

Efecto de las condiciones de curado en las propiedades mecánicas de los morteros con partículas superabsorbentes

Effect of curing conditions on the mechanical properties of mortars with superabsorbent polymers

L. P. Esteves^(*), H. Paiva^(**), V. M. Ferreira^(**), P. Cachim^(***)

Recepción/Received: 18-VII-08

Aceptación/Accepted: 30-I-09

Publicado online/Online publishing: 13-V-10

RESUMEN

Este artículo presenta el efecto de las condiciones de curado sobre las propiedades mecánicas de los morteros a los que se han añadido polímeros superabsorbentes como agentes de curado interno. Los morteros se curaron a dos temperaturas, 20 y 40 °C, y a varios valores de la humedad relativa entre el 30 y el 95%. Se estudió asimismo dicho efecto en función de la relación agua/cemento. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y a la tracción a distintas edades. Los resultados incluyen la evolución de la pérdida de masa y su relación tanto con las condiciones ambientales como con el comportamiento resistente de los morteros. El curado interno de éstos con polímeros superabsorbentes permitió el mantenimiento de sus propiedades mecánicas en condiciones de curado extremas.

Palabras clave: polímeros superabsorbentes, morteros, curado, propiedades mecánicas.

SUMMARY

This paper describes the effect of curing conditions on the mechanical properties of mortars containing superabsorbent polymers (SAP). Curing temperature and relative humidity were varied from 20 to 40 °C and 30 to 95%, respectively, in mixes with different water/cement and cement/aggregate ratios. Tensile and compressive strength tests were performed at several ages. Weight loss over time was measured and related to curing conditions and strength. The addition of SAPs was found to effectively maintain cement-based mortar strength under extreme curing conditions.

Keywords: superabsorbent polymers, mortars, curing, mechanical properties.

(*) Instituto Politécnico do Porto (Porto, Portugal).

(**) CICECO, Universidad de Aveiro (Aveiro, Portugal).

(***) LABEST, Universidad de Aveiro (Aveiro, Portugal).

Persona de contacto/Corresponding author: pcachim@ua.pt

1. INTRODUCCIÓN

El curado es un periodo crítico del proceso de endurecimiento de los hormigones de cemento frescos, en el que el hormigón desarrolla sus principales características en condiciones específicas (1). Un curado adecuado requiere principalmente una disponibilidad permanente de humedad que permita las reacciones de hidratación a temperaturas moderadas y, en ausencia de fuerzas externas, en las primeras edades. También es sabido que la temperatura afecta a las propiedades del hormigón (2).

El hormigón de alta resistencia (HAR) es especialmente sensible a los problemas de curado (1) debido a su baja relación agua/cemento (a/c) y a la presencia de adiciones y aditivos, como son el humo de sílice y los plastificantes, que se le suelen añadir para controlar o mejorar su trabajabilidad y otras características. Cuando no se produce el curado interno, el HAR puede sufrir en edades tempranas deformaciones y microfisuras importantes por todo el sistema (3). La densa microestructura del hormigón moderno produce rápidamente discontinuidad capilar en la red porosa inicial y, en consecuencia, impide el acceso del agua exterior al interior y con ello la saturación del volumen total (4). Es importante reducir este fenómeno y fomentar métodos para el curado interno. Entre estos métodos se encuentra la adición de agentes de curado interno que actúan como reservas de agua que liberan en función de las necesidades, o de agentes de curado que pueden fijar el agua en la microestructura, retrasando de este modo su pérdida (sellado interno). En el primer caso, los agentes de curado pueden ser áridos ligeros (AL) o polímeros superabsorbentes (PSA) (5). Los resultados obtenidos con los PSA han demostrado que contribuyen a reducir los problemas de calidad del hormigón (3, 5-7). Sin embargo, su introducción en la matriz del cemento conlleva también una menor resistencia (8).

Otro aspecto importante de las pastas y los morteros de cemento es la sensibilidad ante las condiciones medioambientales adversas, en concreto a las temperaturas elevadas y a la humedad relativa baja. La evaporación del agua, la estabilidad dimensional y el desarrollo de la resistencia se ven afectados por dichas condiciones externas. En este estudio, se analizó la influencia de las condiciones de curado en las propiedades mecánicas de hormigones de cemento, tanto de alta resistencia como normales, con adición de polímeros superabsorbentes, con sin y con agua ocluida.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo de investigación se estudiaron dos series de morteros de cemento (M3 y M4), según se indica en la Tabla 1. La serie M3 se caracterizaba por una relación

1. INTRODUCTION

Curing is a critical period of fresh cement hardening in which concrete develops its fundamental characteristics under specific conditions (1). Good curing essentially calls for the permanent availability of moisture to support hydration reactions at moderate temperatures and, in the absence of external forces, at early ages. Temperature is also known to affect concrete properties (2).

High performance concrete (HPC) is particularly sensitive to curing (1) due to its low water/cement ratio (w/c) and the presence of additions such as silica fume and plasticizers to control or improve workability and other features. In the absence of internal curing, HPC may undergo considerable early-age deformation and micro-cracking (3). Due to the dense microstructure of modern concrete, capillary discontinuity appears in the very early age pore network, blocking the access of the external water needed to saturate the entire mix (4). These developments must be mitigated by inducing internal curing. The addition of curing agents that act as water reservoirs, releasing water on demand, or curing agents able to fix water in their microstructure, delaying water loss from the system (internal sealing), constitute two methods of inducing internal curing. In the former, the curing agents may be lightweight aggregates (LWA) or superabsorbent polymers (SAP) (5). Research on SAP has shown that their addition to concrete mitigates quality shortcomings (3, 5-7). Their inclusion in the cement matrix also leads to lower strength, however (8).

Another significant aspect of cement-based materials is their sensitivity to adverse environmental conditions, i.e., high temperature and low relative humidity. Water evaporation, dimensional stability and strength development are impacted by non-autogenous conditions. In this study, the effect of curing conditions on mechanical properties was analyzed in both high performance and normal cement-based mortars containing superabsorbent polymers, with and without extra water.

2. MATERIALS AND METHODS

The composition of the two series of cement mortars, M3 and M4, studied hereunder is given in Table 1. The water/cement ratio (w/c) was 0.3 in series M3 and 0.4 in

agua/cemento (a/c) de 0,3, mientras que la serie M4 tenía una relación a/c de 0,4. La relación cemento/agregado (c/a) fue de 1:1 por peso en la serie M3 y de 1:2 en la serie M4. Como conglomerante se empleó cemento Portland I 42.5R. Se añadió a las mezclas VISOCRETE3005, un superplastificante (SP) policarboxílico, con el fin de mantener su trabajabilidad. El ajuste del SP se realizó mediante ensayos en la mesa de sacudidas con el fin de lograr un valor de escurrimiento constante de unos 240 mm. En todas las mezclas se empleó arena de cuarzo con partículas de entre 1 y 4 mm.

series M4. The cement/aggregate (c/a) ratios were 1:1 and 1:2 for series M3 and M4, respectively. The binder used was type I 42.5R Portland cement. VISOCRETE3005, a polycarboxylate-based superplasticizer (SP), was added to the systems to enhance workability. SP was adjusted by spread table testing to a constant slump of around 240 mm. Quartz sand with particle size ranging from 1 to 4 mm was used in all mixtures.

Tabla 1 / Table 1
 Composición de los morteros de cemento.
Cement mortar composition.

Mezcla / Mix	Cemento / Cement	Arena / Sand	Agua / Water	SP	PSA / SAP	a/c / w/c	(a/c) _e / (w/c) _e
	(kg/m ³)			(% Peso cemento / (% Cement wt			
M3RF	987.0	987.0	296.1	0.7		0.30	
M3S5	941.2	941.2	327.5	0.7	0.2	0.30	0.05
M3S0	981.3	981.3	292.4	1.5	0.2	0.25	0.05
M4RF	530.5	1591.5	212.2	1.0		0.40	
M4S5	517.0	1550.9	231.6	1.0	0.2	0.40	0.05
M4S0	529.6	1588.9	210.8	1.5	0.2	0.35	0.05

Los PSA empleados en las mezclas (0,2% del peso) con curado interno son una suspensión de copolímeros (6). Según el fabricante, las partículas de PSA tienen diámetros comprendidos entre los 50 y los 250 µm en estado seco y absorben 30 ml de agua por gramo durante el amasado. Se añadió más agua a algunas de las mezclas con PSA para saturar las partículas de PSA, hasta alcanzar una relación agua ocluida/cemento (a/c)_e del 0,05. Todos los componentes se mezclaron en seco, excepto las partículas de PSA, que se habían saturado previamente. Se prepararon probetas para las mediciones de los ensayos mecánicos para cada condición de curado, edad y mezcla. Los morteros se moldearon y consolidaron por vibración según norma EN 196-1. Posteriormente, los moldes se mantuvieron en las condiciones de curado que se detallan a continuación.

Las muestras se curaron a 20 °C con distintas humedades relativas (HR): 30%, 50% y > 95%. Además se realizó un curado con 40 °C de temperatura y un 50% de HR. Para el curado a > 95% de HR, las muestras se sumergieron en un depósito de agua hasta el momento de realizar la medición. Los demás procedimientos de curado se llevaron a cabo en cámaras climáticas. Las mediciones de la resistencia a la tracción y a la compresión se realizaron de conformidad con la norma EN 196-1. Antes de los ensayos mecánicos, se registraron el peso y las dimensiones de cada muestra para poder

The SAP used in the mixes (0.2% wt) was a copolymer suspension (6). According to the manufacturer, the SAP particle diameters ranged from 50 to 250 µm in the dry state and absorbed 30 ml of water per gram during mixing. Additional mixing water was added to some of the SAP-containing mixes to saturate the SAP particles in amounts corresponding to an entrained water/cement ratio (w/c)_e of 0.05. With the exception of the SAP particles, which were saturated prior to mixing, all the components were mixed dry. Specimens were prepared for each curing condition, age and mix for mechanical testing. Mortars were moulded and vibration-compacted as specified in Portuguese and European standard NP EN 196-1 and subsequently stored in the curing conditions specified below.

Specimens were cured at 20 °C at relative humidities of 30, 50 and >95%. A second set of specimens was cured at 40 °C and an RH of 50%. The 95% RH samples were immersed in water until they reached the measuring age. All other specimens were cured in climatic chambers. Tensile and compressive strength were measured as specified in the aforementioned standard, NP EN 196-1. Specimen weight and dimensions were recorded prior to mechanical testing to establish water loss over time. Density was calculated in fresh concrete and in the hardened

medir las pérdidas de agua a lo largo del tiempo. Tanto en el mortero fresco como en el endurecido, la densidad se midió a las mismas edades a las que se midieron las resistencias mecánicas.

Además, se llevaron a cabo estudios calorimétricos y análisis preliminares de la microestructura de pastas equivalentes a la de las mezclas M3RF, M3S5 y M3S0. El seguimiento de la temperatura de las muestras se realizó con un calorímetro cuasi adiabático. La microestructura se analizó mediante microscopía óptica, que, para el estudio de la porosidad superabsorbente, es preferible a la técnica mediante MEB porque ofrece una resolución suficiente en las ampliaciones requeridas para estudiar los poros de PSA.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pérdida de peso y densidad

En la Tabla 2 se presentan las mediciones de la densidad de las mezclas estudiadas. La variación de la densidad es entre un 2 y un 4% inferior en el caso de las muestras con PSA, en todas las condiciones de curado. Esto se debe a las distintas configuraciones iniciales en la microestructura de los morteros.

Tabla 2 / Table 2
Composición de los morteros de cemento.
Mix density by age and relative humidity.

Mezcla / Mix	Densidad / Density (kg/m ³)										
	Sala / Room	HR 95% / 95% RH				HR 50% / 50% RH			HR 30% / 30% RH		
		0 días / 0 days	1 día / 1 day	7 días / 7 days	28 días / 28 days	1 día / 1 day	7 días / 7 days	28 días / 28 days	1 día / 1 day	7 días / 7 days	28 días / 28 days
M3RF	2309	2320	2365	2332	2277	2295	2281	2271	2262	2225	
M3S5	2261	2264	2281	2281	2232	2217	2197	2201	2180	2168	
M3S0	2295	2299	2309	2314	2266	2268	2246	2254	2236	2229	
M4RF	2259	2297	2336	2326	2256	2256	2205	2244	2189	2223	
M4S5	2223	2227	2256	2273	2193	2186	2207	2180	2164	2135	
M4S0	2239	2264	2291	2295	2236	2229	2205	2201	2182	2174	

Nota: todas las mediciones se realizaron a 20 °C. / All measurements taken at 20 °C.

El análisis de los resultados de densidad muestra que la velocidad a la que se produce la pérdida de peso es especialmente importante en el primer día de curado. Las muestras sometidas a curado en agua presentan absorción de agua en los primeros días, pero más tarde tienden a mantener un nivel constante. En otras condiciones de curado en las que no existen fuentes externas de agua, la pérdida de peso se produce desde el primer momento y se estabiliza en las primeras 24 horas de secado.

material at the ages at which strength measurements were taken.

In addition, calorimetric and preliminary microstructural studies were conducted on pastes equivalent to the matrix in mixes M3RF, M3S5 and M3S0. Temperature variations in samples were determined with a quasi-adiabatic calorimeter. Microstructure was analyzed under an optical microscope. This technique was found preferable to SEM to study superabsorbent porosity, for it afforded sufficient resolution at the magnification required to examine the SAP pores.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Weight loss and density

Table 2 shows the density measurements for the mixes studied. The SAP samples exhibited 2 to 4% less variation in density irrespective of the changes in curing conditions. This was the result of differences in the initial mortar microstructure.

The density findings showed that the rate of weight loss was particularly significant in the one-day specimens. While the water-cured samples exhibited early-age water uptake, the rate of inflow tended to flatten thereafter. Under the other curing conditions, where no external source of water was available, weight loss was observed from time zero and steadied within the first 24 hours in a dry atmosphere.

Las mezclas con PSA presentan una menor absorción de agua que la mezcla de referencia, lo que indica una diferencia en la demanda de agua. Resulta curioso que la absorción de agua llegue hasta el tercer día del curado, que corresponde a la transición entre el curado en cámara húmeda y el curado por inmersión. La evolución demuestra que el agua puede penetrar en el sistema por encima del umbral de percolación observado en estudios anteriores sobre pastas de cemento. En los morteros puede llevar más tiempo debido a la zona de transición entre pasta y agregado, y no se garantiza la saturación de todo el volumen.

La presencia de PSA en las muestras de la serie M4 curadas a 50% de HR y 20 °C no afecta a la velocidad de evaporación, por lo que los valores basados en muestras con curado interno no difieren de los de la mezcla de referencia. No se observa la misma tendencia en las muestras curadas a una HR del 30%, ya que en este caso los morteros con PSA muestran claramente una mayor pérdida de agua.

El aumento de la temperatura de curado da lugar a mayores velocidades de evaporación en las muestras con PSA, produciéndose el mayor índice de pérdida de agua (3,75%) a 40 °C. El agua restante sigue siendo mayor que en las muestras de referencia (aproximadamente un 1,20% más de agua a los 3 días de edad). Se observa también que el curado a 40 °C produce una mayor evaporación que el tratamiento a una HR exterior baja.

3.2. Resistencia mecánica

Las Figuras 1-4 muestran la resistencia a la compresión con distintas condiciones de curado a las edades de 1, 3, 7, 21 y 28 días. Las probetas con PSA sometidas a curado en agua presentan pérdidas de resistencia de hasta el 17% en comparación con las de referencia, tanto en el caso de las muestras con agua adicional como en el de aquéllas sin agua adicional. Esto se debe probablemente a las diferencias en la microestructura interna a que da lugar la presencia de los PSA. Las menores densidades de las probetas con PSA indican la existencia de un mayor número de poros debido a la presencia de esferas de PSA saturadas.

El curado de las muestras en condiciones menos favorables da lugar a resultados diferentes. En los casos en que se añadió agua (series M3S5 y M4S5) se produjo una menor reducción de la resistencia. Para la serie M3S5, la resistencia se reduce en un 10% con HR del 50% y del 30%, que son muestras que presentan unos valores de resistencia parecidos. Para la serie M4S5, la resistencia es la misma con una HR del 50%, mientras que con una HR del 30% se observó también una reducción de la resistencia. Resulta curioso que, en este caso, durante

The SAP-containing mixes absorbed less water than the reference, denoting a difference in water demands. Water absorption, interestingly, continued through the third day of curing, when the change from moist to immersion conditions was made. According to these data, water was able to penetrate the system above the percolation threshold reported in previous studies on cement. Penetration may take longer in mortars due to the paste-aggregate interface, whose presence is an obstacle to saturation of the entire volume of material, which cannot be assured.

In series M4 samples cured at 50% RH and 20 °C, the presence of SAP had no effect on the evaporation rate. Consequently, the values for the internally cured samples did not differ from the reference values. In the samples cured at 30% RH, by contrast, the mortars with SAP exhibited clearly higher water loss.

Higher curing temperatures led to higher evaporation rates in the SAP specimens, where the maximum water loss was recorded (3.75%) for the samples cured at 40 °C. Nonetheless, more water remained in the material than in the reference (around 1.20% in the 3-day specimens). Curing at 40 °C also led to a higher evaporation rate than curing at a low RH.

3.2. Mechanical strength

Figures 1 to 4 show the 1-, 3-, 7-, 21- and 28-day compressive strength under different curing conditions. The immersed SAP specimens, mixed with and without additional water, exhibited strength up to 17% lower than in the reference samples, more than likely as a result of the microstructural changes induced by the presence of SAP. The lower density in SAP specimens was indicative of the existence of additional pores as a result of the presence of saturated SAP spheres.

Under harsher curing conditions, particularly where additional water was used (series M3S5 and M4S5), the decline in strength was smaller. In series M3S5, strength was similar for specimens cured at 50% and 30% RH, and 10% lower than in the reference. In the series M4S5 specimens cured at 50% RH, strength was unvaried with respect to the reference, while it declined in the 30% RH samples. Nonetheless, early age strength was similar in the 30% RH SAP samples and the reference. Specimens cured at 40 °C and 50% RH and the samples cured at

las primeras etapas la resistencia de las probetas con PSA fue parecida a la del mortero de referencia. Los resultados del curado a 40 °C con una HR del 50% fueron parecidos a los del curado a 20 °C con una HR del 30%. Estos resultados parecen indicar que, en caso de condiciones de curado adversas, la eficacia de los PSA en el curado interno es notable durante los primeros días. Este efecto se reduce con posterioridad, debido probablemente a la microestructura final de los morteros.

Los resultados obtenidos con los morteros con PSA a los que no se añadió agua (series M3S0 y M4S0) difirieron bastante de aquéllos en los que sí se añadió agua. De hecho, puede observarse un aumento real de la resistencia para todas las condiciones de curado en todas las edades, lo que indica que las partículas de PSA pueden mantener la hidratación del cemento liberando el agua que han absorbido previamente.

20 °C and 30% RH yielded similar results. These findings appear to indicate that under adverse curing conditions, the presence of SAP heightens internal curing efficiency. That effect is dulled at later ages, however, probably due to the microstructure of the end mortar.

The results for SAP mortars where no extra water was added (series M3S0 and M4S0) differed substantially from the above. Here, strength was actually observed to increase in all curing conditions at all ages, providing evidence that SAP particles can sustain cement hydration by yielding their absorbed water.

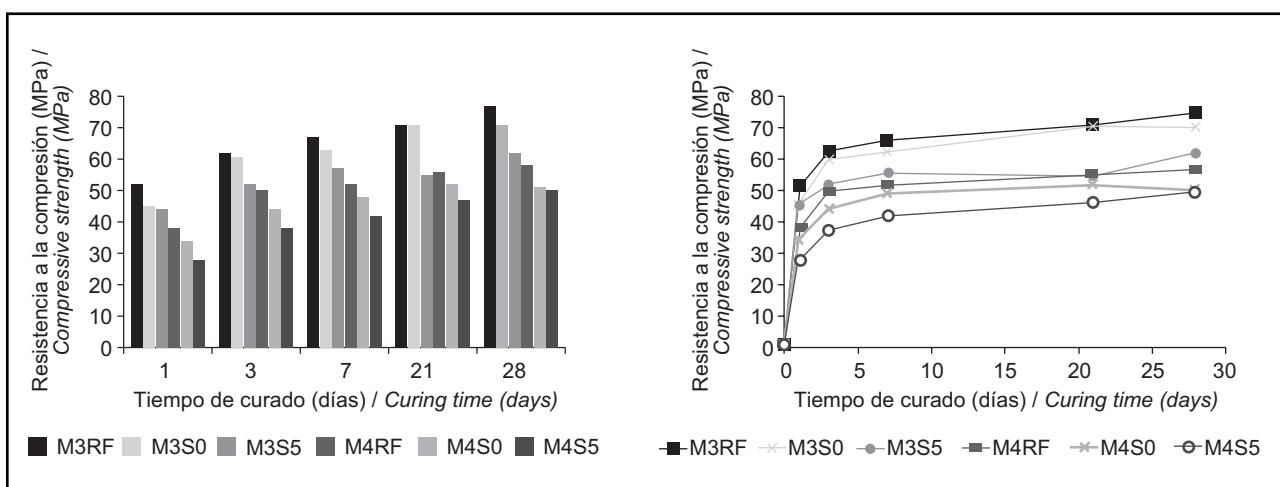


Figura 1. Evolución de la resistencia a la compresión de los morteros curados a 20 °C con una HR > 95%.
Figure 1. Compressive strength vs time for mortars cured at 20 °C and RH > 95%.

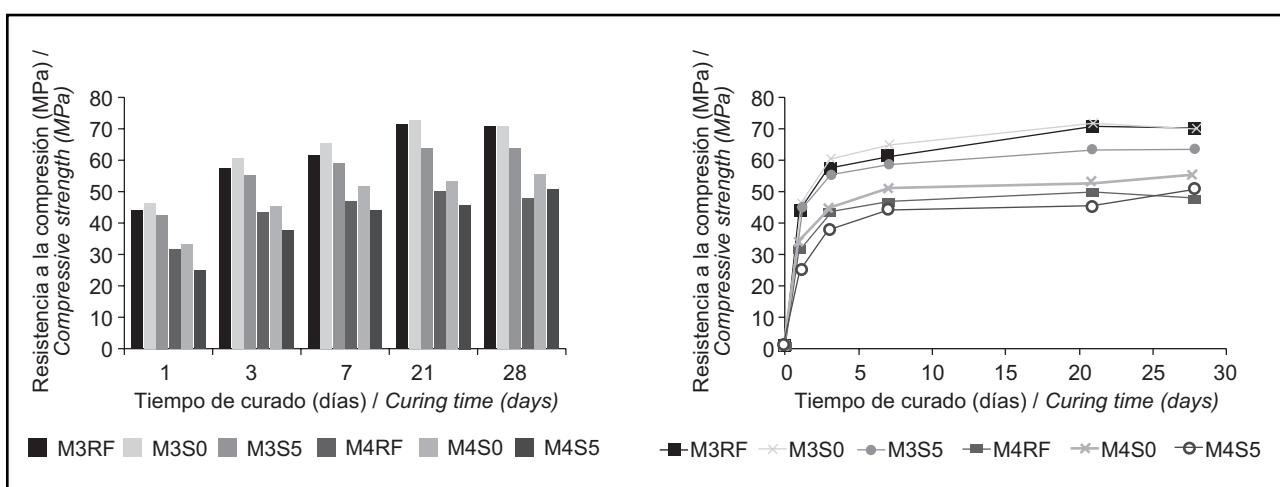


Figura 2. Evolución de la resistencia a la compresión de los morteros curados a 20 °C con una HR del 50%.
Figure 2. Compressive strength vs time for mortars cured at 20 °C and RH = 50%.

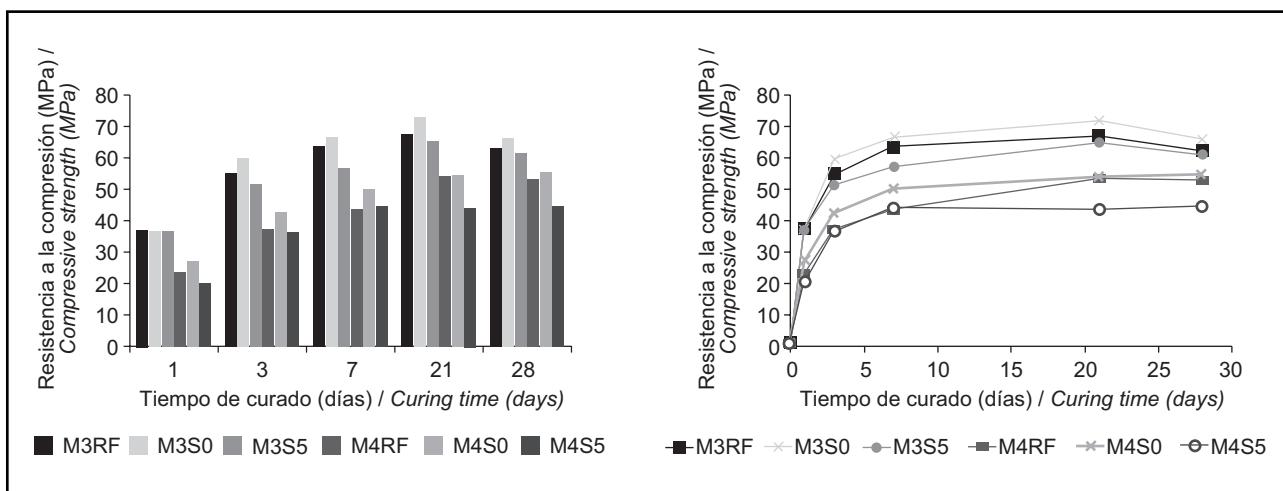


Figura 3. Evolución de la resistencia a la compresión de los morteros curados a 20 °C con una HR del 30%.
 Figure 3. Compressive strength vs time for mortars cured at 20 °C and RH = 30%.

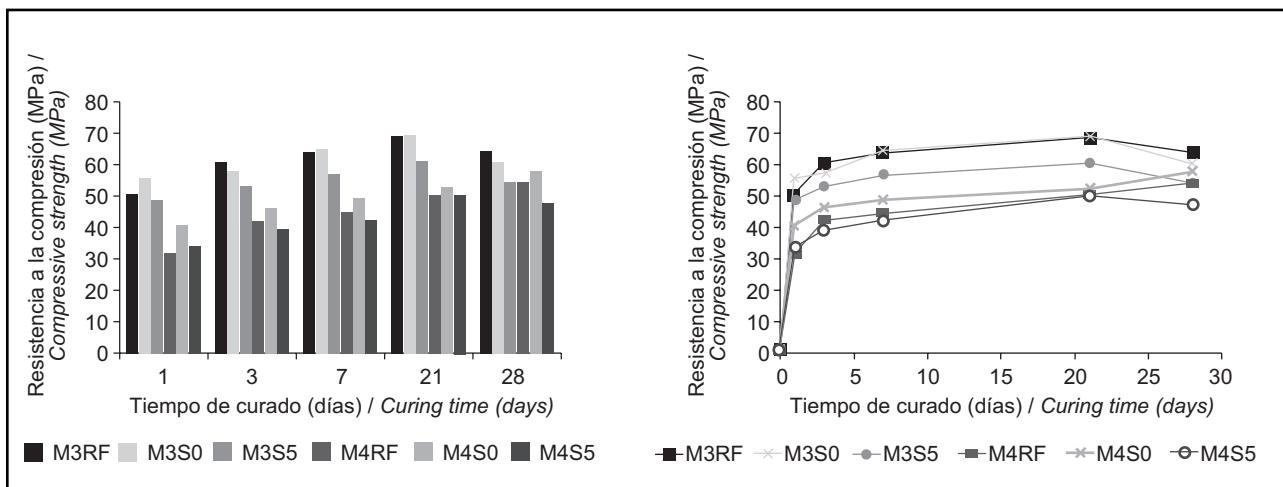


Figura 4. Evolución de la resistencia a la compresión de los morteros curados a 40 °C con una HR del 50%.
 Figure 4. Compressive strength vs time for mortars cured at 40 °C and RH = 50%.

Los resultados de la resistencia a la compresión indican que el curado a 20 °C con una HR del 30% produce unos resultados parecidos a los obtenidos a 40 °C con una HR del 50%.

La pérdida relativa de resistencia en las muestras con PSA puede explicarse asimismo por la humedad interna real que las muestras presentan en el momento del ensayo (Bartlett y MacGregor (9)). Estos autores han observado que la HR interior hace variar la resistencia en un factor de 1,15.

La humedad relativa interior es distinta debido a la presencia de una mayor cantidad de agua libre. Jensen y Hansen (10) observaron que las muestras con PSA alcanzan a los 28 días de curado sellado una HR interior de aproximadamente el 95%, mientras que las probetas

Here also, the compressive strength values were similar for specimens cured at 20 °C and 30% RH on the one hand and at 40 °C and 50% RH on the other.

According to Bartlett and MacGregor (9), the lower strength in SAP-containing specimens compared to the reference may also be explained by the internal moisture in the samples when tested. These authors found that the internal RH affects strength by a factor of 1.15.

The internal relative humidity varied with the amount of free water present. Jensen and Hansen (10) observed that while 28-day samples containing SAP had an internal RH of about 95%, specimens without these polymers self-desiccated to values close to 75%. Further

fabricadas con cemento sin dichas adiciones se desecaron hasta valores próximos al 75%. Es preciso continuar investigando para estudiar este aspecto en sistemas abiertos, ya que las condiciones medioambientales influyen también en la velocidad de la pérdida de humedad.

3.3. Efecto de las condiciones de curado en la resistencia a la compresión

En relación con la influencia de las condiciones de curado (véase la Figura 5) sobre el comportamiento mecánico, resulta interesante que, mientras que en las mezclas de referencia la resistencia es menor en las condiciones de curado más adversas que en el curado en agua, en las mezclas con PSA la resistencia se mantiene en niveles similares para diversos valores de humedad relativa exterior. De hecho, parece que las mezclas con PSA son insensibles a la humedad exterior, en lo que a su resistencia se refiere.

research is required on this effect in open systems, since environmental conditions also play a role in the rate of moisture loss.

3.3. Effect of curing conditions on compressive strength

The findings on the effect of curing conditions on strength (see Figure 5) showed that while in the reference mixes, strength declined with the relative humidity during curing, the SAP specimens were essentially insensitive to this parameter.

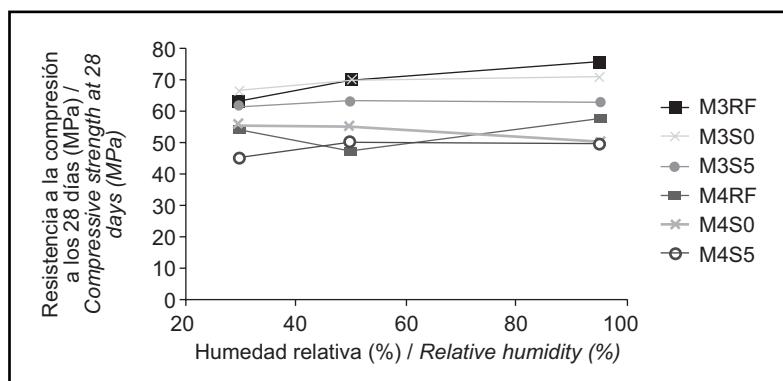


Figura 5. Relación entre resistencia a la compresión y humedad relativa a 20 °C.
Figure 5. Compressive strength vs relative humidity in specimens cured at 20 °C.

El efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia no resulta obvio. Como puede observarse en la figura 6, las mezclas de alta resistencia —correspondiente a la de menor relación agua/cemento— son altamente sensibles a este parámetro. Lo contrario ocurre con las mezclas M4, en la que la resistencia de las probetas curadas a 40 °C es más alta. Esto se debe a la mayor evaporación de agua experimentada hasta los 3 días, lo que indica que la escasez de agua puede limitar la hidratación del cemento muy rápidamente.

El efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia en el caso de los morteros de referencia fue, tal y como se esperaba, beneficioso a edades tempranas y perjudicial a largo plazo. El aumento de la temperatura de curado favorece la hidratación del cemento, pero fomenta asimismo la porosidad del sistema debido a la rápida pérdida de agua hacia el entorno y a la disminución de la HR interior, que afectan a la velocidad de hidratación

The effect of curing temperature on strength followed no obvious pattern. As Figure 6 shows, the high performance mixes (M3), which had a lower water to cement ratio, were very sensitive to temperature. The opposite was found for the M4 mixes, however, where strength was generally higher in the specimens cured at 40 °C. This is related to greater water evaporation in the first 3 days, an indication that a water shortage can curb cement hydration very quickly.

The effect of curing temperature on reference mortar strength was, as expected, beneficial in the early age specimens and detrimental in the 28-day samples. Higher curing temperatures favour cement hydration but also induce porosity in the system due to the rapid water loss to the surroundings. They also reduce internal RH, which affects the rate of hydration and therefore long-term strength. This effect was not observed in the

y, por tanto, a la resistencia a largo plazo. Este efecto no se observa en presencia de partículas de PSA. Es posible que la mayor cantidad de agua presente en la matriz contrarreste la mayor temperatura interior, pero es necesario seguir realizando estudios calorimétricos para investigar esta suposición.

presence of SAP particles, perhaps because the higher water content in the matrix countered the higher internal temperature. This assumption would have to be explored with calorimetric studies.

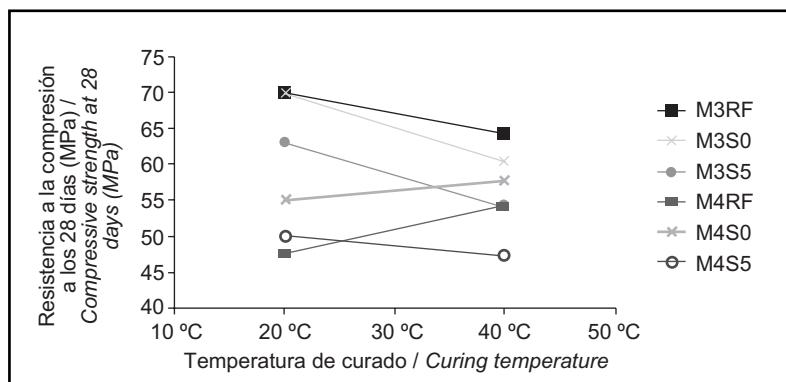


Figura 6. Resistencia a la compresión en función de temperatura de curado con una HR del 50%.
Figure 6. Compressive strength vs temperature in specimens cured at 50% RH.

La evolución de la resistencia a la tracción siguió una tendencia parecida a la hallada en los ensayos de resistencia a la compresión, en especial en el caso de las muestras curadas en agua. Cuando la HR exterior disminuye, la resistencia a la tracción de los morteros con PSA es ligeramente superior, como se observa con HR del 50% y del 30% a los 28 días de edad.

3.4. Hidratación y microestructura: efecto de los polímeros superabsorbentes

Se hizo un seguimiento de la temperatura de las muestras durante los primeros 7 días en condiciones de sellado con el fin de conocer mejor el efecto de la adición de polímeros superabsorbentes sobre el desarrollo de la hidratación. La Figura 7 muestra la evolución de la temperatura de los sistemas estudiados. El calor generado por la hidratación de las mezclas con agua ocluida es inferior al generado por la pasta de cemento sin adiciones, como se observa al comparar las curvas de los sistemas M3RF y M3S5. Esto se debe a que la pasta con agua ocluida se forma con una menor cantidad de cemento y un mayor porcentaje de agua. En el caso de la mezcla M3S0, el pico de temperatura se produce antes que en las mezclas M3RF y M3S5. Queda claro que los polímeros superabsorbentes son capaces de mantener el agua sin disolverse, incluso si la mezcla tiene una relación agua/cemento baja, lo que, en el caso de la mezcla M3S0, dio lugar a un fraguado prematuro y, en consecuencia, a que el periodo de aceleración se produjera antes que en los sistemas con una relación agua/cemento de 0,30.

The variations in tensile strength over time followed a trend similar to the pattern observed for compressive strength, particularly for the samples cured in water. The tensile strength of 28-day SAP mortars cured at 50% and 30% RH rose slightly with declining external RH.

3.4. Hydration and microstructure: effect of superabsorbent polymers

Sample temperature was monitored in sealed specimens for the first 7 days to gain insight into the effect of superabsorbent polymers on hydration shows the temperature variations in the systems studied (Figure 7). A comparison of the system M3RF and M3S5 curves showed that the heat of hydration in the water-entrained mixes was lower than in plain cement paste. The explanation is that the water-entrained paste was prepared with a lower proportion of cement and a higher proportion of water. The peak temperature was reached earlier in M3S0 than in M3RF or M3S5. The superabsorbent polymers were clearly able to hold water without dissolving, even in low water to cement ratio environments. In the case of M3S0, this resulted in earlier setting and consequently the appearance of the acceleration period at shorter times than in the systems with a w/c ratio of 0.30.

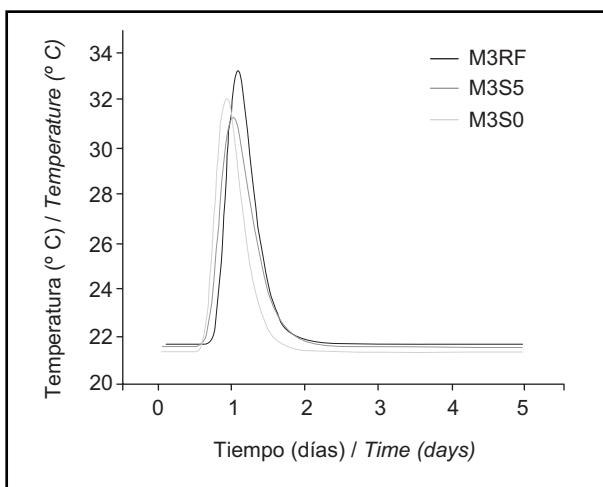


Figura 7. Evolución de la temperatura de los sistemas con agua ocluida en comparación con pasta de cemento ordinaria.
Figure 7. Heat of hydration curves for water-entrained systems and plain cement paste.

La Figura 8 muestra la velocidad de hidratación de las mezclas con agua ocluida en comparación con la pasta de cemento ordinaria, normalizada en función de la temperatura máxima alcanzada en las primeras 48 horas en condiciones de sellado. Tras este periodo no existe variación en las temperaturas de las probetas, lo que indica que ya se ha producido la reacción de hidratación principal. No existe una variación significativa en las velocidades de hidratación entre los sistemas M3RF y M3S5, lo que sugiere que el comportamiento de ambas mezclas durante la hidratación es similar. Es decir, el agua ocluida en la mezcla M3S5 consigue mantener la misma velocidad de hidratación que se observa en la mezcla de referencia. También se observa que la velocidad de hidratación previa al tiempo de fraguado (final del periodo latente) es mayor en el caso del sistema M3S0. Esto puede deberse a su menor relación agua/cemento en comparación con los sistemas M3S5 y M3RF.

The hydration rate of water-entrained mixes, normalized to the peak temperature reached in sealed specimens in the first 48 hours, is compared to the rate in plain cement paste in Figure 8. The absence of variation in specimen temperature after 2 days denoted the end of cement hydration. No significant difference was observed in the hydration rates for systems M3RF and M3S5, suggesting that hydration behaviour was the same in both. In other words, thanks to the entrained water, M3S5 was able to maintain the same hydration rate as the reference. The figure also shows that the rate of hydration prior to setting (end of the dormant period) was higher in system M3S0, which may have been due to its lower water to cement ratio than in M3S5 or M3RF.

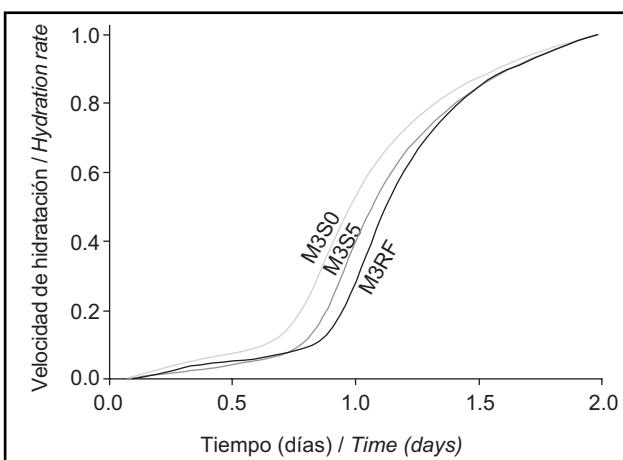


Figura 8. Velocidad de hidratación de las mezclas con agua ocluida en comparación con la mezcla de referencia. La evolución de la temperatura se normalizó en función de la temperatura máxima alcanzada a las 48 horas. Tras este periodo, la temperatura de las muestras es prácticamente la misma que la temperatura ambiente.
Figure 8. Rate of hydration in water-entrained and reference mixes. Variations in temperature were normalized to the 48-hour peak temperature. After 2 days, the temperature in samples was approximately equal to the laboratory temperature.

Conviene mencionar en relación con las condiciones de curado de estas muestras en concreto que, puesto que la evolución de la temperatura se midió en condiciones de sellado, las muestras no sufrieron la pérdida de agua que provocan los gradientes de humedad existentes entre la masa y el entorno. Por tanto, estos resultados debieran considerarse meramente indicativos de la hidratación que se produce en las muestras de los sistemas abiertos. En principio, los sistemas que presentaron una pérdida de peso durante las primeras 24 horas mostrarían probablemente máximos de temperatura antes de lo indicado en la Figura 7.

En la Figura 9 se muestra la microestructura de la fracción de pasta equivalente a la matriz de los sistemas M3RF y M3SO. La principal diferencia entre estos sistemas consiste en su estructura porosa. La mayor porosidad hallada en la mezcla con agua ocluida es coherente con la pérdida de resistencia hallada en las muestras curadas en agua.

A few words are in order with respect to the curing conditions for these specimens in particular. Having been sealed for temperature readings, they were not subject to water loss due to the moisture gradients between the cement and the environment. Therefore, the findings discussed here should be viewed as a mere approximation to hydration in open systems. Initially, for instance, in the systems exhibiting weight loss in the first 24 hours, temperature would probably peak earlier than shown in Figure 7.

The microstructures of pastes equivalent to the matrix in mortar systems M3RF and M3SO are compared in Figure 9. These systems differ essentially in their pore structure: the greater porosity in the water-entrained mix is consistent with the strength loss in the water-cured specimens.

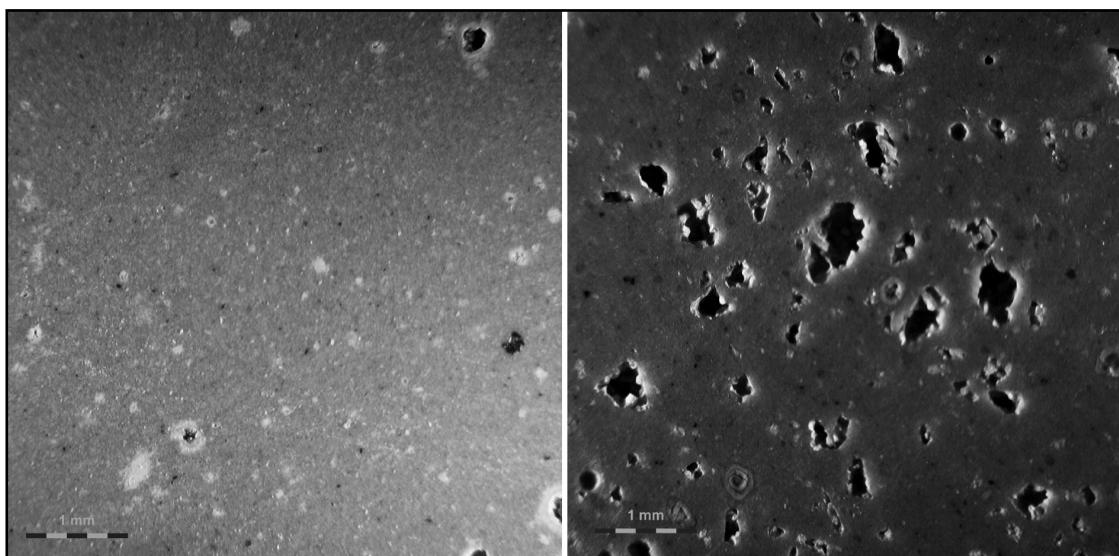


Figura 9. Microestructuras de pasta de cemento ordinaria (izquierda) y pasta de cemento curada en agua (derecha). Las imágenes equivalen a 5,60 x 5,60 mm de hormigón.

Figure 9. Microstructure of plain (left) and water-entrained cement paste (right). Photo size: 5.60 x 5.60 mm.

No obstante, también se observa que el tono gris de la imagen correspondiente a la mezcla con agua ocluida es más oscuro que el de la pasta de cemento ordinaria. Esto sugiere que el potencial de hidratación de los sistemas con agua ocluida puede ampliarse en comparación con el de la probeta no curada, ya que la humedad interior podría permitir una hidratación del cemento continuada. Un análisis más exhaustivo de la resistencia de los sistemas estudiados en condiciones de sellado podría permitir relacionarlos con los datos sobre porosidad, en función de la dosificación de los polímeros superabsorbentes.

The water-entrained mix also exhibited a darker grey tone than the plain cement paste. This finding infers that the hydration potential of the water-entrained systems may be higher than in the non-SAP specimen, due to the presence of internal moisture that could support further cement hydration. A more detailed examination may lead to the definition of a correlation between the strength properties of sealed specimens and porosity, depending on superabsorbent polymer dosage.

4. CONCLUSIONES

Los polímeros superabsorbentes (PSA) pueden aplicarse de forma eficaz a los hormigones de cemento en condiciones de curado adversas, ya que mantienen las propiedades mecánicas de éstos liberando agua en función de las necesidades. Este resultado debiera alentar más estudios.

Los PSA resultaron especialmente sensibles a la temperatura de curado. La temperatura exterior provoca una pérdida de agua 1,5 veces mayor en los morteros con PSA. Las muestras con PSA presentan menor resistencia cuando se curan a 40 °C que cuando el tratamiento es a temperatura ambiente y una HR del 30%. Los valores iniciales de resistencia obtenidos con una temperatura de curado de 40 °C indican que la presencia de PSA puede afectar a la temperatura interior. Es necesario seguir investigando para conocer las condiciones interiores del hormigón con agua ocluida y sus características, principalmente en los sistemas sellados.

4. CONCLUSIONS

Superabsorbent polymers (SAP) added to cement-based mortars in adverse curing conditions can maintain the mechanical properties of the mortars by yielding water on demand. These are promising results that should drive further research.

SAPs are particularly sensitive to curing temperature. The environmental temperature induces 1.5 times more water loss in systems with than without SAP. SAP samples cured at a higher temperature (40 °C) exhibit lower strength than when cured at low humidity (30% RH). The early age strength values in specimens cured at 40 °C indicate that the presence of super absorbent polymers can affect the internal temperature. Further research is required to determine the internal conditions of water-entrained concrete and its characteristics, primarily in sealed systems.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Meeks K. W.; Carino N.: "Curing of High-Performance Concrete: Report of the State-of-the-Art", *National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6295* (1999).
- (2) Ortiz Lozano, J.; Aguado de Cea, A.; Agulló Fité, L.; García Vicente, T., & Zermeño de León, M.: "Experimental study of the effect of temperature on the strength of ready-mixed concrete". *Theory. Mater. Construcc.* 58 (291) (2008), 7-22.
- (3) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: "Autogeneous Deformation and RH-Change in Perspective", *Cem. Concr. Res.* 31-12 (2001), 1859-1865.
- (4) Bentz, D. P.: "Capillary Porosity Depreciation/Repercussion in Hydrating Cement Pastes Via Low-Temperature Calorimetry Measurements and CEMHYD3D Modeling", *J. Am. Ceram. Soc.*, 89-8 (2006), 2606-2611.
- (5) Bentz, D. P. and Jensen, O. M.: "Mitigation strategies for autogeneous shrinkage cracking", *Cem. Concr. Composites*, vol. 26-6 (2004), 677-685.
- (6) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: "Water-entrained cement-based materials – I. Principles and theoretical background", *Cem. Concr. Res.* 31-4 (2001), 647-654.
- (7) Lura, P. *et al.*: "Compressive strength of cement pastes and mortars with superabsorbent polymers", Int. RILEM Conference on Volume Changes of hardening concrete: Testing and Mitigation, 20-23 August 2006, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- (8) Mönnig, S. and Reinhardt, H. W.: "Results of a comparative study of the shrinkage behaviour of Concrete and Mortar mixtures with different internal curing sources". Int. RILEM Conference on Volume Changes of hardening concrete: Testing and Mitigation, 20-23 August 2006, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- (9) Bartlett, F. M., Macgregor, J. G.: "Cores from high-performance concrete beams", *ACI Mater. J.*, 91-6 (1994), 567-576.
- (10) Jensen, O. M. and Hansen, P. F.: "Water-entrained cement-based materials – II. Experimental observations", *Cem. Concr. Res.* 32-6 (2002), 973-978.

* * *