

# Hormigones auto-regenerantes: Mecanismos y procesos de autosellado de fisuras

(Recibido: 03/04/2015; Aceptado: 20/05/2015)

Jesús Alcaraz Marín, Carlos J. Parra Costa  
Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación  
Email: j.alcarazmarin@gmail.com, Carlos.parra@upct.es

**Resumen.** Los hormigones autoreparables constituyen una interesante vía de investigación en relación a la posibilidad de mejora de las propiedades en estado endurecido, en especial de los valores clave de durabilidad así como abren la puerta a la posibilidad de autorreparación en hormigones fisurados. En este trabajo se resumen unos novedosos mecanismos auto-reparación de hormigones de altas prestaciones inherentes tanto a la propia "post-hidratación" del cemento como a materiales "curantes" que son añadidos. Los mecanismos de autoreparación son evaluados mediante estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de microresonancia.

**Abstract.** Self-healing concrete is being a interesting investigation path in relation to the possibility to improve mechanical properties at concrete hardened state, especially to improve concrete durability and open important way to autogenous healing for cracked concrete. Present work summarizes self-healing and autogenous healing process due to concrete additions and post-hydration mechanisms. SEM and microacoustic emission analysis are used to quantify concrete healing.

**Palabras clave.** Microestructura, fisuración, altas prestaciones, resistencia, hormigón, curado, SEM.

## 1. Introducción

Para la mayoría de las estructuras de hormigón la valoración de su durabilidad es un parámetro clave para la determinación de la vida útil de la estructura. La presencia de fisuras, debidas a acciones mecánicas o efectos como retracción y fluencia, es uno de los factores que mayor influencia tiene en la durabilidad de estas estructuras, generando cambios negativos en las resistencias y propiedades de transporte inherentes al hormigón (permeabilidad, absorción y difusión capilar) (1). La aparición de estas fisuras provoca un incremento de los costos de mantenimiento generando además una disminución de su vida de servicio.

El fenómeno de autorreparado de algunos hormigones genera unos menores costes de mantenimiento así como un incremento de la vida útil de las estructuras. Este hormigón autorreparable tiene dos visiones:

1. El hormigón per se con relaciones a/c bajas (entorno a relaciones a/c cercanas a 0.25) exhibe este comportamiento. Los granos de cemento que no se hidratan en fases posteriores y en presencia de agua generan el CSH que inicialmente no se produce.
2. El autorreparado por adición de agentes de reparación encapsulados, los cuales deben quedar repartidos de manera uniforme por todo el hormigón.

Desde el punto de vista económico el primero es mucho más viable que el que incorpora las cápsulas.

Actualmente el foco de estos estudios (11, 16) se centra en el autorreparado mostrado por hormigones que incorporan bacterias encapsuladas. Esos estudios han llegado a la conclusión de que existen tres criterios generales para que el autorreparado tenga lugar: deben existir unas ciertas especies químicas ( $\text{CO}_2$  en el aire,  $\text{NaCl}$  de agua de mar o sales de deshielo son elementos que ayudan a la autoregeneración) (2), la exposición a varias condiciones ambientales (alta humedad, presencia de  $\text{H}_2\text{O}$ ,...) (3) y que el ancho de fisura limitado (4).

## 2. Hormigones autorreparables y con microcápsulas

Los estudios sobre la adición de microcápsulas al hormigón con objeto de conferirle propiedades autorreparantes fueron empezados por Yang et al. (5) llegando a la conclusión que la adición de metilmetacrilato encapsulado a morteros reforzados con microfibras de carbón mejoró de manera notable su resistencia a fisuración.

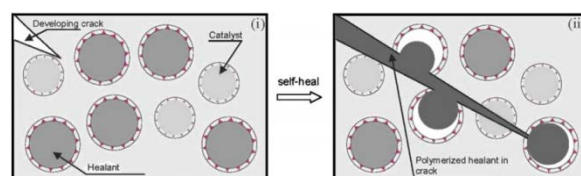


Fig. 1. Esquema del funcionamiento del concepto de autorreparado en hormigones con microcápsulas (5).

El concepto de un autorreparado bio-mimético ha sido demostrado para materiales de base cementicia con la incorporación de agentes reparadores en fibras porosas vacías o en tubos de cristal vacíos con un

sellado frágil (6-8). Este concepto también fue demostrado por White et al. (9) para compuestos de base polimérica, dispersando el agente reparador en microcápsulas y el catalizador en fase de mezclado de los elementos que forman la matriz. La manera de actuar de estas cápsulas puede ser activa o pasiva, respondiendo frente a una fuente de calor (activa) o a cargas mecánicas (pasiva), los agentes son liberados reparando las fisuras o llenando vacíos mediante polimerización (10). La viscosidad del agente reparante no debería ser muy grande con objeto de poder llegar a las zonas fisuras, incluidas las microfisuras. Otro requisito es que tenga la suficiente fuerza de enlace entre las superficies de la rotura. (11).

Muchos tipos de agentes reparadores están siendo estudiados en la búsqueda de un hormigón autorreparante. La mayoría de ellos son de un solo componente, “air-curing” agentes, como cianocrilatos, epoxi, siliconas o soluciones alcali-siliconosas, son preferidas sobre las multi-componente, debido a que se teme una mezcla incompleta de los componentes (11). Los agentes “simples” presentan una desventaja frente a los compuestos y es que tienen una menor vida útil (12) esto es debido a su menor estabilidad. En la mayoría de las investigaciones llevadas a cabo para encapsular el material reparante se usan tubos vacíos de cristal (7-11).

Como se puede ver en la Fig. 1, la liberación del agente y su activación se realiza por la rotura del cristal del tubo. Los diámetros internos de los tubos usados van desde 0.8 mm (13) a 4 mm (14). A pesar de tener un tamaño grande, se ha encontrado que tras la rotura solo una pequeña cantidad del producto reparador es vertido en la fisura quedando la mayor parte dentro del tubo (15) debido a las fuerzas capilares.

Un tipo de compuesto de los que puede llevar estas cápsulas son las bacterias (16). En el estudio de Wang, J.Y. et al. (2006) se usaron una serie de microcápsulas que eran resistentes al alto pH y flexibles en presencia de alta humedad. Estas siendo la bacteria *Bacillus sphaericus*. El mecanismo de funcionamiento de esta bacteria es simple: una vez aparecen fisuras se produce la rotura de las cápsulas liberando las bacterias que en presencia de la humedad y el oxígeno hacen que se precipite el  $\text{CaCO}_3$  consiguiendo reparar la fisura.

En la Fig. 2 se puede observar como que la mayor parte de las cápsulas quedan embebidas en la matriz cementicia incluso después de la fisura. Esto indica que existe una buena fuerza de enlace entre estas y la matriz.

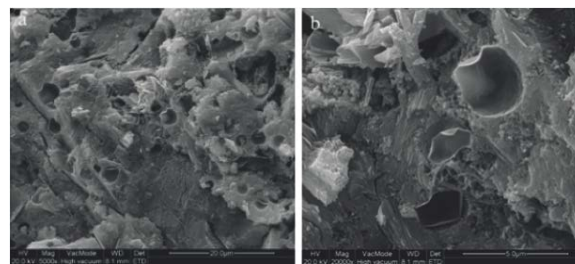


Fig. 2. Superficie de la fractura de un hormigón con microcápsulas (16).

Según Wang et al. (16) a acción reparante de estas bacterias se completa a las tres semanas de exposición después de la aparición de la rotura (Fig. 3). Sin la presencia de agua en la zona de la fisura el grado autorreparado es cero. De forma genérica para estas bacterias se establece un % de curado cercano al 70%.

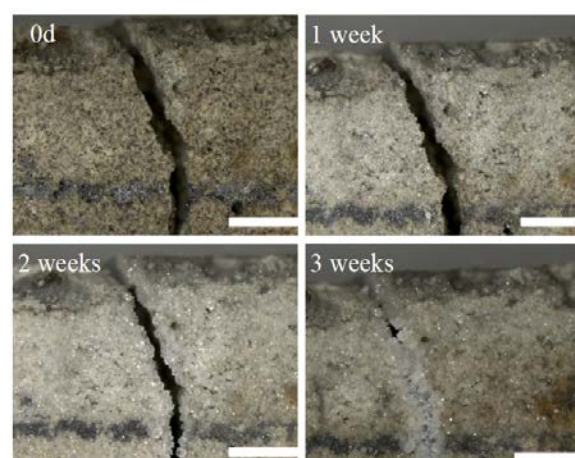


Fig. 3. Autorreparado de hormigones con bacterias (16).

El fenómeno de autorreparado es un proceso que ocurre principalmente debido a la presencia de partículas de cemento sin hidratar. Este proceso solo puede tener lugar en la presencia de agua y consiste en la reacción de los componentes expuestos en las superficies de la fractura. Estas reacciones producen cristales que hacen que la fisura se selle restableciendo la continuidad del material. El principal requerimiento a parte de la presencia de agua, es que existan componentes que puedan reaccionar.

En la literatura se establecen una serie de mecanismos físicos, químicos y mecánicos que pueden ser los causantes de este autocurado del hormigón (17):

- Aumento de volumen e hidratación de la pasta de cemento.
- Precipitación de cristales de carbonato cálcico y de los geles de silicato hidratados (C-S-H)
- Bloqueo de las trayectorias de flujo por impurezas del agua
- Bloqueo de las trayectorias de flujo por las partículas de hormigón rotas durante la fisura.

Al igual que para los hormigones con microcápsulas, el ancho de la fisura presenta un factor muy a tener en cuenta, siendo limitante para la total autoreparación del hormigón (17) que en estos casos debe de estar entre 0.05 mm y 0.15 mm.

Una medida de la sanación del hormigón es conseguida a través de la recuperación de la frecuencia de resonancia. Generalmente esta técnica es usada para ver el daño que sufre el hormigón sometido a ciclos de hielo-deshielo. El fundamento para el uso de esta técnica es que en el hormigón dañado se produce una disminución drástica del módulo de resonancia. La medida de la recuperación de la frecuencia de resonancia supone un tipo de estudio no destructivo.

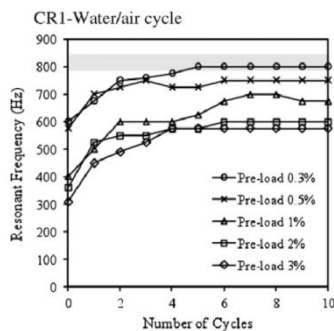


Fig. 4. Medida de la recuperación de hormigones ECC sometidos a ciclos de agua/aire cuantificado cambios de la frecuencia de resonancia (19).

Como se puede observar en la Fig. 4, se producen cambios en la frecuencia de resonancia del hormigón. Esto es debido a que al estar sometido a los ciclos de agua/aire y al tener una relación a/c baja, los granos de cemento que quedan sin hidratar en una primera fase, se hidratan. Hasta el sexto ciclo se producen mejoras de la frecuencia de resonancia. Este cese de la recuperación de la frecuencia de resonancia se debe a que al producirse la reacción entre los granos de cemento y el agua, y la consiguiente cristalización de los componentes se produce el sellado de la fisura.

### 3. Conclusiones

1. El autocurado de los hormigones puede ocurrir en condiciones ambientales naturales no estando limitada a condiciones controladas en laboratorio.
2. Las fisuras del hormigón sujetas a presencia de agua exhiben capacidad para autosellarlas a lo largo del tiempo.
3. El ancho de la fisura juega un papel fundamental en los mecanismos de autocurado del hormigón, limitándose este proceso a anchuras comprendidas en el rango 0.05 - 0.15 mm.
4. Tanto para hormigones con bacterias como para los que no las tienen, la presencia de agua juega un papel fundamental en el autocurado del mismo.
5. En los procesos de autocurado, los ratios de generación de cristales de  $\text{CaCO}_3$  y de geles de silicato de calcio depende tanto del ancho de fisura y de la presencia de agua como del tipo de cemento.

6. La formación de cristales de  $\text{CaCO}_3$  es relativa a dos procesos diferentes: en la fase inicial en presencia de agua, el crecimiento está controlado por reacciones cinéticas<sup>1</sup> (no se que son referenciar), después este crecimiento pasa a ser un proceso de difusión.

### 4. Referencias

- [1] S. Granger a, A. Loukili a, G. Pijaudier-Cabot a, □, G. Chanvillard *Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis* Cement and Concrete Research 37 (2007) 519–527
- [2] H. Reinhardt, M. Joos, *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width*, Cement and Concrete Research 33 (7) (2003) 981–985.
- [3] C.A. Clear, *The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete*, Cement and Concrete Association 559, 1985.
- [4] M. Joos, *Leaching of concrete under thermal influence*, Otto-Graf-Journal 12 (2001) 51–68.
- [5] Z.X. Yang, J. Hollar, X.D. He, X.M. Shi, *A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules*, Cem. Concr. Compos. 33 (2011) 506–512.
- [6] Dry C. *Alteration of matrix permeability, pore and crack structure by the time release of internal chemicals*. In: Proceedings: advance in cementitious materials. Gaithersbury, Maryland: American Ceramic Society; 1990. p. 729–68.
- [7] Dry C. *Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability*. Cem Concr Res 2000;30(12):1969–77.
- [8] Brown EN, White SR, Sottos NR. *Microcapsule induced toughening in a selfhealing polymer composite*. J Mater Sci 2004;39(5):1703–10.
- [9] White SR, Sottos NR, Geubelle PH, Moore JS, Kessler MR, Srram SR, et al. *Autonomic healing of polymer composites*. Nature 2001;409(6822):794–7.
- [10] Dry C. *Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices*. Smart Mater Struct 1994;3(2):118–23.
- [11] Kim Van Tittelboom a, Nele De Belie a,fl, Denis Van Loo b, Patric Jacobs c *Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent* Cement & Concrete Composites 33 (2011) 497–505
- [12] Dry C, McMillan W. *Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete*. Smart Mater Struct 1996;5:297–300
- [13] Li VC, Lim YM, Chan Y-W. *Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite*. Compos Part B: Eng 1998;29(6):819–27.
- [14] Thao TDP, Johnson TJS, Tong QS, Dai PS. *Implementation of self-healing concrete - Proof of concept*. IES J Part A: Civ Struct Eng 2009;2(2):116–25
- [15] Joseph C, Jefferson AD, Canoni MB. *Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials*. In: Proceedings of the first international conference on self-healing materials; 2007. p. 1–8.
- [16] J.Y. Wang a,b, H. Soens c, W. Verstraete b, N. De Belie a, *Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores* Cement and Concrete Research 56 (2014) 139–152
- [17] C. Edvardsen, *Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete*, American Concrete Institute Materials Journal 96 (4) (1999) 448–454.
- [18] Fischer, G., and Li, V.C., *Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC)*, ACI Structural Journal, V.99, No.1, Jan.-Feb., pp. 104-111 (2002).
- [19] Yingzi Yang, En-Hua Yang, Victor C. Li, *Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age* Cement and Concrete Research 41 (2011) 176-183

<sup>1</sup> Energía cinética, energía que posee una materia debido a su movimiento.