

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Capacidad de autosanación de mortero con aditivos cristalinos mediante absorción capilar

Marta Roig-Flores ^(1,2), Chrysoula Litina ⁽³⁾, Abir Al-Tabbaa ⁽³⁾ y Pedro Serna ⁽¹⁾

⁽¹⁾ ICITECH Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València, España.

⁽²⁾ Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España.

⁽³⁾ Department of Engineering, University of Cambridge, United Kingdom.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5831>

RESUMEN

En las estructuras de hormigón armado, las fisuras suponen un potencial punto de entrada para los agentes agresivos. Los aditivos cristalinos son un tipo de aditivo reductor de la permeabilidad, considerados promotores de la autosanación en hormigón. El objetivo de este trabajo es analizar la mejora de durabilidad producida al utilizar aditivos cristalinos en mortero en términos de absorción capilar y cierre de fisuras. Las probetas se prefisuran a la edad de 7 días mediante flexión a tres puntos, para conseguir fisuras entre 0.25 y 0.40 mm. Una vez fisuradas, se almacenan durante 28 días en diferentes condiciones de sanado: inmersión en agua, cámara húmeda y ciclos de inmersión/cámara húmeda. La capacidad de autosanación se evalúa mediante la absorción capilar exclusivamente en la zona de la fisura, aislando el resto de la probeta. Además, se analiza la evolución del cierre visual de las fisuras a distintos tiempos utilizando microscopio óptico, y el efecto producido por estos aditivos en la resistencia e hidratación de la mezcla. Los resultados muestran la necesidad de contacto directo con agua para las reacciones de autosanado y que la mayor parte de la reacción se produce durante las dos primeras semanas de sanado.

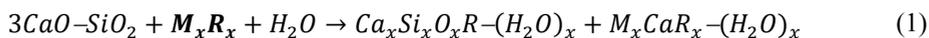
PALABRAS CLAVE: autosanado, mortero, aditivos cristalinos, absorción, fisuras

1.- INTRODUCCIÓN

En las estructuras de hormigón armado, las fisuras son un potencial punto de entrada para los agentes agresivos, que pueden activar o acelerar distintos procesos de degradación. Generalmente, las fisuras menores a 0,40 mm no se suelen considerar relevantes desde un punto de vista estructural, no obstante, su aparición produce pérdidas de propiedades por aumentos de permeabilidad, absorción, y difusión de cloruros. Los materiales autosanables son materiales con la capacidad de reparar sus propios daños de forma autónoma o con un estímulo externo mínimo [1]. Las estructuras construidas con materiales autosanables se

beneficiarían de una vida útil incrementada y de costes de mantenimiento disminuidos debido a este sanado autónomo de pequeños daños.

El hormigón posee un mecanismo de autosanación natural [1], denominado sanación autógena, que consiste en el cierre de las microfisuras por actuación de la hidratación continuada de las partículas de cemento anhidro y la formación de carbonato cálcico principalmente. La sanación autógena tiene una efectividad limitada y resulta difícil de predecir, por lo que generalmente no se considera en el diseño del hormigón. Los aditivos cristalinos (CA) son un tipo de aditivo reductor de la permeabilidad con propiedades hidrofílicas [2], que, además, están considerados agentes promotores de la autosanación en hormigón, sellando fisuras capilares al ser activados por la humedad. Estos aditivos se añaden directamente en la matriz del hormigón durante el mezclado. Existe un cierto número de productos comerciales que encaja con las características de estos agentes, pero su composición y formulación se mantienen confidenciales. Según el informe del comité 212 del ACI [2], los aditivos cristalinos reaccionan con el silicato tricálcico para formar geles CSH modificados, y un precipitado derivado del calcio (ambos según el tipo de promotor cristalino), ver Ecuación (1).



Sin embargo, hay otros estudios que indican que estos aditivos reaccionan con la portlandita [3, 4]. Además, algunas publicaciones muestran presencias de diferentes óxidos en las composiciones, como trióxido de azufre [3] u óxido de sodio [5]. Esto apoya la idea de que bajo la categoría de aditivos cristalinos se están englobando aditivos con diferentes tipos de comportamiento.

Varios investigadores han estudiado el comportamiento de estos aditivos en mortero y hormigón. Respecto al cierre visual de la fisura en morteros [5], el aditivo mejora los resultados en el caso de prefisuras jóvenes (3 días) y pequeñas (< 100 μm), pero no para prefisuras realizadas a los 28 días. En otros estudios se han obtenido sellados completos para fisuras de 150 μm producidas a la edad de 28 días, tras un sanado de 28 días bajo el agua [6], e incluso para fisuras de 150-200 μm [7], pero sin mejoras claras en comparación con las probetas de control. En cuanto a recuperación de la impermeabilidad, a bajas presiones y edades de prefisuración de 28 días estos aditivos no parecen mejorar la sanación [6], mientras que en probetas de hormigón prefisuradas a los 2-3 días, y sometidas a altas presiones [7, 8], los aditivos cristalinos proporcionarían una respuesta más estable que la sanación autógena. En cuanto a la recuperación de resistencias mecánicas, los resultados obtenidos en la literatura reportan mejoras marginales [9] o pequeñas [10]. Los diferentes estudios muestran resultados coincidentes respecto a la necesidad de estos aditivos de estar en contacto directo con agua para activarse, obteniendo las respuestas óptimas al dejar las probetas sanando en inmersión de agua [7, 8], aunque en algunos casos la combinación de ciclos humedad/secado ha resultado la exposición óptima [9].

Los ensayos de absorción de agua evalúan el movimiento del agua a través de los poros y capilares. Algunos autores han adaptado los ensayos tradicionales para hormigón fisurado, aislando la zona de la fisura para evaluar esta propiedad en la zona de interés [11, 12], ya

sea con una pintura impermeable o recubrimiento de silicona, de modo que se garantice flujo unidireccional en la probeta. Se ha demostrado que probetas con mayor número de fisuras obtenían mayores valores de sorptividad, y que con el envejecimiento este parámetro se ve reducido [13].

En este trabajo se utilizan técnicas de evaluación de absorción capilar a morteros con y sin aditivos cristalinos, siguiendo el proceso descrito en estudios anteriores [14, 15], así como medición del cierre de fisura y el estudio en otras propiedades del mortero, incluyendo resistencia a compresión, fluidez e hidratación.

2.- MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1.- Composición de la mezcla

El cemento utilizado fue un cemento Portland CEM I 52.5 R, de Hanson Heidelberg Cement Group. Se utilizó árido fino silíceo con un tamaño máximo de grano de 4 mm. El agua utilizada para los ensayos fue agua corriente. La composición utilizada para los morteros sigue la norma EN 196. El aditivo cristalino utilizado se añadió en un 4% respecto al peso de cemento, en sustitución del árido fino (Tabla 1). La mezcla con aditivo resultó notablemente más fluida que la de control, pero no se añadió aditivo fluidificante para mantener una composición comparable en ambos casos. La menor fluidez de la mezcla de control se compensó con un compactado más enérgico mediante vibrado.

Tabla 1. Composición de los morteros utilizados

(gr/l)	Control	CA
Cemento	450	450
Agua	225	225
Árido fino	1350	1332
Aditivo cristalino	-	18

Para el mezclado se utilizó una amasadora Hobart de capacidad de 12 litros. El proceso de amasado seguido consiste en: 1) mezclar arena, cemento y el aditivo cristalino hasta que tengan un aspecto uniforme, alrededor de dos minutos, 2) añadir un tercio del agua y mezclar a velocidad lenta durante un minuto, 3) añadir el resto del agua durante un minuto mezclando a velocidad lenta, 4) velocidad alta durante un minuto, 5) se para la amasadora y se recuperan los restos de las paredes de la amasadora, y 6) amasado a velocidad lenta durante un minuto. Las probetas se desmoldaron a las 24 horas en el grupo de control y a los 3 días en el grupo con aditivos cristalinos, ya que retrasaron notablemente el fraguado. Tras el desmoldado se almacenaron en cámara de humedad a 20°C y 100% de humedad relativa. Se prepararon probetas prismáticas 40×40×160 mm³ reforzadas con un alambre de acero para la evaluación del sanado y cubos de dimensiones 40×40×40 mm³ para cuantificar la adquisición de resistencias a compresión de ambas mezclas. Para cada grupo de análisis se han ensayado un mínimo de 3 probetas para tener resultados representativos.

2.2.- Metodología para la evaluación del autosanado

El método de prefisuración utilizado es el ensayo a flexión en tres puntos. Previamente al ensayo, las probetas prismáticas se entallan para forzar la localización de la fisura en la sección central. Se utilizó una galga extensométrica tipo clip de Instron para medir la abertura de fisura durante el ensayo. La velocidad de carga utilizada fue de 0.25 mm/min. Todas las probetas se prefisuraron a la edad de 7 días y obtuvieron picos de carga similares.

El autosanado se ha evaluado mediante el cierre visual de las fisuras y ensayos de absorción capilar. Estos ensayos se han realizado después del proceso de prefisuración, es decir, a los 7 días antes de ser introducidos en los ambientes de sanación, a diferentes edades tras el inicio del proceso de sanado (en el caso del cierre de fisuras) y al finalizar los 28 días de sanado (para ambos ensayos).

Para el estudio del cierre visual de las fisuras, se utilizó un microscopio Leica S6D con cámara DFC 295 para realizar fotografías en distintos momentos del proceso de sanado. Se tomaron fotos después de 0, 7, 14 y 28 días de sanado, y en 3 puntos definidos, siguiendo el esquema de la Figura 1. Las fisuras obtenidas varían entre 0.25 mm y 0.50 mm.

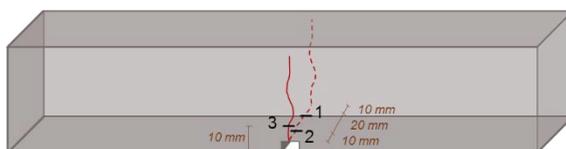


Figura 1. Puntos de medida del cierre de fisuras en las probetas de mortero

Para la evaluación mediante absorción capilar se han utilizado probetas de referencia sin fisurar que acompañan en todo momento a las probetas fisuradas y sanadas, de modo que todas ellas tienen una misma historia de humedad interna. Esto permitirá normalizar los resultados utilizando como referencia los valores obtenidos en dichas probetas de acompañamiento. Para preparar las probetas para el ensayo, se cubren las partes inferiores y laterales de las probetas con cinta adhesiva de aluminio, de modo que el agua sólo entre por el área de la entalla y la fisura. Este aislamiento se realiza tanto en las probetas fisuradas como en las de referencia, de modo que la única diferencia entre ambos grupos sea la fisura. Una vez aisladas, se pesa cada probeta (tiempo 0), y se colocan en recipientes con una pequeña capa de agua, en contacto con la cara inferior de la probeta, pero sin sumergirla, de modo que el agua se adsorba en la entalla y la fisura (Figura 2). Durante el ensayo se realizan medidas consecutivas del peso de la probeta en tiempos crecientes durante un tiempo total de 4 horas y 16 minutos. Antes de cada medida de peso se seca levemente la superficie de la probeta con un paño. Antes del ensayo final de absorción capilar, todas las probetas se dejaron secar en ambiente de laboratorio durante 1 día.

El volumen absorbido acumulado se calcula como el cambio en masa dividido por el área transversal de la probeta y la densidad del agua (Ec. 2). Tras este cálculo, se representa el volumen absorbido acumulado frente a la raíz del tiempo, y se calcula el índice de sorptividad como la pendiente de la regresión lineal.

$$i \text{ (mm)} = \frac{M_t \text{ (gr)} - M_0 \text{ (gr)}}{\rho_{\text{agua}} \left(\frac{\text{gr}}{\text{mm}^3} \right) * \text{Área}_{\text{entalla}} \text{ (mm}^2\text{)}} = \frac{M_t - M_0}{0.000998 * (5 * 40)} \quad (2)$$

La sorptividad debida a la fisura se ha calculado como la resta entre la sorptividad de las probetas fisuradas y la media obtenida para las probetas de referencia.

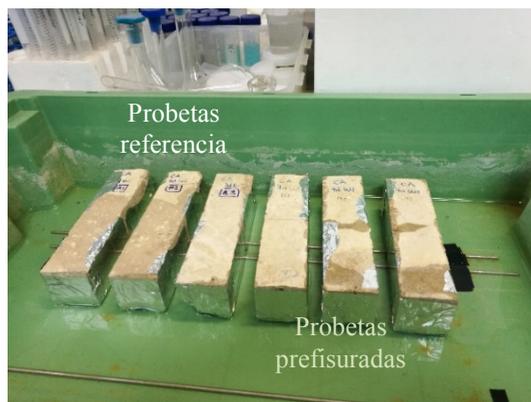


Figura 2. Ensayo de absorción capilar en probetas de referencia y probetas fisuradas

Se han comparado tres ambientes de sanado para las dos mezclas, con el objetivo de discernir el efecto de la cantidad de agua accesible a la probeta. Las tres condiciones han sido inmersión en agua, cámara de humedad (a 20°C y 100% de humedad relativa) y ciclos humedad secado, consistentes en 1 semana en inmersión y 1 semana en cámara de humedad. En todos los casos el tiempo total de sanado es de 28 días. Las probetas en las condiciones de sanado se han colocado de modo que la fisura se encuentre en posición sin carga, con la entalla orientada verticalmente. En todo momento se ha mantenido el mismo criterio de orientación en los puntos señalados para las medidas de cierre de fisuras: los puntos “3” se han mantenido en la cara superior, mientras que los puntos “1” y “2” se han dejado en posición lateral.

2.3.- Otros ensayos realizados

Además de los ensayos realizados para evaluar el autosanado, se ha analizado el efecto del aditivo cristalino en la consistencia (EN 1015-3), resistencia a compresión (EN 196-1) aplicado a cubos de 40 mm de lado, y en los procesos de hidratación. La resistencia a compresión se ensayó a las edades de 2, 3, 4, 7 y 28 días para la modificación en la adquisición de resistencias producida por el aditivo cristalino.

Los procesos de hidratación se analizaron durante 72 horas mediante calorimetría isoterma en un equipo I-Cal 2000 HPC en conformidad con la norma ASTM C1679. En este ensayo se analizaron morteros con 0, 1, 2 y 4% del aditivo cristalino.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Resultados de autosanado

El cierre visual de las fisuras, se ha analizado en diferentes posiciones. Generalmente, las fisuras en la cara lateral permanecieron abiertas, mientras que las fisuras superiores presentaron precipitados distribuidos homogéneamente por toda la superficie. Las fisuras analizadas en la cara inferior, originalmente no consideradas en el estudio, muestran formación de estalactitas y resultaron las que obtuvieron mayores cierres. Esto pone de manifiesto la necesidad de especificar la posición de la fisura en el ambiente de sanado.

Las probetas sanadas en cámara húmeda no mostraron precipitados, mientras aquellas que sanaron en inmersión de agua de forma continua o intermitente (en el caso de los ciclos) presentaron precipitados, especialmente en el grupo con aditivos cristalinos (Figura 3), obteniendo en varios casos precipitados con espesores hasta 0.25 mm tras 28 días de sanado. En ningún caso se obtuvo un cierre completo de la fisura.

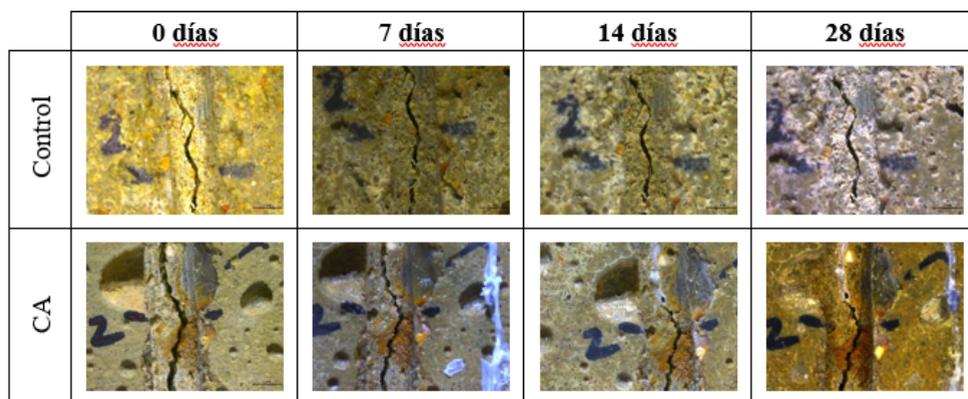


Figura 3. Ensayo de absorción capilar en probetas de referencia y probetas fisuradas

Estos resultados contrastan con los obtenidos por estudios anteriores con el mismo aditivo, en los que la fisura se mantuvo en posición lateral durante el sanado, y los resultados de cierre de fisura resultaron superiores para valores similares de abertura de fisura [7]. La principal diferencia entre ambos estudios se debe a la edad de prefisuración, ya que, aunque el tiempo de sanado es mayor, el sanado se produce más notablemente durante los 14 días de sanado [6, 16]. Por esto, la sanación autógena y el aditivo estudiado verían mermada su capacidad para fisuras producidas a los 7 o más días de edad de la mezcla.

Respecto a los ensayos de absorción capilar, la Figura 4 muestra que todos los grupos obtuvieron de media una sorptividad media inicial alrededor de $0.15 \text{ mm} \times \text{min}^{-1/2}$, excepto el grupo de control en inmersión de agua (CTRL-WI), que obtuvo un resultado ligeramente superior y el de control en cámara húmeda ligeramente inferior (CTRL-HC). Esto indicaría un daño inicial similar en todos los grupos estudiados. Según los resultados, el grupo con mejor resultado se corresponde con el grupo con aditivos cristalinos en inmersión en agua,

seguido de la misma mezcla sanada en ciclos y del grupo de control sanada en inmersión en agua. Al haber eliminado el efecto de la absorción de agua por el área analizada utilizando las probetas de referencia sin fisurar, estas diferencias de resultados se deberían a la formación de precipitados en el interior de la fisura o a una densificación de la matriz en la zona contigua a la fisura.

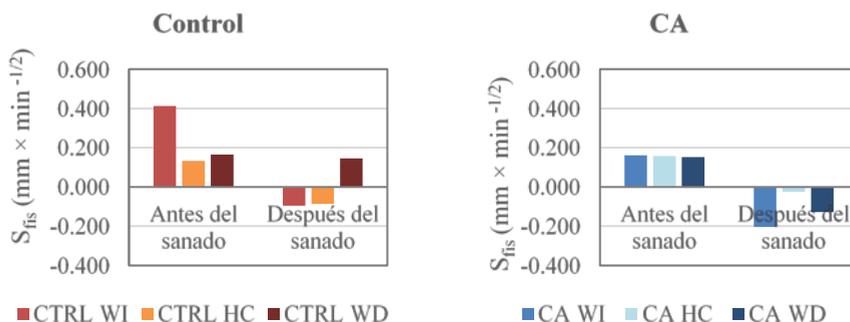


Figura 4. Resultados promedio de sorptividad de la fisura para cada grupo

3.2.- Otros ensayos

El ensayo de consistencia indica un incremento de la fluidez al utilizar el aditivo cristalino, pasando de consistencias secas (diámetros ~100 mm) a plásticas (diámetros ~155 mm). Los resultados de resistencia a compresión y de calorimetría indican un claro retraso de la hidratación y adquisición de resistencias al utilizar el aditivo (Figuras 5 y 6).

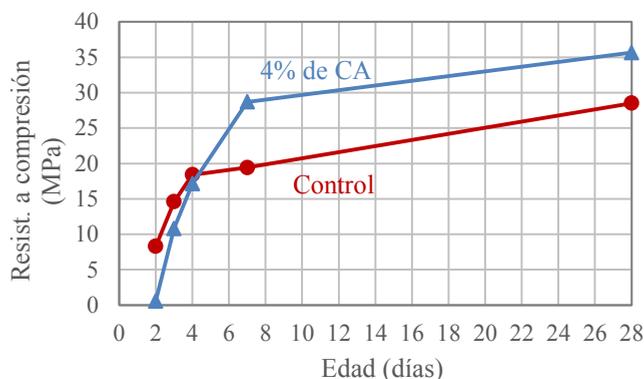


Figura 5. Resultados promedio de resistencia a compresión para distintas edades

La Figura 5 muestra que la velocidad de adquisición de resistencias es diferente hasta los 7 días. La mezcla con el aditivo cristalino estudiado obtiene resistencias a compresión menores hasta los 4 días de edad y, a partir de esa edad, obtiene mejores resistencias, llegando a una mejora del 25% a los 28 días. Sin embargo, esto se ha conseguido a costa de retrasar notablemente la hidratación (Figura 6), con un pico de actividad térmica retrasado

hasta 18 horas en el caso de añadir 4% del aditivo. Los resultados de calorimetría isoterma muestran un periodo latente de menor energía térmica, indicando una hidratación más lenta. Además, el pico de actividad se retrasa 8, 12 y 18 horas para los contenidos de 1, 2 y 4% de aditivo, respectivamente. Tras 30 horas la muestra de control tiene menor actividad que las muestras con aditivos. Respecto a las curvas de energía, relacionadas con la obtención de resistencias, los resultados con 1 y 2% de aditivo son similares a la curva de control, mientras que con 4% la curva sigue una tendencia muy distinta, empieza con valores menores al control, pero a partir de las 24 horas aumenta su pendiente. Aunque el ensayo sólo se realizó durante 72 horas, estos resultados sugieren que tras 4 días ambas curvas interseccionarían si la tendencia se mantiene. Esto sería coherente con los resultados obtenidos en cuanto a resistencias a compresión.

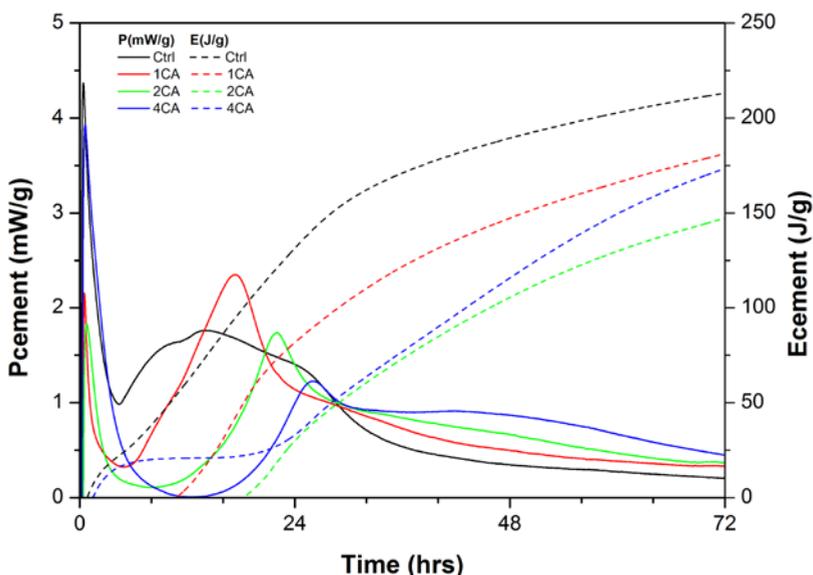


Figura 6. Resultados de calorimetría para la mezcla referencia (Ctrl) y distintos contenidos de aditivo cristalino (1%, 2% y 4% de CA)

4.- CONCLUSIONES

En este estudio se ha analizado la efectividad de un aditivo cristalino para mejorar las propiedades de autosanación de un mortero, en términos de cierre visual y absorción capilar. Además, se han estudiado los efectos de dicho aditivo en la hidratación y adquisición de resistencias. Las conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

- Un contenido del 4% del aditivo cristalino estudiado aumenta la trabajabilidad y retrasa la hidratación y adquisición de resistencias hasta los 3-4 días. A partir de ese momento incrementa la resistencia.
- Respecto al cierre de fisuras, se ha propuesto la necesidad de especificar la orientación de la fisura en el ambiente de sanado, ya que es un parámetro con una gran influencia

en el crecimiento de cristales y la formación de precipitados. Además, se ha comprobado que para fisuras producidas a partir de los 7 días de edad no se producen sellados completos en 28 días de sanado, para tamaños de fisura entre 0.25 y 0.50 mm. Los mejores resultados se han obtenido para el grupo con aditivos sanado en inmersión de agua, con precipitados de espesores máximos de 0.25 mm.

- En cuanto al análisis de sorptividad, los mejores se han obtenido nuevamente para el grupo con aditivos cristalinos sanados en inmersión de agua. Las diferencias en humedad interna entre los distintos grupos se han normalizado mediante el uso de probetas de acompañamiento sin fisurar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las ayudas otorgadas por la acción COST CA 15202, *Self-healing As preventive Repair of CONcrete Structures* (SARCOS) y el programa Erasmus+, así como a la empresa Sika AG por el suministro de materiales.

REFERENCIAS

- [1] De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N. and Schlangen, E., 'Self-healing Phenomena in Cement-based Materials: State-of-the-art', Report of RILEM Technical Committee 221-SHC (Springer, 2013).
- [2] ACI Committee 212, 'Report on chemical admixtures for concrete' American Concrete Institute (ACI), Chapter 15, Report ACI 212-3R-10 (2010) 46-50.
- [3] Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Koenders, E., 'Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials', *Construction and Building Materials* **42** (2013) 217-224.
- [4] Ferrara, L., Krelani V. and Moretti, F., 'On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing', *Smart Materials and Structures* **25** (2016) 084002.
- [5] Jaroenratanapirom, D. and Sahamitmongkol, R., 'Self-Crack Closing Ability of Mortar with Different Additives' *Journal of Metals, Materials and Minerals* **21** (1) (2011) 9-17.
- [6] Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Koenders, E.A.B., 'Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive', *Cement & Concrete Composites* **34** (2012) 566-574.
- [7] Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P. and Ferrara, L., 'Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests', *Construction and Building Materials* **114** (2016) 447-457.

- [8] Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P. and Ferrara, L., 'Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments', *Construction and Building Materials* **86** (2015) 1-11.
- [9] Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Koenders, E., 'Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials', *Construction and Building Materials* **42** (2013) 217–224.
- [10] Ferrara, L., Krelani, V. and Carsana, M., 'A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures', *Construction and Building Materials* **68** (2014) 535-551.
- [11] Wang, J.Y., de Belie, N. and Verstraete, W., 'Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete', *J Ind Microbiol Biotechnol* **39** (2012) 567-577.
- [12] Zhang, Z., Qian, S. and Ma, H., 'Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash', *Construction and Building Materials* **52** (2014) 17-23.
- [13] Alyousif, A., Lachemi, M., Yildirim, G. and Şahmaran, M., 'Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites', *Journal of Advanced Concrete Technology* **13** (3) (2015) 112-123.
- [14] Alghamri, R., Kanellopoulos, A. and Al-Tabbaa, A., 'Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete', *Construction and Building Materials* **124** (2016) 910-921.
- [15] Giannaros, P., Kanellopoulos, A. and Al-Tabbaa, A., 'Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate', *Smart Materials and Structures* **25** (2016) 1-12.
- [16] Edvardsen, C., 'Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete', *ACI Materials Journal* **96** (4) (1999) 448-454.