

Repetitividad de la capacidad autorreparante de hormigones reforzados con fibras con aditivo cristalino

E. Cuenca ⁽¹⁾, A. Tejedor ⁽¹⁾ y L. Ferrara ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano,
Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milan, Italy

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5176>

RESUMEN

El presente artículo analiza la repetitividad de la capacidad autorreparante del hormigón reforzado con fibras analizando la influencia del aditivo cristalino en la autorreparación de las fisuras. Se ha analizado la respuesta a tracción en probetas cuadradas de 150x150x50mm mediante el “Double Edge Wedge Splitting (DEWS)” test. La configuración del ensayo y las entallas de las probetas permiten fijar el plano de rotura, y por consiguiente la orientación de las fibras. Para su autorreparación, las probetas han sido expuestas a las siguientes condiciones: inmersión en agua, ambiente externo (aire) y ciclos aire/agua. Inicialmente, las probetas fueron prefisuradas hasta una abertura de fisura de 0.25mm, posteriormente se sometieron a las distintas condiciones de exposición durante 1, 3 y 6 meses. Al final de cada periodo, las probetas fueron nuevamente fisuradas para volver a ser sometidas a las distintas condiciones de exposición durante 1 o dos meses hasta completar un año. Se ha analizado el índice de cierre de la fisura mediante métodos fotogramétricos. Para un mismo periodo de exposición, los mayores cierres de fisura tuvieron lugar en la condición de inmersión en agua. Además, se observó que el aditivo cristalino puede favorecer la autorrecuperación a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: self-healing, autorreparación, aditivo cristalino, repetitividad, HRF

1.- INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación sobre un uso inteligente de los materiales y la necesidad de garantizar a largo plazo un estado y rendimiento óptimos, tanto a nivel estructural como de material, en las aplicaciones de ingeniería civil ha favorecido una mayor investigación acerca de nuevos materiales cementicios autorreparables. El objetivo principal de estos materiales es el de cerrar la vía de entrada (fisuras) a los agentes agresivos, de manera que el inicio de la degradación del material se retrase o se evite completamente. El hormigón tiene ciertas propiedades de autorreparación ya que, en la mayoría de los casos, el 20-30% de las partículas de cemento permanecen anhidras. Cuando se crea una fisura, dichas partículas anhidras entran en contacto con el agua o con la humedad y reaccionan con ella

creando productos de hidratación que contribuyen al cierre de la fisura [1, 2]. Dicha autorreparación se denomina “autorreparación autógena” (autogenous healing, en inglés), [3]. Por otra parte, cuando en la matriz cementicia se añaden adiciones especialmente diseñadas para promover la autorreparación del material cementicio [4], como por ejemplo los aditivos cristalinos [5, 6], el proceso se denomina “autorreparación ingenierizada” (engineered healing, en inglés). A su vez, la sinergia entre los materiales cementicios reforzados con fibras y las técnicas de autorreparación (self-healing) están dando lugar a soluciones con un gran potencial [4] ya que las fibras pueden mejorar el proceso de autorreparación debido a su capacidad para restringir el ancho de las fisuras y aumentar la formación de fisuración múltiple [1, 6, 8-10]. Se ha comprobado que fisuras con un ancho menor a $30\mu\text{m}$ se autorrepararon completamente y, en algunos casos incluso fisuras con un ancho de $50\mu\text{m}$ [2]. Posteriormente, será necesario comprobar si el mecanismo de autorreparación se mantiene a lo largo del tiempo tras varios ciclos de carga-descarga (repetitividad de la autorreparación). A día de hoy todavía hay muy pocos trabajos que traten la repetitividad [7, 11].

En la última década, con la mejora de los métodos fotogramétricos y de tratamiento de la imagen, se han desarrollado diversos algoritmos de detección y caracterización de fisuras [12]. Estos procedimientos alcanzan resultados de gran precisión especialmente en superficies con textura e iluminación homogéneas [13]. El algoritmo de detección inicia con la aplicación de filtros que suavizan el error y realzan los bordes. Posteriormente, se aplica el procedimiento que permite el aislamiento de la fisura. Los métodos más destacados en la actualidad son los llamados algoritmos de binarización [14]. Estos métodos realizan una clasificación de cada pixel en dos categorías; *blanco* o *negro* (*fisura* o *no fisura*), basándose en la definición de un umbral radiométrico [15]. El resultado de este proceso es lo que a veces se conoce como imagen segmentada. Finalmente, un filtrado adicional permite la eliminación de valores atípicos (*outliers*). Varios autores, como [16-19], han hecho uso de estos métodos de procesamiento digital de la imagen para la detección y cuantificación de fisuras. El procedimiento debe ser adaptado según las características a obtener; ancho, largo, profundidad o área de la fisura, siendo esta última la más elegida para el estudio de la evolución temporal de la fisuración. La precisión alcanzada hasta la fecha por estos métodos es, en todo caso, superior al 75% e inferior al 95%.

El objetivo principal de este trabajo es analizar la repetitividad de la autorreparación de HRF y la influencia que puede tener en ella la adición de aditivos cristalinos promotores de la autorreparación. Mediante métodos fotogramétricos se cuantificará el cierre de las fisuras en cada una de las condiciones analizadas y a lo largo de varios ciclos de fisuración-reparación.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIALES Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

Se ha fabricado un hormigón reforzado con fibras (HRF) convencional sin aditivo cristalino y otro con aditivo cristalino (exactamente un 0.8% sobre el peso del cemento), de acuerdo

con las proporciones indicadas en la Tabla 1. Dicho aditivo cristalino promueve la autorreparación de las fisuras y consiste en una mezcla de cemento, arena y microsilito. Para ambos hormigones se ha utilizado una cuantía de fibras de acero de 40kg/m^3 con las siguientes dimensiones: 60mm de longitud, 0,9 mm de diámetro y esbeltez (longitud/diámetro) de 65.

Tabla 1. Composición de los hormigones empleados

Material [kg/m^3]	HRF sin aditivo cristalino	HRF con aditivo cristalino
Cemento tipo II 42.5	360	360
Aditivo cristalino	0	2,9
Agua	180	180
Superplastificante	3,5	3,5
Arena 0-4mm	814	811
Grava 4-16mm	1077	1077
Fibras de acero 65/60BG	40	40

Se fabricaron 9 probetas prismáticas de $150 \times 150 \times 600\text{mm}$ y se ensayaron de acuerdo con la norma EN 14651 para su caracterización mecánica. Una vez ensayadas, las probetas fueron cortadas en porciones tal y como muestra la Fig. 2a, dando lugar a las probetas DEWS. Los hormigones se diseñaron con una fluidez tal el hormigón circulase a lo largo del eje largo de la probeta prismática (Fig. 2b). Esto permitió que las fibras se orientaran predominantemente a lo largo de dicha dirección. La configuración del ensayo y las entallas de las probetas (Fig. 2c) permitieron prefijar el plano de rotura, y por consiguiente la orientación predominante de las fibras [20], siendo éstas mayoritariamente perpendiculares (H1, H3) o paralelas (H1, V1, V2, V3) al plano de rotura.

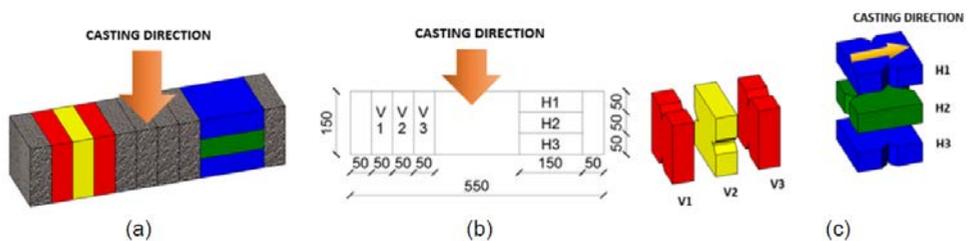


Figura 2. Fabricación y obtención de las probetas sometidas al DEWS test

Tras 4 meses en cámara húmeda a 20°C y 95% de humedad relativa, las probetas DEWS se prefisuraron de acuerdo con la metodología DEWS (Double Edge Wedge Splitting test) [20]. Los ensayos se llevaron a cabo controlando y midiendo la abertura de fisura a lo largo del ligamento tanto en la cara frontal como en la trasera de la probeta DEWS como muestra la Fig. 3.

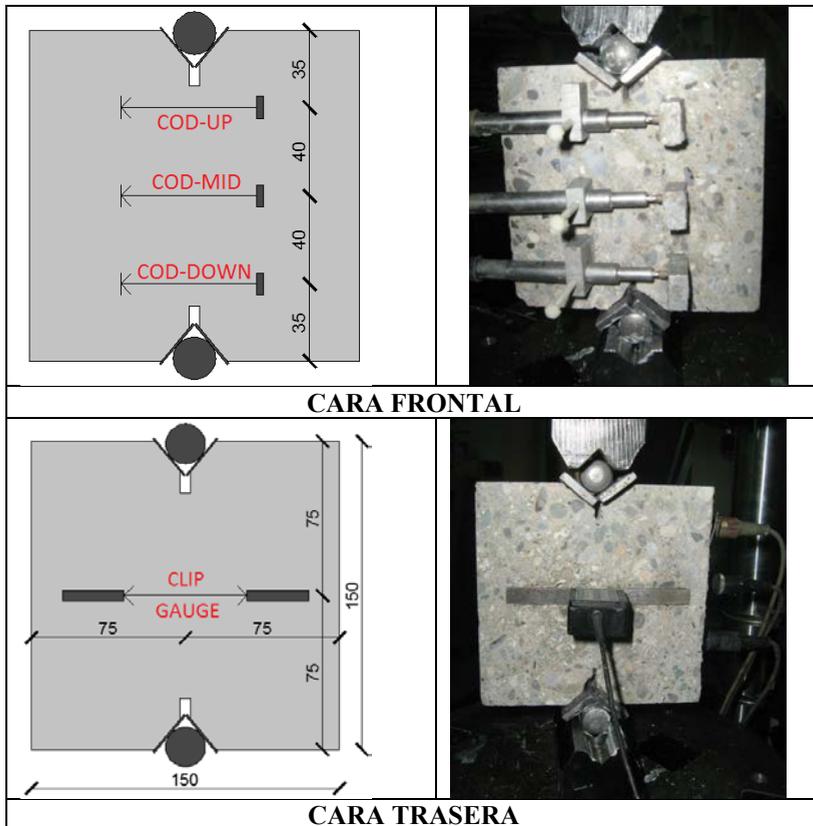


Figura 3. Geometría y metodología de ensayo DEWS

Se llevaron a cabo ensayos de prefisuración hasta una abertura de fisura de 0.25mm; las probetas DEWS fueron sometidas a las distintas condiciones de exposición: inmersión en agua, exposición al aire, ciclos aire/agua (4 días inmersos en agua y 3 días expuestos al aire libre) durante distintos períodos hasta llegar a una duración total de 1 año. Las probetas se clasificaron en tres grupos diferenciados por su tratamiento inicial: FT-1 fueron aquellas probetas cuyo tratamiento inicial fue de 1 mes, FT-3 aquellas en las que fue de 3 meses y FT-6 de 6 meses. Por ejemplo, las 23 probetas DEWS pertenecientes al grupo FT-6 siguieron la siguiente secuencia: autorreparación durante 6 meses en cada una de las 3 ambientes de exposición + fisuración de 0.25mm + autorreparación durante 1 mes + fisuración de 0.25mm + autorreparación durante 2 meses + fisuración de 0.25mm + autorreparación durante 1 mes + fisuración de 0.25mm + autorreparación durante 2 meses + fisuración de 0.25mm, tal y como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Recorridos experimentales posibles (FT-1, FT-3 y FT-6) según la duración de los ciclos de fisuración-autorreparación hasta una duración total de 1 año

<i>Probetas</i>	<i>Ciclos de autorreparación (meses)</i>						
FT-6 23 DEWS	6		1	2	1	2	
FT-3 20 DEWS	3	1	2	1	2	1	2
FT-1 22 DEWS	1	2	3	1	2	1	2

3.- PROCESAMIENTO DE IMAGEN. METODOLOGÍA Y APLICACIÓN PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL NIVEL DE AUTORREPARACIÓN DE LAS FISURAS

Para analizar la autorreparación de las fisuras de las probetas DEWS autorreparadas se pretende examinar la autorreparación de la fisura mediante técnicas de análisis de imagen. Para ello se han tomado fotografías con un microscopio digital a lo largo de toda la fisura en todas las probetas DEWS, con el objetivo de cuantificar el área de la fisura y con ella el cierre de la misma.

Debido a la forma irregular de las fisuras, además de tomar medidas de la abertura de la fisura para analizar su autorrecuperación, se ha decidido aplicar métodos de procesamiento de imagen que permiten analizar la evolución del ancho de fisura de una forma continua y, por tanto, más representativa de la evolución de la fisura completa. Para analizar la capacidad de autorreparación de las fisuras sometidas a distintos tratamientos (aire, agua y ciclos) es necesario identificar la superficie de la fisura y compararla a lo largo del tiempo. Se ha desarrollado un algoritmo para detectar la fisura y para cuantificar su superficie en píxeles. El procedimiento para estimar la superficie de fisura consiste en la secuencia que se muestra en la Fig. 4.

Para analizar la fisura principal se determina la zona que ésta ocupa (Fig. 5a), de este modo se eliminan posibles fisuras secundarias no relevantes con la fisura objetivo, además de reducir significativamente el tiempo de computación. Posteriormente se aplica un filtro a la imagen previo a la binarización de la misma. Mediante el proceso de binarización (Fig. 5b), los píxeles de la fisura se clasifican en dos categorías: oscuro o claro. Dicho método se conoce como “Adaptive Thresholding”. A continuación, se eliminan aquellos “outliers” que no forman parte de la fisura principal, de esta manera se aísla la fisura principal permitiendo cuantificar su superficie (Fig. 5c). El proceso descrito está empezando a ser aplicado en las probetas ensayadas lo que permitirá cuantificar el área de la fisura y la autorreparación de las fisuras para cada una de las condiciones y períodos de exposición.

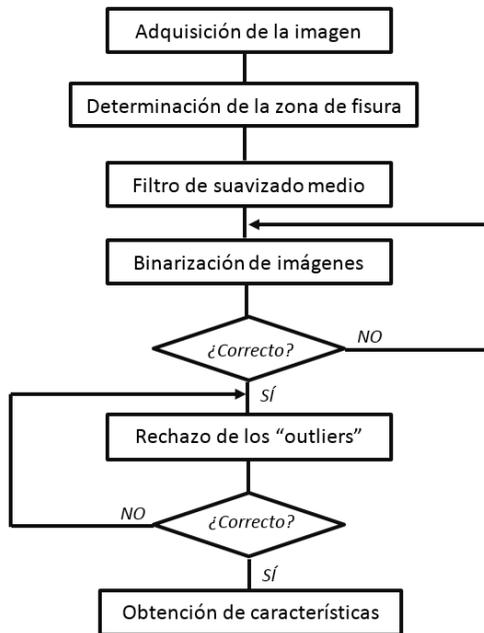


Figura 4. Algoritmo de estimación de la superficie de la fisura

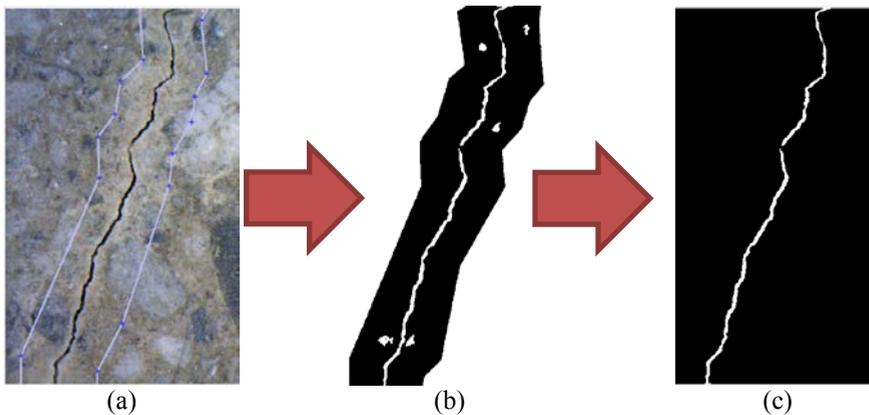


Figura 5. Procedimiento de detección de la fisura principal

El Índice de Cierre (%) de la probeta i para el ciclo de autorreparación j se calcula de la siguiente forma:

$$Sealing\ Index\ i^j = \frac{\sum_1^8 CA_{i,post}^{j-1} - \sum_1^8 CA_{i,pre}^j}{\sum_1^8 CA_{i,post}^{j-1}} \cdot 100$$

donde:

- $\sum_1^8 CA_{i,post}^{j-1}$, es la suma global del área de fisura en las 8 imágenes de la fisura tomadas para cada muestra i , tomadas justo después de cada ensayo de fisuración al final de cada ciclo de recuperación $j - 1$.
- $\sum_1^8 CA_{i,pre}^j$, es la suma global del área de fisura en las 8 imágenes de la probeta i , al final de cada tratamiento de autorrecuperación j .

En la Figura 6 se muestra el Índice de Cierre (%) de la fisura para cada una de las probetas ensayadas. El elevado número de ensayos hace que los resultados obtenidos sean altamente fiables y consistentes. Se observa claramente que el ambiente de exposición más favorable para la autorrecuperación de la fisura es el de la inmersión en agua, seguido por los ciclos aire/agua y en último lugar la exposición al aire.

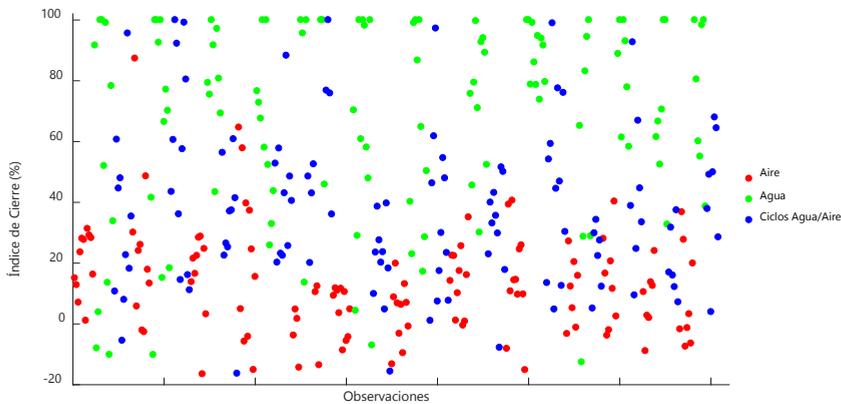


Figura 6. Visión global del Índice de Cierre de la fisura en función del ambiente de exposición y del tipo de hormigón (M1: hormigón de referencia; M2: hormigón con aditivo cristalino).

Los ciclos de fisuración-reparación se llevaron a cabo durante 1 año. Como se mostró en la Tabla 2, existen 3 recorridos posibles: FT-1, FT-3 y FT-6. En la Figura 7, se muestran los porcentajes de cierre de las fisuras a lo largo del periodo de estudio. En particular, aparecen reflejados, para cada rango de fisuración, los grupos de observaciones más relevantes en función del ambiente de exposición. En la Figura 7a se llegó a los 12 meses siguiendo el recorrido FT-1 (véase Tabla 2) y en la Figura 7b siguiendo el recorrido FT-6. En ambos recorridos (Figura 7a y 7b) se observa que los mayores cierres de fisura tuvieron lugar para la condición de inmersión en agua y los menores para la condición de exposición al aire. Cabe destacar que, incluso después de 12 meses en los que las probetas fueron sometidas a distintos ciclos de fisuración-recuperación, todavía se obtuvieron índices de cierre de fisura del 100% para el caso de las probetas de inmersión en agua con fisuras entre 0 y 0.15mm. Como era de esperar, las fisuras más finas se correspondieron con la condición más favorable (inmersión en agua) ya que, tras repetidos ciclos son las que todavía consiguieron cerrarse, de ahí que el ancho de fisura inicial sea menor que para el resto de condiciones. En el caso contrario se encuentran las probetas expuestas al aire libre, para las que se obtuvieron los menores índices de cierre, por ser el ambiente de exposición más

desfavorable y la abertura de fisura inicial mayor, de ahí que en la Figura 7 se observe una tendencia del índice de cierre de la fisura claramente decreciente con el ancho de fisura. Este tipo de comportamiento a lo largo de 12 meses se observa para los dos tipos de recorrido expuestos en la Figura 7 aunque si bien es cierto que, los mayores índices de cierre se obtuvieron para el recorrido FT-6 (Figura 7b), en el que el primer período de exposición fue mucho mayor que en FT-1 (Figura 7a), 6 meses frente a 1 mes, respectivamente. Además, en el recorrido FT-6 (Figura 7b) las probetas fueron fisuradas en 5 ocasiones mientras que en el FT-1 (Figura 7a) fueron fisuradas en 7 ocasiones.

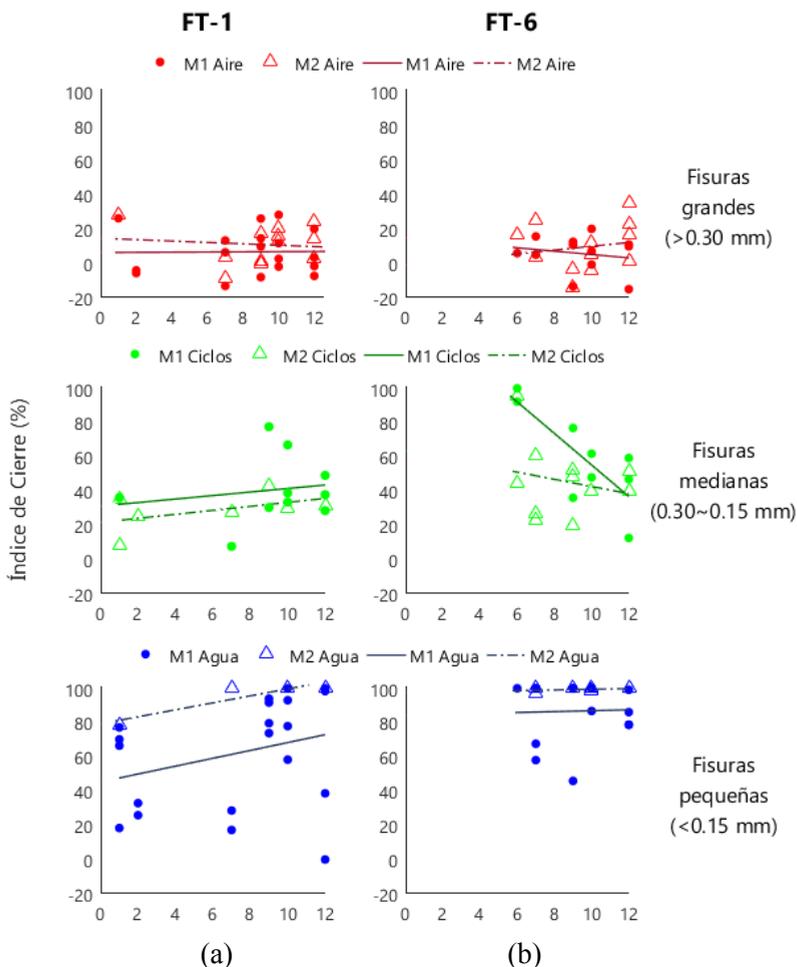


Figura 7. Índice de Cierre de la fisura tras un período de 12 meses con distintos ciclos fisuración-recuperación en función del ambiente de exposición y del tipo de hormigón (M1: hormigón de referencia; M2: hormigón con aditivo cristalino). (a) Recorrido FT-1; (b) Recorrido FT-6.

4.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado la repetitividad de la capacidad autorreparante del hormigón reforzado con fibras analizando la influencia del aditivo cristalino en la autorreparación de las fisuras en probetas sometidas a distintas condiciones: inmersión en agua, ciclos aire/agua y exposición al aire durante distintos periodos hasta llegar a 1 año para analizar el comportamiento a largo plazo. Las conclusiones más relevantes son las siguientes:

- El ambiente de exposición es el factor más influyente en la capacidad de autorreparación de las fisuras. Las probetas expuestas al aire libre reflejan valores muy bajos de curación (< 20%). Por otro lado, el resultado más frecuente para aquellas sumergidas permanentemente en agua es el sellado completo de la fisura.
- El sellado completo de la fisura se presenta únicamente en probetas sumergidas en agua, ya sea periódicamente (4 días a la semana) o permanentemente, y para fisuras con ancho inferior a 0.30mm.
- La contribución del aditivo cristalino en la autorreparación de las fisuras es significativa principalmente en fisuras inferiores a 0.15mm de ancho y sumergidas permanentemente en agua. Además, la mejora introducida por el aditivo cristalino aumenta con el tiempo tras repetidos tratamientos de fisuración-reparación.
- La capacidad de autorreparación aumenta con el tiempo tras varios periodos de fisuración-reparación. En particular, se ha verificado que los resultados de los tratamientos posteriores a los 10 primeros meses son independientes del recorrido experimental previo.
- El hecho de reabrir una fisura en repetidas ocasiones no reduce su capacidad de autorreparación, siempre que esta sea inferior a 0.15mm. Por el contrario, la capacidad de autorreparación parece disminuir tras varios tratamientos para mayores aperturas de fisura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Arq. Gastaldo Brac de Penetron Italia así como la financiación recibida a través de las “PoliMi International Fellowships 2015”.

REFERENCIAS

- [1] Van Tittelboom, K., Gruyaert, E. et al., ‘Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation’, *Construction and Building Materials* **37** (2012) 349-359.
- [2] Yang, Y., Lepech, M. et al., ‘Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles’, *Cement and Concrete Research* **39** (2009) 382–390.
- [3] Ferrara, L., Krelani, V., Moretti, F., Roig-Flores, M., Serna-Ros, P., ‘Effects of autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs): Part 1’, *Cement and Concrete Composites* **83** (2017) 76-100.

- [4] Cuenca E. and Ferrara, L., 'Self-healing capacity of fiber reinforced cementitious composites. State of the art and perspectives', *KSCE Journal of Civil Engineering* **21** (7) (2017) 1-13.
- [5] Ferrara, L., Krelani, V. and Moretti, F., 'On the use of crystalline admixtures as promoters of self-healing in cement based construction materials', *Smart Materials and Structures*, **25** (8) (2016) 1-17
- [6] Roig-Flores, M., Moscato, S et al., 'Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments', *Construction and Building Materials* **86** (2015), 1-11.
- [7] Snoeck, D. and De Belie, N., 'Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by using superabsorbent polymers', *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* **28** (1) (2015) 1-11.
- [8] Cuenca, E., Echegaray-Oviedo J. and P. Serna, 'Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of Self Compacting Fiber Reinforced Concrete beams', *Composites Part B: Engineering* **75** (2015) 135-147.
- [9] Snoeck, D. and De Belie, N., 'From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing - A review', *Construction and Building Materials* **95** (2015) 774-787.
- [10] Ferrara, L., Krelani V. and Moretti, F., 'Autogenous healing on the recovery of mechanical performance of HPFRCCs: part 2', *Cement and Concrete Composites* **73** (2016) 299-315.
- [11] Sahmaran, M., Yildirim, G. et al., 'Repeatability and pervasiveness of Self-Healing in Engineered Cementitious Composites', *ACI Materials J* **112** (4) (2014) 513-522.
- [12] Mohan, A. and Poobal, S. 'Crack detection using image processing: A critical review and analysis', *Alexandria Eng. J.* (2017).
- [13] Hutchinson, T.C. and Chen, Z., 'Image-based framework for concrete surface crack monitoring and quantification,' *Adv. Civ. Eng.* (2010).
- [14] Imocha Singh, O., Sinam, T., James, O. and Romen Singh, T., 'Local Contrast and Mean Thresholding in Image Binarization,' *Int. J. Comput. Appl.*, **51** (6) (2012) 5-10.
- [15] Romen Singh, T., Roy, S., and Manglem Singh, K., 'Local Adaptive Automatic Binarisation (LAAB),' *Int. J. Comput. Appl.*, **40** (6) (2012) 27-30.
- [16] Adhikari, R.S., Moselhi, O., and Bagchi, A., 'Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection,' *Autom. Constr.*, **39** (2014)180-194.
- [17] Lee, B.Y., Kim, Y.Y., Yi, S.T., and Kim, J.K., 'Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks,' *Struct. Infrastruct. Eng.*, **9** (6) (2013) 567-577.
- [18] Fujita, Y., and Hamamoto, Y. 'A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces,' *Mach. Vis. Appl.*, **22** (2) (2011) 245-254.
- [19] Valença, J., Dias-Da-Costa, D., Júlio, E., Araújo, H., and Costa H., 'Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing,' *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, **46** (1) (2013) 433-441.
- [20] Di Prisco, M., Ferrara, L., Lamperti, M.G.L. 'Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behavior of fibre reinforced cementitious composites', *Materials and Structures*, **46** (11) (2013) 1893-1918.