

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Influencia de los regímenes de expansión y curado en el comportamiento de hormigones expansivos autocompactantes y convencionales

José L. García Calvo ⁽¹⁾, Pedro Carballosa ⁽¹⁾ y David Revuelta ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5693>

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el comportamiento y las prestaciones de hormigones autocompactantes expansivos (HACEs), comparándolos con hormigones expansivos de consistencia blanda. En la fabricación de estos hormigones se han empleado dos tipos de agentes expansivos: tipo K, basado en la formación de etringita, y tipo G, basado en la formación de portlandita. Se han analizado las propiedades físico-mecánicas, microestructurales y el comportamiento expansivo de estos hormigones bajo distintas condiciones de restricción y de curado. Los resultados obtenidos muestran que es posible diseñar HACEs, incluso empleando elevados contenidos de agentes expansivos, si bien el empleo de filler calizo es más aconsejable que el de cenizas volantes, debido a que estas últimas pueden limitar la expansión generada. Además, las condiciones de curado y la composición del hormigón influyen en la reactividad de los agentes expansivos. Por otro lado, las condiciones de expansión (libre o restringida) influyen en la resistencia a compresión y la estructura porosa de los hormigones, así como en la morfología y composición química de los hidratos promotores de la expansión.

PALABRAS CLAVE: hormigón expansivo; condiciones de curado; condiciones de restricción; prestaciones; microestructura.

1.- INTRODUCCIÓN

Los hormigones expansivos, de uso cada vez más habitual en la construcción, se clasifican en función de la magnitud de su expansión en hormigones de retracción compensada, de aplicación principal en la ejecución de elementos superficiales tipo losas y pavimentos con objeto de disminuir o eliminar la fisuración y limitar el número de juntas, y hormigones pretensados químicamente, de aplicación en sistemas de tubos rellenos de hormigón para mejorar la respuesta estructural y facilitar la puesta en obra [1]. La metodología más empleada para su fabricación implica la utilización de agentes expansivos de carácter hidráulico que inducen un incremento del volumen del hormigón tras el fraguado durante

las fases iniciales del endurecimiento, dado que promueven la formación de una mayor proporción de ciertos hidratos. El comportamiento mecánico y expansivo de estos hormigones va a depender de diversos factores, unos asociados a la propia composición del hormigón (tipo de cemento, tipo y dosis de agente expansivo, etc.), y otros relativos a las condiciones de curado y de restricción de los elementos de hormigón fabricados [2-4].

En este trabajo se han diseñado hormigones expansivos mediante el empleo de dos tipos de agentes expansivos: tipo-K, basados en la formación de etringita, y tipo G, basados en la formación de portlandita. En ambos casos las condiciones de curado van a influir en el régimen de expansión obtenido. Se han desarrollado hormigones autocompactantes expansivos (HACE), puesto que presentan unas características idóneas para ciertas aplicaciones como el relleno de tubos de acero, investigando la influencia del empleo de filler calizo o cenizas volantes para incrementar el contenido de finos de la mezcla. Los hormigones fabricados se han evaluado bajo diferentes condiciones de curado y de restricción de la expansión. Los resultados obtenidos se han comparado con los mostrados por un hormigón expansivo de consistencia blanda.

2.- EXPERIMENTAL

2.1.- Materiales y composiciones de hormigón empleadas

En este trabajo se han estudiado 6 dosificaciones de hormigones, expuestas en la Tabla 1. Los hormigones “C” hacen referencia al hormigón con consistencia blanda y los “A” a los autocompactantes. En estos últimos se ha incrementado el contenido en finos mediante la adición de cenizas volantes (mezclas AC) o de filler calizo (mezclas AF). Todos los hormigones se fabricaron con contenidos de cemento y relación agua/cemento (a/c) idénticos, dado que ambos parámetros modifican el comportamiento expansivo resultante.

Tabla 1. Composición de los hormigones empleados (kg/m³)

	<i>C-K</i>	<i>C-G</i>	<i>AC-K</i>	<i>AC-G</i>	<i>AF-K</i>	<i>AF-G</i>
Agua	195	195	195	195	195	195
CEM I 42,5R	385	385	385	385	385	385
Cenizas volantes	-	-	116	116	-	-
Filler calizo	-	-	-	-	116	116
Grava (12/20)	587	599	-	-	-	-
Gravilla (4/12)	376	383	654	669	667	682
Arena(0/4)	775	791	924	945	942	963
SP	-	-	5	5	5	5
AE-K	58	-	58	-	58	-
AE-G	-	19	-	19	-	19

En cada tipo de hormigón se emplearon dos tipos de agentes expansivos: tipo K y tipo G. En el primer caso se adicionó en un 15% y en el segundo en un 5% en peso de cemento,

debido a resultados previos en los que el agente tipo G promovía una mayor expansión bajo condiciones de curado en ausencia de agua [4].

2.2.- Procedimiento experimental

Las propiedades de los hormigones en el estado fresco se caracterizaron midiendo la consistencia [5] o el escurrimiento y la capacidad de paso a través del anillo japonés [6,7], la densidad [8] y el contenido en aire [9]. Además, se fabricaron probetas cilíndricas de 100x200 mm para analizar la resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días [10] y de dimensiones 75x150mm para analizar su microestructura mediante MIP y BSEM, empleando dos tipos de curado: bajo agua a 20±2°C o manteniendo las probetas en sus moldes y tapadas con film a 20±2°C. Además, se fabricaron probetas prismáticas de dimensiones 254x76x76mm para la determinación de la expansión uniaxial restringida [11], sometiénolas a tres tipos de curados distintos: bajo agua a 20±2°C, envueltas en film a 20±2°C y a 50±5%HR y 20±2°C.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Características de los hormigones en el estado fresco

La Tabla 2 muestra las propiedades del estado fresco de las 6 mezclas de hormigón. Se observa que las mezclas con agente expansivo tipo K presentan una fluidez ligeramente inferior que las fabricadas con el tipo G, lo cual puede deberse simplemente al mayor contenido de agente expansivo empleado del primero. La mayor diferencia detectada entre los HACE y los hormigones de consistencia blanda está en el mayor contenido en aire de los primeros. De hecho, en los HACE se detectaban pequeñas burbujas de aire que podrían formarse por la acción conjunta del agente expansivo y el superplastificante. De cualquier modo, los datos de densidad entre los hormigones C y los autocompactantes son bastante similares, ligeramente superior en los primeros para ambos tipos de agente expansivo.

Tabla 2. Propiedades del estado fresco de los hormigones fabricados

	<i>C-K</i>	<i>C-G</i>	<i>AC-K</i>	<i>AC-G</i>	<i>AF-K</i>	<i>AF-G</i>
Consistencia (mm)	60	80	-	-	-	-
Escurrimiento (mm)	-	-	570	650	550	690
Anillo-J (mm)	-	-	520	620	510	650
Densidad (kg/m ³)	2,33	2,36	2,19	2,20	2,21	2,19
Contenido en aire (%)	2,5	2,1	2,8	3,0	2,9	3,1

3.2.- Propiedades físico-mecánicas de los hormigones expansivos fabricados.

La evolución de la resistencia a compresión de los hormigones se muestra en la Fig.1. En el caso de las probetas curadas bajo agua, la resistencia a compresión de los hormigones fabricados con agente tipo G es mayor que la fabricada con el tipo K, lo cual está ligado al mayor grado de expansión bajo agua obtenido en el segundo caso, debido al mayor

contenido de agente utilizado (ver sección 3.3). Este mayor grado de expansión puede llevar asociada la formación de microfisuras en el interior del hormigón que disminuyan su resistencia a compresión. En el caso de las probetas curadas en su propio molde y envueltas en film, donde la expansión está restringida, ocurre lo contrario, el mayor valor lo alcanzan los hormigones con agente expansivo tipo K. Esto concuerda con la mayor expansión generada en estos hormigones dada la mayor dosis de agente expansivo empleada (ver sección 3.3). Esta mayor expansión, asociada a la mayor formación de hidratos (etringita), promueve la disminución de la porosidad total del material, generando el aumento de resistencias mecánicas observado, tal como se describe a continuación. De hecho, la resistencia a compresión a 28 días es siempre superior en las muestras curadas en sus moldes que en las curadas bajo agua.

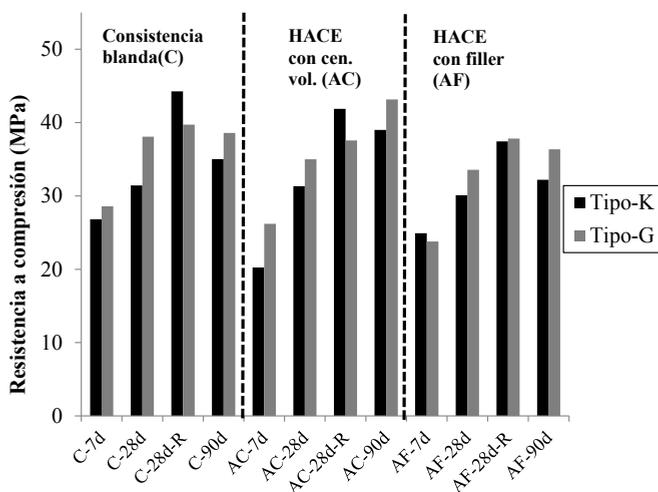


Figura 1. Evolución de la resistencia a compresión de los hormigones fabricados. R: probetas curadas en su propio molde (expansión restringida).

Por tanto, los resultados de resistencia a compresión pueden relacionarse con la estructura porosa de dichos hormigones. En la Tabla 3 se muestra la porosidad total medida tras 2 y 28 días de curado y en la Fig.2 la distribución del tamaño de poro tras 28 días de curado.

Tabla 3. Porosidad total de los hormigones fabricados a 2 y 28 días

Porosidad total (%)		C-K	C-G	AC-K	AC-G	AF-K	AF-G
Expansión libre	2 días	18,8	17,4	19,1	20,4	19,0	20,8
	28 días	13,0	13,3	14,7	16,2	15,4	16,0
Expansión restringida	2 días	18,9	18,3	17,7	20,5	15,0	18,8
	28 días	12,0	10,7	13,1	15,3	13,8	9,1

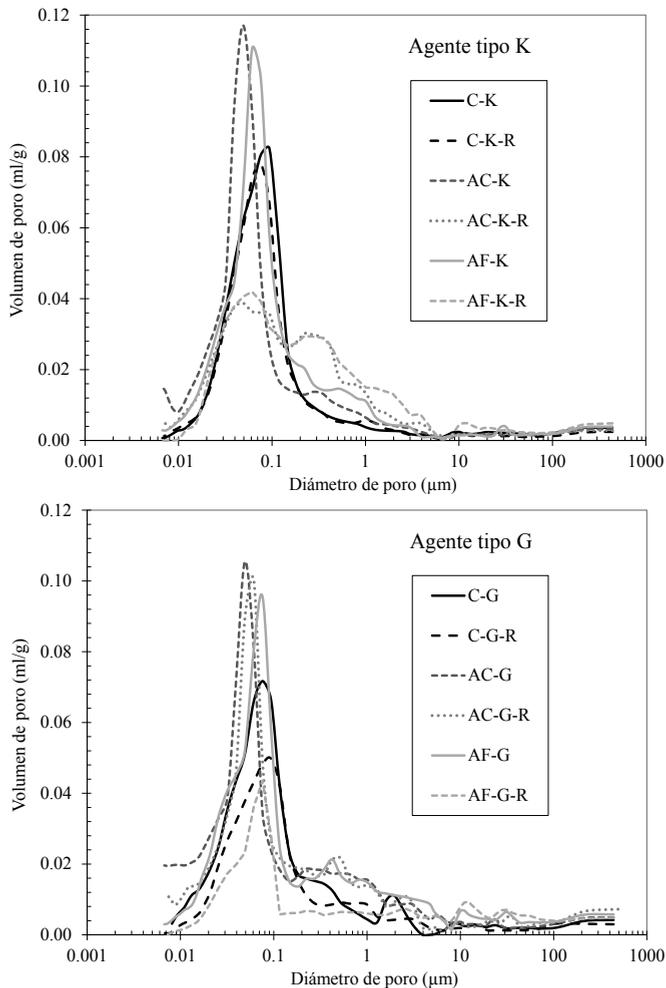


Figura 2. Distribución del tamaño de poro tras 28 días de curado. Arriba: hormigones con agente tipo K; abajo: horm. con agente tipo G. R: probetas curadas en su propio molde (expansión restringida).

A los dos días, cuando los procesos de hidratación aún no están completos, no se aprecian diferencias entre los valores de porosidad obtenidos en condiciones de expansión libre o restringida para cada tipo de hormigón, excepto en el caso del HACE con filler calizo y agente tipo G. Este hecho vendría motivado por el efecto nucleante del filler calizo [12], que promueva una aceleración de la formación de portlandita. Este efecto se hace más evidente en las muestras no curadas bajo agua. Tras 28 días, la porosidad total de las muestras curadas dentro del molde (expansión restringida) es menor que la de las muestras curadas bajo agua, lo que concuerda con las resistencias a compresión obtenidas. Es muy destacable el descenso de porosidad total en la muestra AF-G curada en el molde con

respecto a la curada bajo agua, que de nuevo estaría explicado por el fuerte efecto nucleante del filler calizo, incrementando la formación de portlandita a partir del agente expansivo tipo G. En relación a la distribución del tamaño de poro, las muestras confinadas presentan una porosidad más refinada que las curadas bajo agua. Este último aspecto es especialmente destacable en las muestras con agente expansivo tipo K, dada la elevada dosis utilizada (15%).

3.3.- Comportamiento expansivo de los hormigones fabricados

El comportamiento expansivo de los hormigones se ha evaluado en tres condiciones de curado distintas: bajo agua, envueltos en film para evitar cualquier intercambio hídrico con el ambiente y en ambiente de secado ($HR=50\pm 5\%$). La temperatura de curado ha sido $20\pm 2^\circ\text{C}$ para todos los casos. Las Figs. 3, 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ambientes considerados, dejando claro que tanto la composición del hormigón como las condiciones de curado influyen en el régimen de expansión resultante. Bajo agua, una vez alcanzado el grado máximo de expansión ésta se mantiene constante, mientras que con los otros dos tipos de curado se produce un ligero descenso de la expansión con el tiempo, siendo más pronunciado en el caso de los hormigones con expansivo tipo K. De hecho, en condiciones de secado, la retracción final sufrida tras alcanzar la expansión máxima es superior en los hormigones con expansivo tipo K, a pesar de emplearse el triple de dosis que con el expansivo tipo G. Por tanto, parece que el curado húmedo es más importante en el caso de emplear los agentes expansivos formadores de etringita. Otra diferencia entre ambos agentes es que el grado máximo de expansión se alcanza antes con los agentes tipo G, lo que concuerda con su hidratación más rápida [13].

Comparando los HACEs fabricados con los hormigones expansivos de consistencia blanda, mientras que con el curado bajo agua y en las muestras envueltas en film no se detectan diferencias en la expansión alcanzada, en las muestras sometidas a secado la mayor expansión se midió en los hormigones de consistencia blanda con ambos agentes expansivos. Es probable que el retardo en el tiempo de fraguado que generan los aditivos superplastificantes empleados en la fabricación de los HACE pueda disminuir la expansión obtenida en estas condiciones, ya que los compuestos expansivos comienzan a formarse antes de que la matriz endurezca completamente, por lo que el material en estado plástico es capaz de absorber la deformación de los núcleos expansivos sin experimentar un cambio neto de longitud en la dirección restringida. Además, tras el fraguado no hay aporte extra de agua que permita hidratar posteriormente el agente expansivo que aún no ha reaccionado, y existe una pérdida de agua de amasado por secado que limita la capacidad expansiva del material en el estado endurecido.

En relación a las diferencias detectadas entre los distintos tipos de hormigones fabricados con un mismo agente expansivo, al emplear el tipo K el HACE con cenizas volantes muestra menor expansión tras 7 días de curado que los otros dos. Este efecto es más significativo en las muestras curadas bajo agua. Esta menor expansión puede estar originada por el mismo efecto de retraso en el tiempo de fraguado mencionado anteriormente, causado en este caso por la adición de cenizas volantes [14]. Por tanto, la etringita que inicialmente vaya formando el agente expansivo se producirá cuando el

hormigón esté aún en el estado plástico, no generando expansión remanente. Con el filler calizo esto no ocurre, incluso puede favorecer una mayor expansión debido a la aceleración de la hidratación que puede producir. Por ello, al desarrollar HACEs, si se emplea agente expansivo tipo K, es aconsejable utilizar filler calizo antes que cenizas volantes. En el caso de los hormigones con agente expansivo tipo G, las diferencias entre tipos de hormigones en cada condición de curado son menos significativas, posiblemente debido al menor contenido de agente expansivo empleado. Sin embargo, es destacable que en condiciones de secado, de nuevo el hormigón de consistencia plástica es el que muestra mayor expansión, seguido del HACE con filler calizo y, por último, del HACE con cenizas volantes.

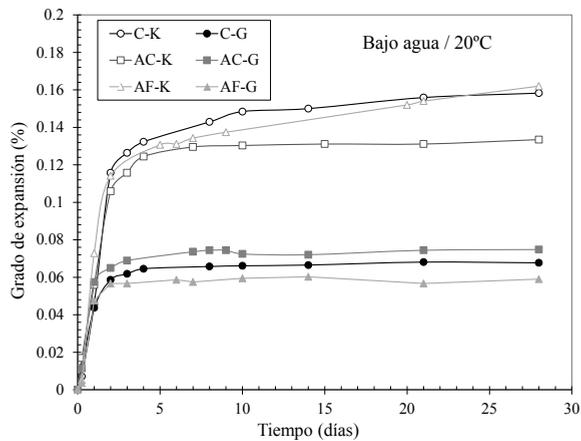


Figura 3. Comportamiento expansivo de los hormigones curados bajo agua a 20±2°C.

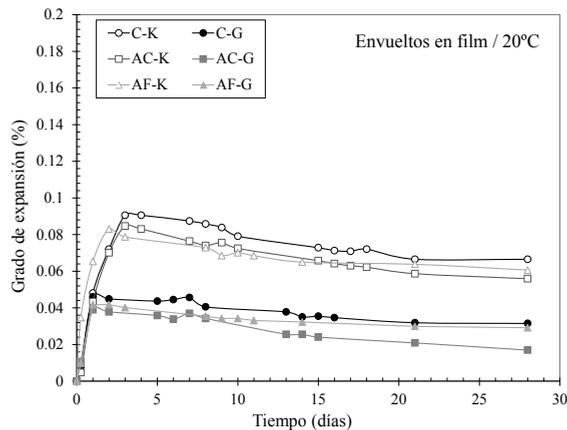


Figura 4. Comportamiento expansivo de los hormigones envueltos en film mantenidos a 20±2°C.

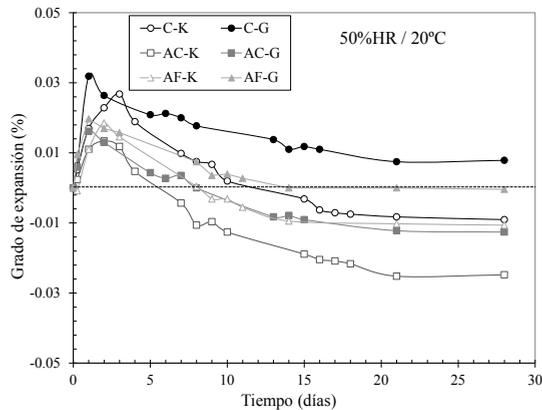


Figura 5. Comportamiento expansivo de los hormigones curados a 50±5%HR y 20±2°C.

3.4.- Evaluación microestructural de los hormigones fabricados

Mediante BSEM se intentaron detectar las posibles diferencias entre los hidratos generadores de la expansión formados en condiciones de expansión libre o de expansión restringida (curados en sus propios moldes). Como ejemplo, se muestran los resultados obtenidos en los hormigones de consistencia blanda. En los hormigones basados en el agente tipo K los nódulos de etringita son más densos y presentan cierta amorficidad en los hormigones confinados, tal y como se aprecia en la imagen de la Fig.6. En los curados bajo agua, las placas de etringita son más evidentes y de mayor tamaño. Por otro lado, los microanálisis EDX realizados indican que la relación C/S de los geles C-S-H es superior en los hormigones curados bajo agua, lo que indica una mayor disponibilidad de calcio en estas condiciones procedente de la disolución de los anhídros del agente expansivo tipo K y del cemento. Además, los hormigones confinados presentan mayor contenido el aluminio y azufre en sus geles C-S-H. Respecto a la composición química de los hidratos de etringita formados, se aprecia también un enriquecimiento en calcio en los hormigones curados bajo agua. Por tanto, es evidente que las condiciones de curado y expansión van a promover modificaciones en la morfología y composición química de la etringita formada.

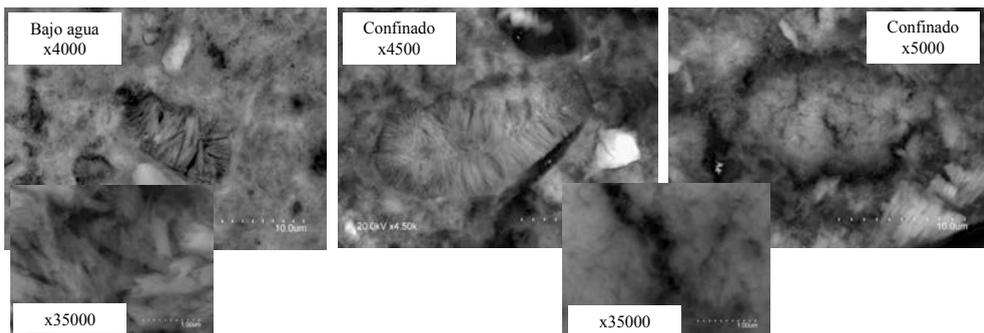


Figura 6. Imágenes BSEM de etringita formada en el hormigón C-K curado bajo agua (izquierda) o en condiciones de restricción de la expansión (derecha).

En el caso de los hormigones fabricados con agente expansivo tipo G, también existen diferencias entre la morfología y el tamaño de las placas de portlandita formadas en condiciones de expansión libre o restringida, como se observa en la Fig. 7. Sin embargo, estas diferencias son menores que en el caso de la etringita formada en distintas condiciones de expansión en los hormigones con expansivo tipo K. De cualquier modo, las placas de portlandita son más densas en los hormigones confinados y están mejor integradas en la matriz de la pasta de cemento. Respecto a la composición de los geles C-S-H, de nuevo la relación C/S es superior en los hormigones curados bajo agua. Hay que indicar que estudios recientes han postulado que un descenso en la relación C/S de los geles C-S-H va asociado con un incremento de las resistencias mecánicas [15], lo que podría explicar en parte la mayor resistencia media en los hormigones confinados.

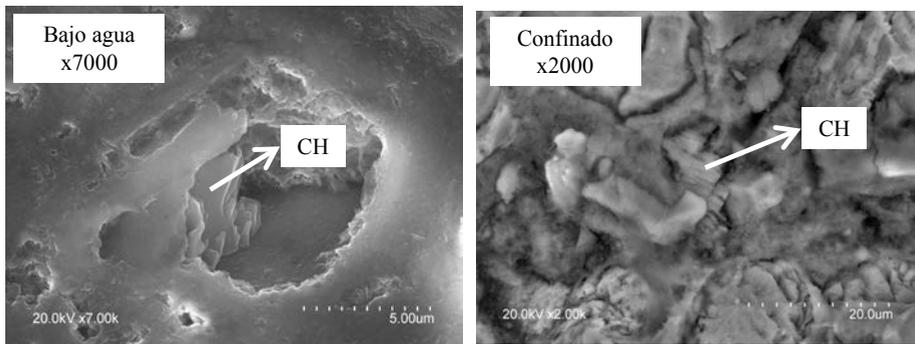


Figura 7. Imágenes BSEM de etringita formada en el hormigón C-G curado bajo agua (derecha) o en condiciones de restricción de la expansión (izquierda).

4.- CONCLUSIONES

La evaluación del comportamiento y las prestaciones de hormigones autocompactantes expansivos, comparándolos con hormigones expansivos de consistencia blanda, en distintas condiciones de curado y expansión, ha permitido la obtención de las siguientes conclusiones principales:

- La resistencia a compresión es superior en los hormigones confinados que en aquellos curados en condiciones de expansión libre (bajo agua). Tras 28 días de curado, la porosidad total es menor también en los primeros, y mayor el refinamiento de la estructura porosa resultante. La adición de filler calizo en los hormigones con agente expansivo tipo G genera aún un mayor refinamiento de la estructura porosa debido a un fuerte efecto nucleante del filler que aumenta e incrementa la velocidad de formación de portlandita.
- Tanto la composición del hormigón como las condiciones de curado influyen en la expansión resultante obtenida. El curado húmedo favorece la expansión de ambos agentes, si bien tiene una mayor influencia con el agente tipo K. En condiciones de secado, el retardo en el inicio de la hidratación asociado al empleo de aditivos superplastificantes en los HACEs, provoca una menor expansión máxima que en los

hormigones expansivos de consistencia blanda. Esta limitación se solventa en parte al emplear filler calizo en vez de cenizas volantes, puesto que acelera las reacciones de hidratación al actuar como nucleante (fundamentalmente de portlandita). Esto, unido al hecho de que las cenizas volantes retardan los tiempos de fraguado, permite concluir que con el fin de obtener una mayor expansión a igualdad de dosis de agente expansivo, el empleo de filler calizo en HACEs es preferible al de cenizas volantes.

- La morfología y la composición química de la etringita formada a partir del agente tipo K es distinta en condiciones restringidas que en condiciones de expansión libre, presentando una estructura más amorfa y densa en el primer caso, así como un menor contenido en calcio. En el caso de la portlandita formada a partir del agente expansivo tipo G, en condiciones de expansión restringida las placas son también más densas y están mejor integradas en la matriz de la pasta de cemento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la financiación recibida para la realización de este trabajo dentro del proyecto BIA2015-64363-R. Además, agradecen a A. Fernández-Escandón y J.C. Porrás su colaboración durante el desarrollo de la experimentación realizada.

REFERENCIAS

- [1] ACI committee 223. Guide for the use of shrinkage Compensating Concrete. ACI **223R** (2010).
- [2] Klein, A., Karby, T. and Polivka, M., ‘Properties of an Expansive Cement for Chemical Prestressing’, ACI Journal, Proceedings, **58** (1961) 59-82.
- [3] Nagataki, S. and Gomi, H., ‘Expansive Admixtures (mainly ettringite)’, Cement and Concrete Composites **20** (1998) 163–170.
- [4] Carballosa, P., García Calvo, J.L., Revuelta, D., Sánchez, J.J. and Gutiérrez, J.P., ‘Influence of cement and expansive additive types in the performance of self-stressing and self-compacting concretes for structural elements’, Construction and Building Materials **93** (2015) 223-229.
- [5] UNE-EN 12350-2:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.
- [6] UNE-EN 12350-8:2011. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.
- [7] UNE-EN 12350-12:2011 Ensayos de hormigón fresco. Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés.

- [8] UNE-EN 12350-6:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad.
- [9] UNE-EN 12350-7:2010. Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.
- [10] UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [11] ASTM C878/C878M – 09. Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete.
- [12] Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E. and Scrivener, K., ‘Influence of limestone on the hydration of Portland cements’, *Cement and Concrete Research* **38** (2008) 848-860.
- [13] Collepardi, M., Borsoi, A., Collepardi, S., Olagor, J.J.O. and Troli R., ‘Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions’, *Cement and Concrete Composites* **27** (2005) 704–708.
- [14] Zhang, G. and Li, G., ‘Effects of mineral admixtures and additional gypsum on the expansion performance of sulphoaluminate expansive agent at simulation of mass concrete environment’, *Construction and Building Materials* **113** (2016) 970-978.
- [15] Bauchy, M., Abdolhosseini Qomi, M.J., Bichara, C., Ulm, F.J. and Pellenq, R.J.-M., ‘Nanoscale structure of cement: Viewpoint of rigidity theory’, *Journal of Physical Chemistry C* **118** (2014) 12485-12493.