



## Estudio de la mejora de la durabilidad de hormigones reciclados con biopolímeros

Julia García-González<sup>1</sup>, Andrés Juan-Valdés<sup>1</sup>, Julia M<sup>a</sup>. Morán-del Pozo<sup>1</sup>, M. Ignacio Guerra-Romero<sup>1</sup>, Paulina Faria<sup>2</sup>, Paulo C. Lemos<sup>3</sup>, Alice S. Pereira<sup>4</sup>, André Freches<sup>5</sup>.

- <sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de León; julia.garcia@unileon.es; andres.juan@unileon.es; julia.moran@unileon.es; ignacio.guerra@unileon.es
- <sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. CERIS and Dep. Civil Engineering; mpr@fct.unl.pt;
- <sup>3</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; paulo.lemos@fct.unl.pt
- <sup>4</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. UCIBIO-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; masp@fct.unl.pt
- <sup>5</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. LAQV-REQUIMTE, Dep. of Chemistry; a.freches@campus.fct.unl.pt

**Resumen:** Una innovadora posibilidad planteada para prolongar la vida útil de los materiales de construcción y edificación es el uso de agentes biorreparadores. Este estudio se centró en la evaluación del efecto protector de agentes reparadores, y a la vez respetuosos con el medio ambiente, mediante el análisis de la absorción superficial de agua en el hormigón reciclado. Se ha ensayado un hormigón reciclado en el que una parte del árido grueso natural ha sido sustituida por residuos de construcción y demolición (RCD), y otro hormigón similar en el cual, además, se sustituyó el cemento convencional Portland por cemento reciclado. Estos hormigones fueron recubiertos superficialmente con biopolímeros obtenidos en el proceso de producción de polihidroxialcanoatos utilizando biomasa residual de dos cultivos microbianos mixtos diferentes. Los resultados mostraron que disminuye significativamente la absorción de agua en el hormigón, siendo más eficaces en las muestras de hormigón reciclado con cemento reciclado.

**Palabras clave:** absorción de agua, biotratamiento, RCD, biorreparación.

### 1. Introducción

Las necesidades de reparación y mantenimiento en las estructuras de hormigón aumentan con la edad. A veces resulta más adecuado programar un plan de reparación y mantenimiento, para protegerlas de las inclemencias medioambientales, que hacer diseños muy costosos para no tener que preocuparse del mantenimiento a lo largo de toda o una buena parte de su vida útil. Además, a pesar de la relativamente buena durabilidad del hormigón, es inevitable que factores tales como las sobrecargas, la fatiga, cambios de uso, etc., den lugar a la aparición de grietas y fisuras. Algunas de estas grietas, en condiciones ambientales adversas, deben ser reparadas para preservar el hormigón en buen estado y evitar una pérdida de durabilidad.

En la bibliografía consultada se han encontrado diversos trabajos de investigación [1-7] que estudian el efecto de varios tipos de tratamientos de reparación superficial en el hormigón. Se ha comprobado que algunos de estos tratamientos mejoran su durabilidad. Esta mejora se consigue en unos casos disminuyendo la permeabilidad del agua, la difusión de la humedad o

los más novedosos produciendo una especie de autosellado de las grietas. Y estas mejoras, evaluadas en la mayoría de los casos con ensayos de absorción de agua, han arrojado resultados muy esperanzadores, como puede ser el caso de Woo et al [1], quienes obtuvieron una mejora de la resistencia a la penetración del agua que osciló entre 29-57 % empleando ciertos materiales de composite; o por su parte Chandra et al [2], estos autores utilizando extracto de cactus, consiguieron resultados aún mejores, del 83 %.

En esta comunicación se muestran los resultados preliminares de un estudio llevado a cabo con subproductos de origen vegetal, en adelante biopolímeros, que se aplica en la superficie del hormigón para mejorar sus condiciones de durabilidad. Se espera mejorar la durabilidad del hormigón y dar un uso a estos subproductos, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio se han ensayado dos tipos de hormigón: en uno se ha sustituido el 50 % del árido grueso natural por árido reciclado (hormigón reciclado, HR) y en el otro además se ha utilizado un cemento reciclado, a base de cemento Portland y un 25 % de residuos cerámicos (hormigón reciclado con cemento reciclado, HRCR). Se hicieron varias probetas con estos dos hormigones las cuales se sometieron a un tratamiento superficial con el fin de evaluar el efecto de los biopolímeros en la durabilidad del hormigón. El tratamiento superficial se hizo con subproductos de naturaleza biológica, capaces de recubrir las fisuras incipientes y aumentar la consolidación entre las partículas que forman las capas superficiales de los elementos de hormigón. Se trata de tratamientos ‘biorreparadores’, denominado comúnmente en inglés *healing biotreatments*.

En la elaboración de HR se emplearon los siguientes componentes: cemento Portland CEM III/A 42.5 N/SR; áridos rodados de naturaleza silíceas; áridos reciclados mixtos (ARM), previamente sometidos a un tratamiento de obtención mecánico, procedentes de una planta de reciclaje de Madrid. Para la elaboración de HRCR, en base a la dosificación de HR se sustituyó el cemento comercial por un cemento reciclado, caracterizado por incorporar un 25 % de material cerámico de origen residual. En la tabla 1 se muestran las características de ambos tipos de cemento y en la tabla 2 la composición del ARM. Todos los materiales cumplen las prescripciones establecidas en las normas españolas de referencia [8-13].

**Tabla 1.** Composición química del cemento Portland y del cemento reciclado

	Composición química (%)	
	CEM III/A 42.5 N/SR	Cemento reciclado
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.59	7.32
CaO	51.33	47.04
Cl	0.02	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.04	3.06
MgO	3.87	2.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.17
K <sub>2</sub> O	0.60	1.70
SiO <sub>2</sub>	25.08	29.35
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.41
SrO	0.11	0.08
SO <sub>3</sub>	2.54	2.45
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.31
ZnO	0.04	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01
MnO	0.22	0.09
LOI	3.930	2.66

**Tabla 2:** Composición del árido reciclado

Composición	% (w/w)
Materiales sueltos, formados por árido natural	44.1
Material cerámico (restos de ladrillo, azulejos, loza sanitaria, etc.	33.6
Árido natural con restos de mortero adherido en la superficie	17.5
Otros (asfalto, vidrio, yeso e impurezas)	4.8

En el laboratorio se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del árido natural y reciclado, tales como la relación D/d, el contenido en finos, el índice de lajas o el coeficiente de los ángeles y la absorción de agua [14-17]. Se observó que ambos áridos cumplen con la EHE-08 [11]. Cabe destacar que la absorción de agua en el árido reciclado, ARM, fue notablemente superior a la del árido natural, debido, principalmente, a la presencia de mortero adherido y material cerámico, componentes en ambos casos más absorbentes que el árido natural. Como consecuencia se produjo una reducción en la docilidad del hormigón durante el amasado. Para evitar esto, se presaturó el árido reciclado antes de ser amasado con los demás componentes de la dosificación. Esta técnica de presaturación demostró ser adecuada en hormigones reciclados sin altas prestaciones de resistencia, mejorándose notablemente la trabajabilidad de la masa [18]. En la tabla 3 se muestra la dosificación empleada para los hormigones elaborados, estableciéndose como parámetros de partida una relación A/C de 0,5 y una resistencia característica del hormigón de 25 MPa.

**Tabla 3.** Dosificación del hormigón por metro cúbico

Componentes	Composición
Agua	155 L
Cemento	313 kg
Arena 0/4 mm	97 kg
Arena 0/5 mm	442 kg
Grava 4/10 mm	242 kg
Grava 6/12 mm	81 kg
ARM 4/20 mm	323 kg

Partiendo de probetas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 400 mm, se obtuvieron mediante una sierra de diamante las muestras de ensayo, con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 100mm. Sobre la cara cuadrada, correspondiente a la superficie enrasada se aplicó el tratamiento superficial.

En los tratamientos se probaron dos grupos de productos, uno procedente de la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) generados por la acción de un cultivo mixto microbiano (MMC) sobre aceite de madera de pino (MMC-P) y otro siguiendo la misma metodología, pero partiendo de glicerol crudo procedente de la producción de biodiesel (MMC-Gly). Dentro de cada grupo, unos productos fueron sometidos a sonicación para romper las paredes celulares de las bacterias productoras de PHA (MMC-Gly\_S y MMC-P\_S) y otros no. Además, se probaron dos concentraciones diferentes de cada producto (\* Menor concentración: 1 Vol. de biopolímeros/ 2 Vol. de agua; \* \* Mayor concentración: 1 Vol. de biopolímeros/ 1 Vol. de agua). La tabla 4 muestra los diferentes tratamientos.

**Tabla 4.** Referencia y descripción de los tratamientos

Tratamiento referencia	Descripción
Control	Control, sin aplicar ningún producto
H <sub>2</sub> O	De referencia con agua
MMC-Gly*	MMC procedente de glicerol sin sonicar, baja concentración
MMC-Gly**	MMC procedente de glicerol sin sonicar, alta concentración
MMC-Gly_S*	MMC procedente de glicerol sonicado, baja concentración
MMC-Gly_S**	MMC procedente de glicerol sonicado, alta concentración
MMC-P*	MMC procedente de aceite de pino sin sonicar, baja concentración
MMC-P**	MMC procedente de aceite de pino sin sonicar, alta concentración
MMC-P_S*	MMC procedente de aceite de pino sonicado, baja concentración
MMC-P_S**	MMC procedente de aceite de pino sonicado, alta concentración

Se aplicó en la superficie de cada muestra una cantidad de 2 ml de biopolímero de cada uno de los tratamientos utilizando una pipeta. Cada tratamiento fue aplicado sobre tres muestras. Las condiciones ambientales durante el ensayo fueron de  $20 \pm 2$  °C y  $40 \pm 5$  % de humedad relativa (RH).

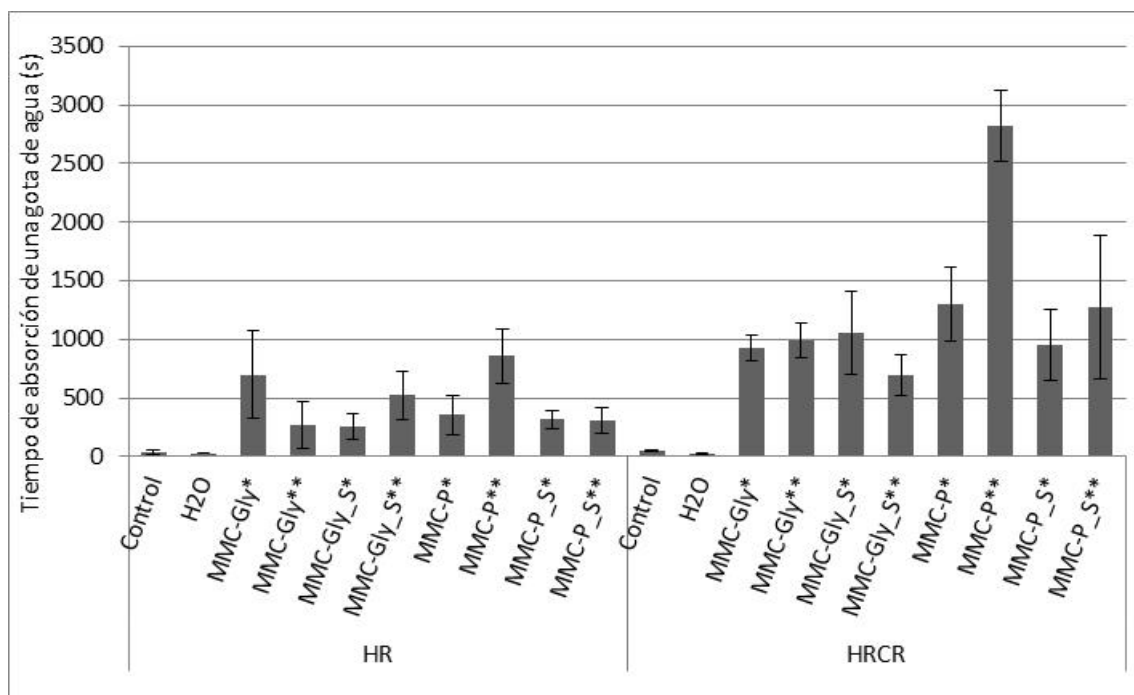


**Figura 1.** Fases características del ensayo de absorción de una gota de agua: a) aplicación de la gota. b) aspecto de la gota de agua en el instante de contacto con la superficie del hormigón. c) Aspecto de la gota en un estado avanzado del proceso de absorción.

Dos días después de la aplicación se hizo la prueba de absorción de una gota de agua, para medir el efecto impermeabilizador de los biopolímeros aplicados sobre la superficie de las probetas. Esta prueba consiste en aplicar una gota de agua sobre la superficie a ensayar y medir el tiempo que dicha gota tarda en absorberse completamente por la muestra. En la figura 1 se pueden observar las tres fases características que describen dicho ensayo. La aplicación de cada una de las gotas es grabada con una cámara de vídeo para posteriormente determinar el tiempo exacto desde su aplicación hasta la completa absorción. Los incrementos de tiempo obtenidos para las muestras tratadas con respecto a las muestras sin tratar permiten cuantificar el efecto reparador que ejercen los biopolímeros sobre las superficies de los distintos hormigones.

### 3. Resultados y discusión

En la figura 2 se puede ver el tiempo de absorción de la gota de agua en cada tratamiento. Los resultados indican que las muestras tratadas con el biopolímero son menos permeables que las de control, sin ningún tipo de tratamiento, y la diferencia es aún más evidente si se comparan con las muestras tratadas con agua. Demostrando por lo tanto un efecto positivo de los biotratamientos sobre la durabilidad de las muestras de hormigón.



**Figura 2.** Tiempo de absorción de una gota de agua en las muestras de hormigón

Se puede observar que el tratamiento MMC es más eficaz en el hormigón con cemento reciclado que con cemento normal. Además es de reseñar que la sonicación no ha tenido influencia en la absorción de agua, resultando ser incluso contraproducente sobre la permeabilidad de alguna de las muestras, observando las muestras HRCR se aprecia como las muestras tratadas con bioproducto sin sonicar (MMC-P\* y MMC-P\*\*) son significativamente menos absorbentes que las muestras tratadas con bioproducto sonicado (MMC-P\_S\* y MMC-P\_S\*\*). Comparando los dos tipos de biopolímeros entre sí, se puede observar como para cualquiera de las dos muestras de hormigón ensayadas, el PHA procedente de madera de pino alcanza mejores resultados impermeabilizantes que el PHA obtenido a partir del glicerol.

El efecto de impermeabilización de la superficie de hormigón que supone el uso de estos biopolímeros alcanza una mejoría notable en comparación con los resultados obtenidos por otros autores, quienes han utilizado otros tipos de bioproductos como Woo et al. [1] o Chandra et al [2], en cuyos estudios, los tiempos de absorción casi se duplicaron –entre el 57 y 83 %-. En esta línea, en el presente estudio se han conseguido mejorar los resultados de absorción, llegándose a incrementar más de 70 veces respecto al tiempo empleado por las muestras de control. Posteriores estudios podrán indicar si efectivamente estos biopolímeros pueden utilizarse con seguridad y garantías para mejorar la durabilidad de los hormigones comerciales, aportando en estos casos el valor añadido de la sostenibilidad.

#### 4. Conclusiones

Una única aplicación superficial con los biopolímeros mejora significativamente el tiempo de absorción de una gota de agua sobre la superficie de los dos tipos de hormigones reciclados empleados en este ensayo, lo que implica una mejora en la durabilidad de los mismos, dejando de manifiesto el efecto reparador de los polihidroxialcanoatos.

Los biopolímeros dieron mejores resultados en el hormigón hecho con cemento reciclado que en el elaborado con cemento convencional, lo que implica un efecto potenciador de la materia cerámica en el agente reparador. Para ambos tipos de hormigón, el PHA procedente de madera de pino alcanza un mayor efecto reparador que el PHA obtenido a partir de glicerol crudo.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto europeo SARCOS a través del programa de estancias a jóvenes investigadores STSM Grant from the COST Action CA15202. (<http://www.sarcos.enq.cam.ac.uk>) y el proyecto BIA2017-83526-R "Procesos de auto-sanado mediante bio-polímeros en hormigones y morteros reciclados", financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Este trabajo fue apoyado también por el Associate Laboratory for Green Chemistry-LAQV and Applied Molecular Biosciences Unit-UCIBIO financiado por fondos nacionales de FCT/MCTES (UID/QUI/50006/2013; UID/Multi/04378/2013) y co-financiado por el ERDF under the PT2020 Partnership Agreement (POCI-01-0145-FEDER – 007265; POCI-01-0145-FEDER-007728).

## Referencias

1. R. S. C. Woo, H. Zhu, M. M. K. Chow, C. K. Y. Leung, J. Kim, "Barrier performance of silane-clay nanocomposite coatings on concrete structure," *Compos Sci Technol*, vol. 68, pp. 2828-2836, November 2008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.10.028
2. S. Chandra, L. Eklund, R. R. Villarreal, Use of cactus in mortars and concrete, *Cem Concr Res*, vol. 28, pp. 41-51, January, 1998. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00254-8
3. C. K. Y. Leung, H. Zhu, J. Kim, R. S. C. Woo, Use of polymer/organoclay nanocomposite surface treatment as water/ion barrier for concrete, *J Mater Civ Eng*, vol. 20, pp. 484-492, July 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:7(484)
4. B. Pigino, A. Leemann, E. Franzoni, P. Lura, Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: characteristics and performance, *Cement Concr Compos*, vol. 34, pp. 313-321, March 2012. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021
5. S. Amidi, J. Wang, Surface treatment of concrete bricks using calcium carbonate precipitation, *Constr Build Mater*, vol. 80, pp. 273-278, April 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.001
6. L. Jia, C. Shi, X. Pan, J. Zhang, L. Wu, Effects of inorganic surface treatment on water permeability of cement-based materials, *Cement Concr Compos*, vol. 67, pp. 85-92, March 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.01.002
7. J. Li, Z. Yi, Y. Xie, Progress of silane impregnating surface treatment technology of concrete structure, *Mater Rev*, vol. 26, pp. 120-125, January, 2012.
8. Royal Decree 256, *Cement Reception Instruction (RC-16)*, 2016.
9. UNE 80303-1 *Cements with additional characteristics. Part 1: Sulphate resisting cements*, Madrid, 2013.
10. EN 197-1 Cement. Part 1: *Composition, specifications and conformity criteria for common cements*, Brussels, 2011.
11. EHE-08 *Code on Structural Concrete*, Madrid, 2008.
12. EN 12620+A1 *Aggregates for concrete*, Brussels, 2008.
13. EN 933-11 *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate*, Brussels, 2009.
14. EN 933-1 *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*, Brussels, 2012.
15. EN 933-3 *Tests for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index*, Brussels, 2012.
16. EN 1097-2 *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation*, Brussels, 2010.
17. EN 1097-6 *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*, Brussels, 2013.
18. J. García-González, D. Rodríguez-Robles, A. Juan-Valdés, J.M. Morán-Del Pozo, M. I. Guerra-Romero, Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture, *Materials*, vol. 7, pp. 6224-6236, September 2014. DOI: 10.3390/ma7096224