa que la adición de filler atenúa el adelanto en el

HAC con combinación de filler y adiciones minerales

desarrollo de la microestructura que produce el aditivo con respecto al índice de reacción. Las adiciones activas modifican parcialmente el comportamiento de la muestra con filler, ya que la reacción puzolánica se produce en la etapa de incremento de la temperatura [4-6]. Cabe destacar que la adición de metacaolín es la que más retarda el valor máximo de temperatura, debido al alto contenido en aluminatos [7]. Como consecuencia, se observa que el paso de estado plástico a endurecido se adelanta, especialmente en las adiciones de menor tamaño de partícula (NS y MC). Con respecto a la influencia del ambiente, se observa que la tasa de evaporación es más acentuada en las muestras que incorporan NS y MC, superando incluso a la muestra de referencia con aditivo (Fig. 3). Cabe destacar que estos resultados se repiten en muestras de pastas [13]. La retracción que se produce no es proporcional a la tasa de evaporación (Fig. 4). De hecho, una parte de la evaporación se produce antes de que comience la retracción. La coincidencia entre los cambios de UPV y el inicio de la retracción en valores de índice de reacción muy similares, apuntan a que este momento corresponde con el umbral de interconexión entre partículas y, por tanto, el paso a un comportamiento rígido. En este punto aparecerán tensiones en la muestra que pueden producir fisuración. En la tabla 2 se observa que la inclusión de adiciones activas incrementa el riesgo de fisuración por secado. Los dos ensayos utilizados muestran grandes diferencias en los resultados de fisuración. Probablemente se debe a que actúan mecanismos diferentes de propagación de fisuras.

Con respecto al comportamiento en estado endurecido, las adiciones activas producen un incremento de la resistencia con respecto al HAC sólo con filler (Fig. 5). El incremento es más acusado para las adiciones de menor tamaño de partícula (NS y MC). Sin embargo, el módulo de ultrasonidos (Tabla 3) apunta a que este incremento no supone una mayor rigidez del material. En el caso del MS, sucede al contrario. El incremento de resistencia con una reducción de la rigidez se puede explicar por la capacidad puzolánica de las adiciones NS y MC y los cambios en la interfase. El tamaño de partícula de la adición también influye en la porosidad y la permeabilidad al vapor. La inclusión de adiciones reduce el tamaño de poro promedio y la porosidad respecto al HAC sólo con filler, siendo este fenómeno más acentuado en muestras selladas, donde todos los poros están colmatados de agua y, por tanto, los productos de la reacción pueden cristalizar dentro. La permeabilidad sigue una pauta similar, ya que el uso de adiciones reduce el coeficiente de permeabilidad, en muestras con viento y selladas. Contra lo esperado, la porosidad y la permeabilidad aumentan en las muestras selladas, salvo en el caso del MS. La explicación tiene que ver con el mayor volumen de poros de las muestras selladas debido a que no se ha producido evaporación de agua durante el endurecimiento. Aunque el tamaño de poro promedio es menor, debido a que se han formado productos de hidratación dentro de los poros, la permeabilidad al vapor de agua aumenta, debido a que el vapor ejerce presión sobre la muestra y la permeabilidad al vapor depende de la porosidad y no del tamaño del poro promedio.

4.- CONCLUSIONES

La inclusión de pequeñas cantidades de micro y nanosílice y metacaolín en HAC con filler calizo produce cambios a edades tempranas y en estado endurecido. A edades tempranas aumentan la temperatura y adelantan la evolución de la microestructura con respecto al índice de reacción, aumenta la tasa de evaporación y la retracción por secado, lo que puede aumentar los riesgos de fisuración en elementos sometidos al

viento. En estado endurecido, las adiciones estudiadas modifican la interfase, mejoran la resistencia sin incrementar la rigidez, reducen la porosidad y la permeabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en la realización de los ensayos a H. Arenas y A. Mozas. También desean agradecer el apoyo técnico y suministro de componentes a G. Sánchez de BASF S.A., I. Pajares de Omya Clariana SL y R. Tascón de Cementos Valderrivas. Los trabajos han sido parcialmente financiados por los programas CCG-08-UAH/MAT 4038, cofinanciado por la Universidad de Alcalá y la C. de Madrid, PI3-2008-0499, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, PPII-11-0167-3491, financiado por la Junta de C. de Castilla-La Mancha y el programa Geomateriales (S2009/Mat-1629), financiado por la C. de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] AGUADO, A. – El hormigón autocompactable: introducción general. Jornada sobre Formigón Autocompactable. IECA- ANEFHOP. UPC Barcelona 2.12.2003
- [2] POPPE, A, DE SCHUTTER G. - Cement hydration in the presence of high filler contents, *Cem. and Con. Research* 35, 2290 – 2299. Elsevier Ltd., 2005. ISSN: 0008-8846
- [3] YE, G., LIU X., POPPE A.M., DE SCHUTTER G., VAN BREUGEL K. - Numerical simulation of the hydration process and the development of microstructure of SCCP containing limestone as filler, *Materials and Structures* 40, 865–875. Springer-RILEM 2007. ISSN: 1359-5997
- [4] KADRI, E. H., AGGOUN S., DE SCHUTTER G., EZZIANE K. - Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration, *Materials and Structures* 43, 665–673. Springer-RILEM 2010. ISSN: 1359-5997
- [5] SENFF, L., HOTZA D., REPETTE W.L., FERREIRA V.M., LABRINCHA J. - Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design, *Construction and Building Materials* 24, 1432–1437. Elsevier Ltd., 2010. ISSN: 0950-0618
- [6] GAITERO, J.J., CAMPILLO I., GUERRERO A. - Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research* 38, 1112–1118. Elsevier Ltd., 2008. ISSN: 0008-8846
- [7] SIDDIQUE, R., KLAUS J. - Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science* 43, 392–400. Elsevier Ltd., 2009. ISSN: 0169-1317
- [8] BENTZ, D.P - A review of early-age properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Research* 38, 196–204, Elsevier Ltd., 2008. ISSN: 0008-8846
- [9] BOUMIZ, A., VERNET C., TENOUDJI F.C. - Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages - Evolution with Time and Degree of Hydration, *Advn Cem Bas Mat* 3, 94-106. Elsevier Ltd., 1996. ISSN: 0008-8846
- [10] HESSE, C., GOETZ-NEUNHOEFFER F., NEUBAUER J. - A new approach in quantitative in-situ XRD of cement pastes: Correlation of heat flow curves with early

HAC con combinación de filler y adiciones minerales

hydration reactions. *Cement and Concrete Research* 41, 123–128. Elsevier Ltd., 2011. ISSN: 0008-8846

[11] DESMET, B., ATITUNG K.C., ABRIL M.A., VANTOMME J., FEYS D., ROBEYST N., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G., BOEL V., HEIRMAN G., CIZER Ö., VANDEWALLE L., VAN GEMERT D. - Monitoring the early-age hydration of self-compacting concrete using ultrasonic p-wave transmission and isothermal calorimetry. *Materials and Structures* 44, 1537-1558. Springer-RILEM 2011. ISSN: 1359-5997

[12] BARLUENGA, G. - Estudio de comportamiento a edades tempranas de Hormigones Autocompactantes. II Congreso Nacional de Investigación en Edificación. UPM, EUAT, D.L. 2010. ISBN 978-84-693-2844-8

[13] BARLUENGA, G., PALOMAR I., PUENTES J. - Early age and hardened performance of fluid cement pastes combining mineral additions, *Materials and Structures*, Springer-RILEM 2012. ISSN: 1359-5997. (On line oct. 2012, DOI 10.1617/s11527-012-9944-9).

[14] DARQUENNES, A., KHOKLAR M.I.A., ROZIÈRE E., LOUKILI A., GRONDIN F., STAQUET S. - Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Construction and Building Materials* 25, 1836–1847. Elsevier Ltd., 2011. ISSN: 0950-0618

[15] ROBEYST, N., GRUYAERT E., GROSSE C.U., DE BELIE N. - Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. *Cement and Concrete Research* 38, 1169-1176. Elsevier Ltd., 2008. ISSN: 0008-8846

[16] UNO, P. - Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas. *ACI Materials Journal*, 95 (4), 365-375. American Concrete Institute 1998. ISSN: 0889-325X

[17] KRAAI, P. P.; A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. *Concrete Construction* 9 (30) 775-778. The Aberdeen Group 1985. ISSN: 0010-5333

[18] HOLT, E., LEIVO M. - Cracking risks associated with early age shrinkage, *Cement and Concrete Composites*, 26 (5), 521-530. Elsevier Ltd., 2004. ISSN: 0958-9465

[19] BARLUENGA, G., HERNÁNDEZ OLIVARES F. - Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age: Experimental results on standard concrete and SCC. *Cem. and Con. Research* 37(12), 1624-1638. Elsevier Ltd., 2007. ISSN: 0008-8846

[20] BARLUENGA, G. - Fiber–matrix interaction at early ages of concrete with short fibers. *Cement and Concrete Research* 40, 802–809. Elsevier Ltd., 2010. ISSN: 0008-8846

[21] BERMEJO, E. B., MORAGUES A., GÁLVEZ J.C., FÉRNANDEZ CÁNOVAS M. - Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada. *Materiales de Construcción* 60, 299, 37-51. IccET CSIC 2010. ISSN: 0465-2746