

Influencia de las condiciones de curado en las propiedades de auto-reparación en bio-morteros

Influence of curing conditions on self-healing properties in bio-mortars

Adonay Pinto^a, Belén González-Fonteboa^b, Sindy Seara-Paz^c, Lorena G. Calvo^d

^a Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Estudiante de doctorado. Universidade da Coruña (UDC) adonay.pinto@udc.es

^b Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Catedrática de Universidad. Universidade da Coruña bfonteboa@udc.es

^c Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Titular de Universidad. Universidade da Coruña gumersinda.spaz@udc.es

^d Grad. en Biotecnología. Estudiante de doctorado. Universidad de Santiago de Compostela (USC) lorena.gomez.calvo@rai.usc.es

RESUMEN

Este artículo aborda el uso de bacterias y lactato de calcio en morteros elaborados con arena de biomasa para lograr autosellado y mejorar la durabilidad. Se comparan cinco condiciones de curado distintas (a 10 °C, 22 °C, 35 °C, ciclos de inmersión-secado y agua carbonatada), analizándose resistencia a compresión, índice de sellado y absorción capilar. De los resultados, destaca el incremento del 37% en la resistencia a compresión a 35 °C y menores valores de absorción capilar bajo la misma condición. El autosellado también se vio afectado positivamente con la incorporación de bacterias y lactato en todos los rangos de fisura analizados.

ABSTRACT

This article examines the use of bacteria and calcium lactate in mortars made with wood ash to achieve self-healing and enhance durability. Five different curing conditions were compared (10 °C, 22 °C, 35 °C, wet-dry cycles, and carbonated water), analysing compressive strength, sealing index, and capillary absorption. The results highlight a 37% increase in compressive strength at 35 °C and reduced capillary absorption under the same condition. Self-healing was also positively influenced by the incorporation of bacteria and calcium lactate across all analysed crack ranges.

PALABRAS CLAVE: Arena de biomasa, bacterias, autosellado, lactato de calcio, mortero.

KEYWORDS: Biomass sand, bacteria, self-healing, calcium lactate, mortar.

1. Introducción

Los procesos de autosellado, observados en algunas especies de seres vivos en la naturaleza, han llevado a numerosos investigadores a buscar la manera de aplicarlos en las mezclas de base cemento. Con este enfoque, se busca desarrollar sistemas capaces de reparar fisuras y micro fisuras de manera autónoma. La reparación temprana de estas fisuras es crucial para prevenir la entrada de contaminantes que podrían dañar la matriz del material o, en el caso

de estructuras reforzadas, comprometer la durabilidad de las armaduras de acero.

Este enfoque, que promete reducir costes de mantenimiento y disminuir la huella de carbono asociada a las reparaciones [1], ha despertado gran interés tanto en la academia como en la industria. Además, se ha observado que muchas reparaciones tradicionales poseen una vida útil más corta que la de la propia estructura (entre 10 y 15 años), registrándose incluso un 20% de casos con daños a los 5 años

[2]. Por ello, la incorporación de mecanismos de autosellado cobra especial relevancia para prolongar la durabilidad de las estructuras y mitigar las intervenciones de reparación.

En el ámbito del autosellado o *self-healing*, se distinguen dos enfoques fundamentales: el autosellado autógeno, basado en las propiedades intrínsecas de los materiales que ya conforman la mezcla; y el autosellado autónomo, que requiere la inclusión de un agente externo que mejore o active el sellado de las fisuras [3]. Entre estas técnicas autónomas destacan el uso de polímeros con memoria de forma [4], adiciones cristalinas [5], o incluso microorganismos (principalmente hongos y bacterias) [6].

Tanto bacterias como hongos, bajo las condiciones adecuadas, pueden generar iones de carbonato gracias a su metabolismo. Estos iones, al combinarse con cationes de calcio presentes en la mezcla, ya sea procedentes de componentes del hormigón o de aportaciones específicas, forman carbonato de calcio, que se deposita en las paredes de las fisuras y termina sellándolas. Además, las bacterias contribuyen con un segundo mecanismo: su membrana celular, de carga negativa, atrae y nuclea iones calcio, favoreciendo la formación del precipitado [7].

El uso de este tipo de técnicas de autosellado ha sido ya empleado en numerosos estudios empleando distintas bacterias, desde ureolíticas como la *Sporosarcina pasteurii* [8], denitrificantes como la *Pseudomonas denitrificans* [3] o aeróbicas heterotróficas como las *Bacillus cohnii* o *Bacillus subtilis* [9]. Todas ellas son capaces de favorecer la precipitación de carbonato cálcico y tolerar el elevado pH del hormigón si se protegen adecuadamente.

Esta protección puede ser nativa (usando esporas en lugar de células vegetativas) o bien mediante diversos métodos de encapsulado o protegida en áridos porosos como perlita o arlita [10]. Sin embargo, la elaboración de estos áridos porosos conlleva someterlos a altas temperaturas (superiores a 1000 °C), lo que incrementa la ya elevada huella de carbono del hormigón.

Por esta razón, algunos investigadores han propuesto el empleo de residuos de diversas industrias como agente portador para los microorganismos, aprovechando tanto su porosidad como su valor medioambiental al reducir la generación de desechos. Ejemplos de estos materiales de reemplazo incluyen el árido reciclado de hormigón [11], ceniza de fondo [12], restos de neumáticos [13] o ceniza de madera quemada [14].

Este estudio utiliza ceniza de madera proveniente de residuos de la industria maderera local como soporte para bacterias, incorporándola como sustituto parcial del árido en los morteros. Esta estrategia reduce el uso de recursos naturales y evita que estos desechos terminen en vertederos. Además, se evalúa el comportamiento de los morteros bajo diferentes condiciones de curado, simulando variaciones de temperatura y pH, con el objetivo de determinar la eficiencia del sellado tanto en condiciones de laboratorio como en escenarios más representativos de las condiciones reales de servicio.

2. Material y métodos

2.1 Materiales empleados

En la elaboración de los morteros se utilizó una arena dolomítica 0/4 combinada con ceniza de madera procedente de la combustión de cortezas y residuos de la industria maderera local. La ceniza presentaba un amplio rango de tamaño de partícula, por lo que se sometió a un proceso de tamizado utilizando un tamiz de 4 mm, obteniendo así un material con tamaño máximo equivalente al de la arena natural empleada. El material resultante, denominado arena de biomasa, posee por tanto un rango de partículas de 0/4 mm, densidad específica de 1.14 g/cm³ y una alta absorción del 36 % a 24h. Esta alta capacidad de absorción de la arena de biomasa la convierte en un soporte

potencialmente adecuado para albergar microorganismos.



Figura 1. Muestra de arena de biomasa

Como microorganismo, en este estudio se emplearon esporas de la bacteria *B. subtilis* (ATCC 6633), obtenidas de la colección de bacterias de la Universidad de Santiago de Compostela. Las esporas se produjeron mediante un método de carencia de nutrientes, el cual favorece su formación frente al desarrollo de células vegetativas. El proceso de preparación de las esporas comenzó inoculando placas de TSB (Trypticasein Soy Broth) con agar, utilizando una suspensión de bacterias vivas. Las placas fueron incubadas a 37 °C durante un período de 7 días, tras el cual las esporas fueron recolectadas de las placas y transferidas a tubos estériles con agua destilada. Posteriormente, los tubos se sometieron a centrifugación a 5000 g durante 10 minutos, permitiendo separar las esporas del agua, para su posterior almacenamiento en frío hasta el momento de su uso.

Para verificar la eficiencia del proceso de esporulación, se utilizó el método de tinción con verde malaquita. Este procedimiento permite diferenciar las esporas, que se tiñen de verde, de las células vegetativas residuales, que se tiñen de rojo al utilizar safranina como contraste.

Para cuantificar la concentración de esporas en la suspensión, se determinó su densidad óptica a una longitud de onda de 600 nm, estableciendo una relación entre la absorbancia medida y la concentración de

esporas en un volumen dado. El rango final de trabajo para los morteros fue ajustado a una concentración de 10^6 a 10^7 esporas/cm³ de mortero.

En cuanto a los materiales convencionales utilizados, el mortero fue preparado con un cemento CEM I 52.5 SR5, al que se añadió un filler calizo comercial. Además, para optimizar la acción de las bacterias y proporcionar una fuente de calcio necesaria para la precipitación de carbonato cálcico, se incorporó lactato de calcio en la mezcla con microorganismos. Este compuesto fue dosificado en un porcentaje equivalente al 2% de la masa del cemento.

2.2 Preparación de morteros

Se elaboraron dos morteros. En primer lugar, un mortero convencional con una relación agua/ligante de 0.4 y una relación árido/ligante de 0.97, en el que la arena de biomasa sustituyó al 30% en volumen del árido natural. Este porcentaje de reemplazo se seleccionó en base a lo observado en el trabajo de Rodríguez-Álvaro *et al.* [15]. En segundo lugar, un mortero que parte del mismo mortero convencional, pero se le añade lactato de calcio a una concentración del 2% de la masa del cemento y las bacterias previamente preparadas.

2.3 Programa experimental

Se seleccionaron cinco condiciones de curado distintas para evaluar su efecto en los morteros estudiados: para analizar el efecto de la temperatura se utilizaron tres temperaturas de curado diferentes, 10 °C, 22 °C (temperatura ambiente de laboratorio) y 35 °C; para evaluar el efecto de ciclos sucesivos de exposición se aplicaron ciclos de inmersión en agua a 22 °C durante 4 días, seguidos de 3 días de secado al aire; finalmente, para simular ambientes ácidos se empleó agua carbonatada comercial.

Se analizaron tres propiedades de los morteros: resistencia a compresión, capilaridad e índice de sellado. La resistencia a compresión fue

evaluada tras 28 y 60 días de curado en cada una de las condiciones seleccionadas empleando probetas prismáticas de $160 \times 40 \times 40$ mm ensayadas por triplicado según las especificaciones de la norma UNE-EN 196-1. Para el análisis de la absorción por capilaridad se siguió la norma UNE 83982 utilizando fragmentos cilíndricos de probeta de 10 cm de diámetro y 10 cm de altura, tres por cada tipo de mortero y condición de curado. Inicialmente, las probetas fueron sometidas a un curado en agua a temperatura ambiente durante 7 días y posteriormente se trasladaron a las distintas condiciones de curado durante 28 días. Finalizado este periodo, las probetas fueron introducidas en una estufa a 50°C hasta alcanzar masa constante, definida como una variación inferior al 0.1% entre dos pesadas consecutivas separadas por 24 horas.



Figura 2. Probetas empleadas en ensayo de capilaridad

Una vez alcanzada la masa constante, las probetas se sellan en sus caras laterales con resina, dejando expuestas únicamente las caras inferior y superior. Tras el secado completo de la resina, las probetas se sumergen en una fina lámina de agua de 1 cm de altura apoyadas sobre una rejilla. Las probetas son retiradas y pesadas en intervalos de 10 minutos durante la primera hora, posteriormente a las 2, 4, 8 y 24 horas, y cada 24 horas hasta completar 7 días. Con el aumento de peso registrado en cada intervalo se calcula la absorción por capilaridad, y mediante el modelo de Hall [16] se determina el coeficiente de absorción capilar.

Por último, el índice de sellado se calcula utilizando probetas de mortero de $160 \times 40 \times 40$ mm a las que se han incorporado fibras metálicas para inducir fisuras controladas sin fracturar completamente la probeta. Las fisuras se generan mediante carga a flexión a una velocidad de 0.1 mm/s. Una vez abiertas, las fisuras se dividen en 10 secciones de 4 mm, descartando las dos secciones de los extremos debido a posibles desperfectos. Se toma una fotografía de cada sección mediante el microscopio óptico DinoLite y se mide el ancho de cada sección, clasificándolas en tres grupos según el rango de ancho: 150 a 200 μm , 200 a 300 μm y 300 a 350 μm . Además, se mide el área de la fisura en cada sección con el software ImageJ. Tras este análisis inicial, las probetas se someten a sus respectivas condiciones de curado durante 60 días, con una medición intermedia realizada al día 28. Para calcular el índice de sellado, se determina la diferencia entre el área inicial y el área final de la fisura, dividiendo este valor entre el área inicial para obtener un porcentaje representativo del sellado logrado.

3. Resultados y discusión

3.1 Resistencia a compresión

En la **Figura 3** se presentan los resultados de resistencia a compresión a 28 días. Estos resultados muestran como para todas las condiciones de curado, la inclusión de lactato de calcio y bacterias mejora la resistencia a compresión. Las diferencias más significativas se observan en las temperaturas de 10°C y 35°C , donde la resistencia aumentó un 33% y un 37% respectivamente, en comparación con los morteros de referencia. A temperatura ambiente (22°C), el incremento fue más moderado, alcanzando un 5%. En condiciones de curado de ciclos y agua carbonatada la resistencia experimentó incrementos del 14% y 6%, respectivamente, al incorporar bacterias y lactato de calcio.

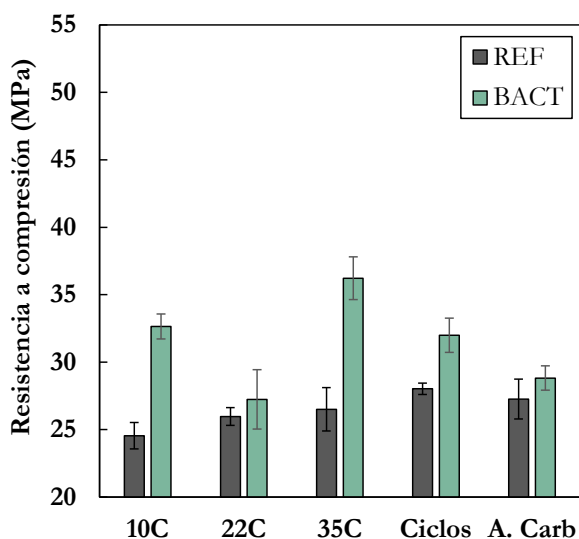


Figura 3 Resistencia a compresión (MPa) a 28 días

A continuación, en la **Figura 4** se presentan los resultados de resistencia a compresión a 60 días. En todas las condiciones de curado, los morteros con bacterias y lactato de calcio continúan mostrando mayores valores de resistencia a compresión que los de referencia. Sin embargo, las diferencias son menos pronunciadas que las observadas a 28 días, salvo en el caso del curado a 35 °C cuya resistencia se incrementa en un 35% al incorporar bacterias.

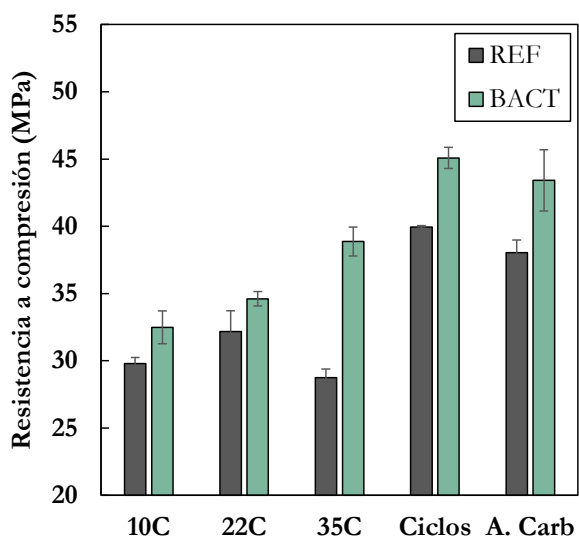


Figura 4 Resistencia a compresión (MPa) a 60 días

Los morteros curados en agua carbonatada experimentan un aumento del 14% de su resistencia al incorporar bacterias y del

13% si se someten a ciclos de inmersión y secado.

Al comparar los resultados entre las distintas edades en probetas curadas a 10 °C, se observa que el mortero BACT prácticamente mantiene el mismo valor de resistencia a compresión a 28 que, a los 60 días, mientras que el mortero de referencia muestra un aumento del 20% en este periodo. Esto sugiere que, la adición de lactato de calcio y bacterias reduce la velocidad de ganancia de resistencias asociada con temperaturas bajas.

3.2 Sellado de fisuras

En la **Figura 5** se presentan los índices de sellado a 28 días para cada condición de curado y los diferentes anchos de fisura analizados. Los resultados muestran que, salvo en el caso del curado a 35 °C, el mortero con lactato de calcio y bacterias presenta una mejora en la capacidad de sellado en comparación con el mortero de referencia para todos los rangos de fisura. En el caso de curado con agua carbonatada y ciclos de inmersión y secado los porcentajes de sellado son bajos para ambos tipos de mortero, aunque por motivos distintos.

En los morteros curados en agua carbonatada, aunque esta contiene una mayor cantidad de bicarbonatos que el agua convencional, dichos compuestos parecen inhibir o bien el proceso de precipitación de carbonato de calcio o bien su adhesión a las paredes de las fisuras, lo que impide un sellado efectivo. En el caso de los ciclos de inmersión y secado, la falta de consolidación del carbonato cálcico se atribuye al movimiento continuo de las probetas entre ciclos, que provoca la pérdida del material precipitado en el agua en lugar de permitir que este selle adecuadamente las fisuras. Futuros análisis químicos de las aguas de curado serán necesarios para poder definir en mayor profundidad las causas.

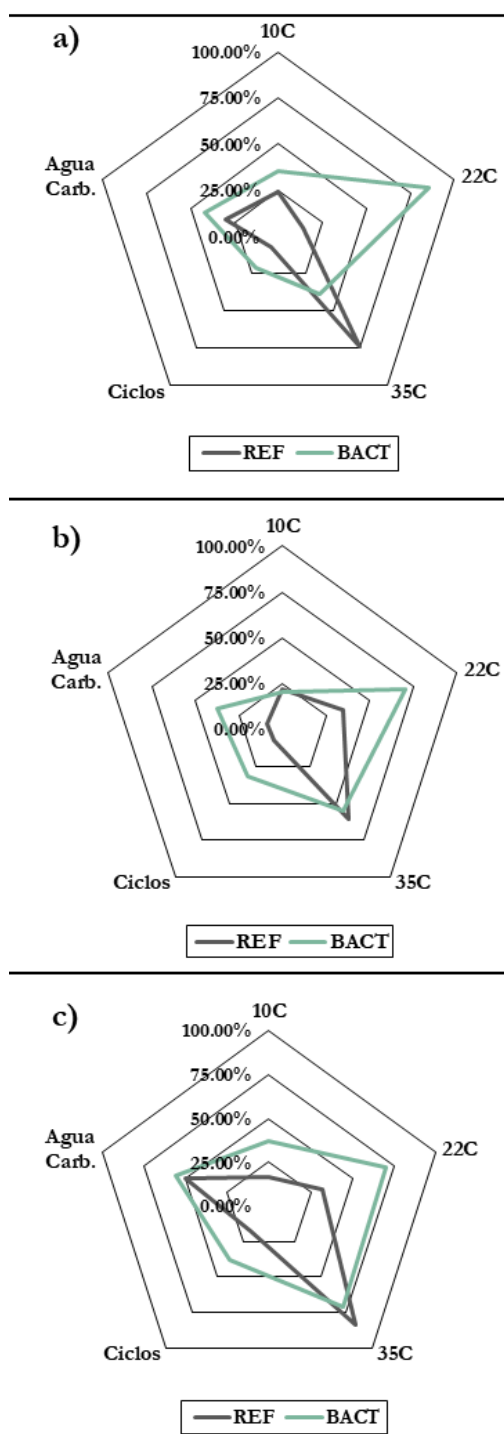


Figura 5 Índice de sellado tras 28 días de curado siendo: a) fisuras de 150-200 μm , b) fisuras de 200-300 μm y c) fisuras de 300-350 μm

En cuanto a la relación entre el tamaño de la fisura y el grado de sellado, los resultados a 28 días no muestran una relación directa para ninguno de los dos morteros, por lo que se puede concluir que el tamaño de la fisura no parece ser una característica significativa a la hora de determinar el grado de sellado alcanzado bajo estas condiciones.

Los resultados a 60 días se presentan en la Figura 6. En ellos se puede apreciar una clara mejoría en cuanto al sellado de fisuras.

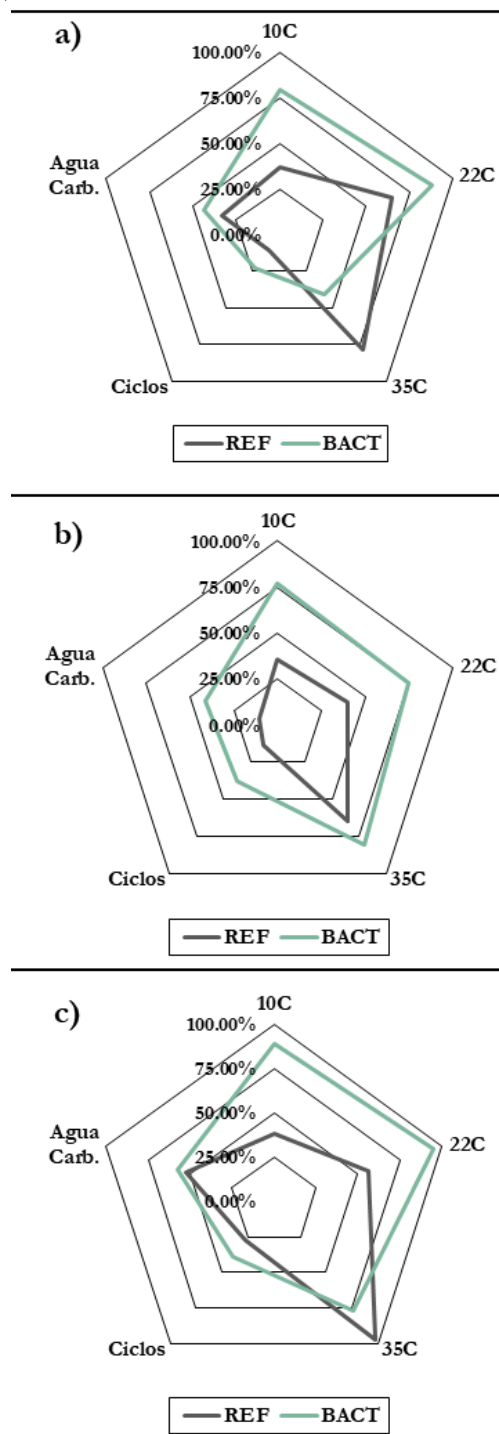


Figura 6 Índice de sellado tras 60 días de curado siendo: a) fisuras de 150-200 μm , b) fisuras de 200-300 μm y c) fisuras de 300-350 μm

A 60 días, en cambio, sí se muestran diferencias significativas con relación al tamaño de las fisuras, especialmente en el mortero BACT. Las fisuras de mayor tamaño presentan un mayor grado de sellado en comparación con

las más pequeñas. Esto se debe a que, aunque la cantidad de material necesario para sellar es mayor, la mayor apertura facilita la entrada de oxígeno y agua al interior de la fisura, lo que favorece una mayor precipitación de carbonato de calcio por parte de las bacterias.

En cuanto a las condiciones de curado, nuevamente las más desfavorables son los ciclos de inmersión y secado, así como el curado en agua carbonatada, donde se observan índices de sellado por debajo del 50% en prácticamente todos los rangos de ancho de fisura y tipos de mortero.

A temperaturas bajas, a diferencia de lo observado en la resistencia a compresión, el sellado en el mortero BACT muestra una clara mejoría en las lecturas a 60 días en comparación con las de 28 días. Esto indica que el curado a 10 °C afecta principalmente a la velocidad de sellado, ralentizando la precipitación de CaCO_3 , pero no su resultado final a 60 días, puesto que se logran valores de sellado muy similares a los obtenidos a temperatura ambiente.

En el caso del curado a 35 °C, al igual que a los 28 días, el mortero de referencia presenta un mejor desempeño en el sellado frente a las otras condiciones de curado. Este desempeño no es igualado por el mortero BACT, siendo esta la única condición en la que la incorporación de lactato de calcio y bacterias no aporta una mejora en el índice de sellado.

3.3 Capilaridad

Los resultados de absorción capilar durante las primeras 24 horas, junto con las curvas ajustadas al modelo de Hall, se representan en las **Figura 7** y **Figura 8** para los morteros REF y BACT, respectivamente. En ambos casos, se observa que el curado a 35 °C presenta las menores absorciones por capilaridad, mientras que el curado a 10 °C muestra las mayores, tanto para los morteros REF como los BACT. Esto evidencia que el curado a bajas temperaturas genera un mortero con una mayor red de capilares, resultado de un

proceso de hidratación menos eficiente en comparación con el producido a temperaturas más altas. Por otro lado, las condiciones de curado en ciclos de inmersión y secado o en agua carbonatada no parecen introducir variaciones significativas en esta propiedad, ya que las curvas obtenidas son prácticamente superpuestas para ambos tipos de mortero.

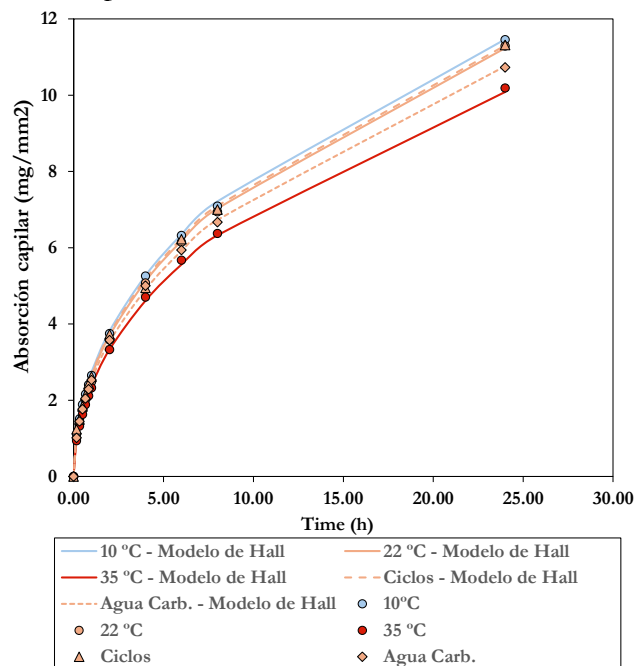


Figura 7 Absorción capilar de los morteros REF

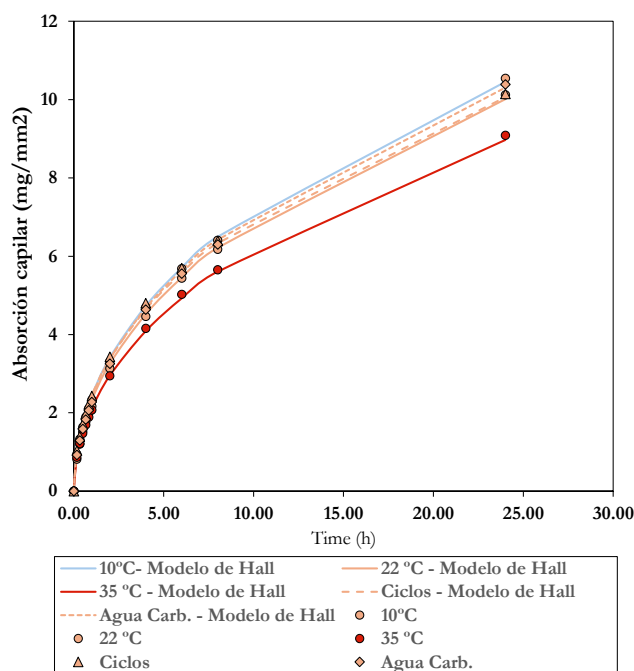


Figura 8 Absorción capilar de los morteros BACT

En la siguiente figura (Figura 9) se representa la variación en la absorción de agua por capilaridad del mortero BACT respecto al mortero REF hasta los 7 días.

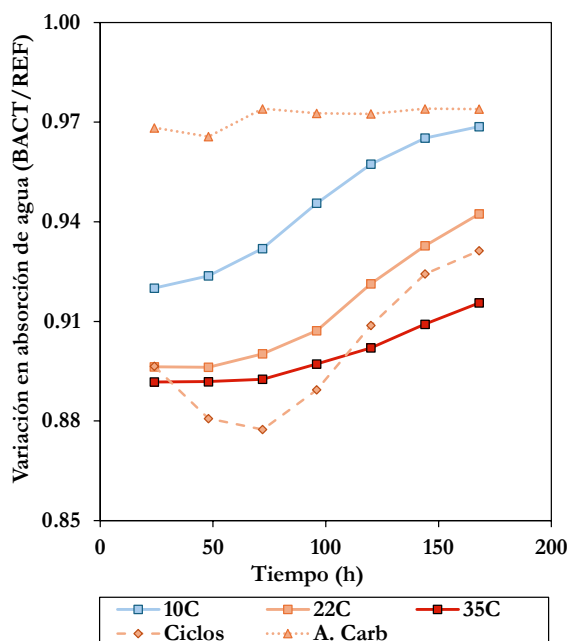


Figura 9 Variación de absorción capilar del mortero BACT con respecto a REF

La gráfica muestra como en todas las condiciones de curado, las muestras de BACT obtienen lecturas inferiores de absorción capilar, sobre todo en los primeros días del ensayo. Esto demuestra como el efecto de la acumulación de carbonato cálcico precipitado por la acción de los microorganismos dificulta la entrada de agua en los morteros. La condición de curado que más beneficia en esta propiedad al mortero BACT es el curado a 35 °C en el que tanto el resultado inicial del ensayo como tras una semana de absorción presenta los menores valores de todas las condiciones de curado analizadas. Las muestras a temperatura ambiente y a 10°C siguen un comportamiento similar, con una menor diferencia entre morteros en las muestras curadas a 10 °C. Este efecto se atribuye a una ralentización del proceso de germinación debido a la baja temperatura, lo que se traduce en menor cantidad de carbonato cálcico precipitado y una mayor absorción de agua.

Las muestras sometidas a agua carbonatada comienzan de manera similar al

resto de condiciones, pero a partir de las 24h se comportan prácticamente igual en ambos morteros, con diferencias en torno al 3% entre ellos.

Por último, en la **Tabla 1** se presentan los coeficientes de absorción capilar calculados mediante el Modelo de Hall. Estos resultados muestran nuevamente que los coeficientes de los morteros BACT son inferiores a los de los morteros REF en todas las condiciones de curado. Además, se observa una disminución de los valores en los curados a 35 °C y un aumento en los curados a 10 °C, lo que refleja el efecto de la temperatura en esta propiedad de los morteros. Los curados en ciclos de inmersión y secado, así como en agua carbonatada, presentan coeficientes similares a los obtenidos a temperatura ambiente, sin diferencias significativas entre ellos.

Tabla 1 Coeficiente de absorción capilar

Condición de curado	REF	BACT
10 °C	2.84	2.52
22 °C	2.75	2.41
35 °C	2.48	2.19
Ciclos	2.79	2.43
Agua Carb.	2.63	2.50

4. Conclusiones

En este estudio se evaluó el comportamiento de morteros elaborados con bacterias, lactato de calcio y arena de biomasa bajo distintas condiciones de curado (10 °C, 22 °C, 35 °C, ciclos de inmersión y secado, y agua carbonatada). Se analizaron la resistencia a compresión, la capacidad de autosellado de fisuras y la absorción capilar para determinar la efectividad de la incorporación bacteriana en función de cada entorno de curado.

En lo referente a la resistencia a compresión, la temperatura jugó un papel determinante. A 35 °C, la incorporación de microorganismos mostró mejoras sostenidas a

28 y 60 días, con incrementos de hasta 37% respecto al mortero de referencia. A 10 °C, aunque se obtuvo un aumento notable del 33% a 28 días, la resistencia apenas varió al prolongar el curado hasta los 60 días, en contraste con el mortero de referencia que registró un 20% adicional en ese periodo. A 22 °C, los beneficios fueron más moderados (5%), reflejando que las condiciones de curado a temperaturas intermedias son menos sensibles a la acción de las bacterias.

En el caso del autosellado, los resultados difieren según la temperatura y la naturaleza del medio. A 10 °C, el sellado de fisuras en el mortero BACT mejoró claramente entre los 28 y 60 días, sugiriendo que, aunque la baja temperatura ralentiza el proceso de precipitación de carbonato de calcio, no limita su efectividad final. A 35 °C el mortero de referencia presentó un mayor índice de sellado, situándose como la única condición donde el mortero BACT no superó la mezcla de referencia. Los ciclos de inmersión y secado y el curado en agua carbonatada fueron menos favorables, con índices de sellado generalmente por debajo del 50%.

En cuanto a la absorción capilar, la temperatura de 35 °C produjo los morteros con menor absorción entre todas las condiciones analizadas. A 10 °C se generó una mayor red capilar en ambos morteros, con un mejor comportamiento relativo del mortero BACT, sobre todo en las primeras 24 horas.

Para una comprensión más detallada de los mecanismos que operan bajo cada condición y en cada tipo de mortero, se requieren análisis químicos adicionales que permitan identificar y describir los procesos específicos involucrados.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el marco de los siguientes proyectos: Eco3DConcrete: Diseño de hormigón más sostenible para impresión 3D basado en la reología y control de propiedades a muy cortar

edades [PID2020-115433RB-I00], PREHEALING: Diseño de prefabricados de hormigón empleando estrategias sostenibles de auto reparación para incremento de su vida útil [PDC2021-121660-I00] y 3DHealConcrete: Aprovechamiento de sinergias entre las tecnologías de impresión 3D y estrategias de autorreparación con bacterias para el diseño de hormigones sostenibles y durables [TED2021-129757B-I00]. Además, los autores desean agradecer a la Xunta de Galicia (España) su apoyo financiero a través de su programa de contratos, así como al Departamento de Microbiología de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) por su colaboración y asesoramiento en la obtención y manejo de los microorganismos utilizados en este trabajo.

5. Bibliografía

- [1] Y. Elmenshawy, M.A.R. Elmahdy, M. Moawad, A.A. Elshami, S.S.E. Ahmad, K. Nagai, Investigating the bacterial sustainable self-healing capabilities of cracks in structural concrete at different temperatures, *Case Stud. Constr. Mater.* 20 (2024) e03188. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03188>.
- [2] A. Al-Tabbaa, C. Litina, P. Giannaros, A. Kanellopoulos, L. Souza, First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete, *Constr. Build. Mater.* 208 (2019) 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>.
- [3] N. De Belie, J. Wang, Z.B. Bundur, K. Paine, *Bacteria-based concrete*, Elsevier Ltd, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00019-8>.
- [4] B. Balzano, J. Sweeney, G. Thompson, C.L. Tuínea-Bobe, A. Jefferson, Enhanced concrete crack closure with hybrid shape memory polymer tendons, *Eng. Struct.* 226 (2021) 111330.

- <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111330>.
- [5] A. Gojević, V. Ducman, I.N. Grubeša, A. Baričević, I.B. Pečur, The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-healing and permeability of concrete, *Materials (Basel)*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14081860>.
- [6] Y. Javeed, Y. Goh, K.H. Mo, S.P. Yap, B.F. Leo, Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties, *J. Mater. Res. Technol.* 29 (2024) 2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.261>.
- [7] T. Zhu, M. Dittrich, Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review, *Front. Bioeng. Biotechnol.* 4 (2016) 1–21. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004>.
- [8] B. Yilmazer Polat, M. Uysal, Bacterial crack healing in metakaolin based geopolymer mortars, *J. Build. Eng.* 39 (2021) 102291. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102291>.
- [9] M. Rauf, W. Khaliq, R.A. Khushnood, I. Ahmed, Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 119578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578>.
- [10] B. Baby, T. Palanisamy, An experimental investigation on mitigating cracks and augmenting the endurance of concrete structures in marine environment by bio-mortar immobilised with halophilic bacteria, *Constr. Build. Mater.* 414 (2024) 134834. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134834>.
- [11] Z. Duan, Z. Lv, J. Xiao, C. Liu, X. Nong, Study on the Performance of Recycled Coarse and Fine Aggregates as Microbial Carriers Applied to Self-Healing Concrete, *Materials (Basel)*. 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16062371>.
- [12] H. Kim, H. Son, J. Seo, H.K. Lee, Impact of bio-carrier immobilized with marine bacteria on self-healing performance of cement-based materials, *Materials (Basel)*. 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13184164>.
- [13] H. Xu, J. Lian, M. Gao, D. Fu, Y. Yan, Self-healing concrete using rubber particles to immobilize bacterial spores, *Materials (Basel)*. 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12142313>.
- [14] H.W. Kua, S. Gupta, A.N. Aday, W. V. Srubar, Biochar-immobilized bacteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles, *Cem. Concr. Compos.* 100 (2019) 35–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.017>.
- [15] R. Rodríguez-Álvaro, B. González-Fonteboa, S. Seara-Paz, A.J. Tenza-Abril, Wood ash versus expanded clay aggregate as internal curing water reservoirs in high performance concrete, *Mater. Struct. Constr.* 55 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01963-3>.
- [16] C. Hall, C. Hall, Water sorptivity of mortars and concretes: A review, *Mag. Concr. Res.* 41 (1989) 51–61. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>.