

# Resumen

Los materiales autosanables son materiales con la capacidad de reparar sus daños de forma autónoma o con ayuda mínima de estímulos externos. En el campo de la construcción, el desarrollo de elementos autosanables aumentará la durabilidad de las estructuras y reducirá las acciones de mantenimiento y reparación.

Los elementos de hormigón armado presentan frecuentemente pequeñas fisuras ( $< 0.3$  mm) debido a la baja resistencia a tracción del hormigón. Estas fisuras no son relevantes mecánicamente, pero pueden suponer un punto de entrada para agentes agresivos que podrían iniciar procesos de degradación en el elemento. El hormigón tiene una capacidad de autosanación natural capaz de cerrar pequeñas fisuras, denominada sanación autógena, producida principalmente por la hidratación continuada y la carbonatación. Sin embargo, esta capacidad es baja, y por tanto es descartada en el diseño de estructuras de hormigón.

Estudios recientes han intentado sobrepasar los límites de la sanación autógena mediante dos caminos: desarrollando composiciones de hormigón para mejorar la sanación autógena, o diseñando productos específicos para conseguir autosanación, en este caso llamada sanación autónoma. Estos productos para conseguir autosanación incluyen, entre otros, aditivos cristalinos, agentes micro o macroencapsulados, e incluso el uso de bacterias que producen carbonato cálcico. Todos estos productos se encuentran en diferentes etapas de madurez, y algunas de ellas aún están en desarrollo.

Los aditivos cristalinos (CA) son un tipo de aditivo reductor de la permeabilidad que se considera que aporta propiedades de autosanación. No obstante, la falta de conocimiento sobre su comportamiento y sobre las propiedades de autosanación que aporta limita su uso. Además, los métodos para evaluar la autosanación en hormigones no están estandarizados todavía. Esto complica su evaluación y aumenta la complejidad para realizar un análisis crítico de los diferentes productos y métodos de evaluación de la literatura.

Para responder a esta falta de conocimiento e incertidumbre, los principales objetivos de esta tesis doctoral son: 1) estudiar y proponer procedimientos experimentales para evaluar de manera eficiente los fenómenos de autosanación y, 2) evaluar experimentalmente las mejoras en autosanación producidas al introducir aditivos cristalinos en el hormigón.

Esta tesis incluye como ensayos para la determinación de la autosanación: la evaluación del cierre de fisuras usando diferentes parámetros, la permeabilidad al agua de hormigón fisurado con agua a alta presión, ensayos de flexión a tres puntos para analizar expresiones que cuantifiquen las recuperaciones mecánicas, y consideraciones respecto al ensayo de absorción capilar. En este trabajo se han realizado varias campañas experimentales, tanto en mortero como en hormigón, para validar los ensayos propuestos. Posteriormente, estos ensayos se han utilizado para analizar la influencia de varios parámetros en la autosanación. Los parámetros estudiados incluyen entre otros: presencia de aditivos cristalinos, nivel de daño (fisura entre 0.1-0.4 mm), tiempo necesario para el sanado, composición del hormigón e influencia de condiciones de sanado. Finalmente, se analizan los efectos producidos al añadir aditivos cristalinos en hormigón en la fluidez, resistencia e hidratación.

Los resultados muestran que el cierre de fisuras es un ensayo eficaz y sencillo para evaluar la autosanación. Sin embargo, la orientación de la fisura durante el sanado ha resultado ser de gran importancia, y no considerar este aspecto puede llevar a conclusiones engañosas. El ensayo de permeabilidad al agua propuesto en este trabajo presenta una buena estabilidad y es fácil de implementar en laboratorios de hormigón. Además, las relaciones obtenidas entre los parámetros de fisura y la permeabilidad del agua han confirmado la relación cúbica indicada en la literatura, con cierta dispersión producida por la geometría interior de las fisuras y la presencia de fibras. Este trabajo muestra que analizar la eficiencia de autosanado mediante el cierre de fisuras puede llevar a una sobreestimación de la capacidad de sanación, comparada con los resultados obtenidos mediante permeabilidad al agua. Los ensayos de sorptividad resultaron fáciles de implementar, sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo mostraron una alta dispersión y sensibilidad a las variaciones en las fisuras producidas durante el proceso de prefisuración.

En cuanto a la evaluación de la recuperación mecánica, los resultados muestran que la evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo es un parámetro importante que, por tanto, debe considerarse, especialmente en fisuras de edades tempranas y en productos de autosanación con valores esperados de rango pequeño. Los resultados obtenidos en cuanto a recuperación de resistencia no coinciden con la literatura: no se han detectado nuevas cargas picos tras dos meses de sanado y los valores de rigidez después del sanado han resultado ser muy similares para probetas en inmersión en agua y en cámara húmeda.

Al igual que en la sanación autógena, los CA no fueron capaces de sanar fisuras a alta humedad relativa. La inmersión completa en agua condujo a los mejores resultados en todas las metodologías utilizadas en esta tesis. Para los dos tipos de sanación, la inmersión continua en agua y los ciclos inmersión/secado pueden lograr buenos resultados de cierre de fisuras y permeabilidad, mostrando un sanado casi completo tras 2 meses, para fisuras temprana hasta 0.30 mm. La mayor parte de las recuperaciones tuvieron lugar en los primeros 14 días. Fisuras de mayor edad mostraron capacidad de sanado pero reducida.

Los resultados obtenidos al utilizar CA no son drásticamente diferentes respecto a la sanación autógena. El beneficio de utilizar CA se ha encontrado en un comportamiento más estable, mediante los ensayos de permeabilidad, obteniendo resultados de sanado mínimo más alto. Sin embargo, no se encontraron mejoras de cierre de fisuras ni de recuperaciones mecánicas. Estos aditivos incrementaron la trabajabilidad y resistencia en hormigón y mortero; sin embargo, también aumentaron el tiempo de fraguado en mortero, verificado mediante calorimetría isotérmica. Los análisis químicos realizados mostraron productos potencialmente diferentes etiquetados bajo el nombre de aditivos cristalinos. Además, la composición de los precipitados formados por la reacción de sanación con CA resultaron los mismos que los producidos por la sanación autógena: calcita, brucita y aragonita.

En este trabajo se ha obtenido que los aditivos cristalinos potencian las reacciones de autosanación, pero tienen una capacidad limitada. La proximidad de los CA a la industria es un punto positivo para su inclusión como un nuevo tipo de aditivo de hormigón. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta tesis indican que se necesitan más análisis para determinar sus efectos completos en hormigón, especialmente con respecto a la autosanación.