

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Biotecnología

EMPLEO DE ÁRIDO RECICLADO PROCEDENTE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE ECO-MATERIALES AUTORREPARABLES BASADOS EN LA INCORPORACIÓN DE BACTERIAS PRECIPITADORAS DE CARBONATO DE CALCIO (MICP)

Autor/es: Inés Castejón García

ANEXO IX

Título del Trabajo: EMPLEO DE ÁRIDO RECICLADO PROCEDENTE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE ECO-MATERIALES AUTORREPARABLES BASADOS EN LA INCORPORACIÓN DE BACTERIAS PRECIPITADORAS DE CARBONATO DE CALCIO (MICP).

Este trabajo ha sido realizado en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid (España) y en la Universidad Europea de Madrid.



Tutor/es externos: Eloy Asensio de Lucas, Ana María Moreno de los Reyes

Tutora Interna: Mónica Martínez Martínez

ÍNDICE

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	6
3. MATERIALES y MÉTODOS.....	7
3.1 Materiales	7
3.2 Técnicas instrumentales.....	8
3.2.1 Fluorescencia de rayos X.....	8
3.2.2 Microscopía óptica.....	8
3.3 Metodologías de ensayo	8
3.3.1 Cultivo de bacterias	8
3.3.2 Ensayos en pastas de cemento	10
3.3.3 Ensayos en morteros.....	11
3.3.4 Pruebas de impresión 3D.....	15
4. RESULTADOS y DISCUSIÓN	16
4.1 Cultivo de bacterias	16
4.2 Ensayos en pastas.....	17
4.2.1 Agua de consistencia normal.....	17
4.2.2 Fraguado	17
4.3 Ensayos en morteros con arena normalizada	18
4.3.1 Estado en fresco del mortero	18
4.3.2 Evaluación del comportamiento mecánico	18
4.4 Ensayos en morteros con árido reciclado.....	20
4.4.1 Estado fresco.....	20
4.4.2 Comportamiento mecánico	20
4.4.3 Evaluación de autorreparación mediante ensayos de absorción total de agua	21
4.4.4 Seguimiento de autorreparación mediante microscopía óptica.....	24
4.5 Impresión 3D del eco-material autorreparable	26
5. CONCLUSIONES	29
6. LÍNEAS FUTURAS	29
7. BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXO I: ABREVIATURAS	32
ANEXO II: DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TRABAJO FIN DE GRADO	33

RESUMEN

Título

EMPLEO DE ÁRIDO RECICLADO PROCEDENTE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) EN EL DISEÑO Y DESARROLLO DE ECO-MATERIALES AUTORREPARABLES BASADOS EN LA INCORPORACIÓN DE BACTERIAS PRECIPITADORAS DE CARBONATO DE CALCIO (MICP)

Resumen

Los materiales base-cemento autorreparables representan una innovación en el ámbito de la construcción, diseñados para reparar daños como grietas, fisuras o rupturas, con mínima o nula intervención externa. Este tipo de materiales se plantean como una solución eficiente y sostenible, frente a las limitaciones de durabilidad que presenta el hormigón bajo determinadas condiciones de servicio. El desarrollo de materiales funcionales que combinan la capacidad de repararse de forma autónoma, mediante bacterias precipitadoras de carbonato cálcico, junto con el uso de áridos reciclados, son alternativas idóneas para avanzar en las metas de descarbonización y economía circular en el sector de la construcción.

En el presente estudio, se diseñó un mortero en el que se sustituyó parcialmente el árido natural, por un árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición (RCD) y en el que se incorporaron distintas cepas bacterianas (*Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis* y *Sporosarcina pasteurii*), dotando al material de capacidad autorreparadora. Dichas cepas fueron seleccionadas por su capacidad de sobrevivir en los entornos altamente alcalinos característicos de este tipo de materiales. Se analizaron propiedades del material en estado fresco (reología) y endurecido (resistencias mecánicas). Además, se evaluó la capacidad del material para restaurar el daño causado por grietas o fisuras, mediante metodologías no destructivas como la microscopía óptica y ensayos de absorción de agua.

Los resultados obtenidos muestran el buen comportamiento de los materiales diseñados con la incorporación de RCD y bacterias.

Palabras Clave

Autorreparación; RCD; MICP; *Bacillus cereus*; *Bacillus subtilis*; *Sporosarcina pasteurii*

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en el panorama moderno debido a su versatilidad, resistencia mecánica y bajo coste siendo así el pilar fundamental de la infraestructura civil contemporánea. No obstante, pese a sus numerosas ventajas, el hormigón presenta una durabilidad limitada en determinados ambientes agresivos lo que disminuye su funcionalidad. Esta problemática, viene derivada de la aparición de grietas, que pueden ser generadas por diversos factores como la retracción por secado del material, cargas mecánicas excesivas, ciclos térmicos, reacciones químicas internas o cambios bruscos del medio ambiente. Estas grietas facilitan la entrada de agua, oxígeno, cloruros y/u otros agentes, dando lugar a diferentes procesos (corrosión de la armadura de acero, carbonatación o procesos expansivos entre otros) que pueden desembocar en fallos de las estructuras [1,2].

Esta situación obliga a actividades de intervención, rehabilitación y en último caso, demolición y sustitución por estructuras nuevas lo que deriva en consumo de materiales, coste adicional y discontinuidad en el servicio. Es conocido que, si somos capaces de incrementar un 50% la vida útil de una estructura, seremos capaces de disminuir en un 14% las emisiones de CO₂ a la atmósfera debidas a la producción de hormigón [3]. Por tanto, la prolongación de la vida útil de las estructuras se presenta como una estrategia efectiva para mitigar impactos ambientales, económico y sociales.

Por esto en los últimos años, los científicos encargados del diseño y desarrollo de materiales han centrado sus investigaciones en el desarrollo de nuevos materiales de construcción “inteligentes”, capaces de autorrepararse. Este interés creciente se muestra en la Figura 1, donde se puede observar el incremento exponencial del número de publicaciones científicas dedicadas a esta temática [3].

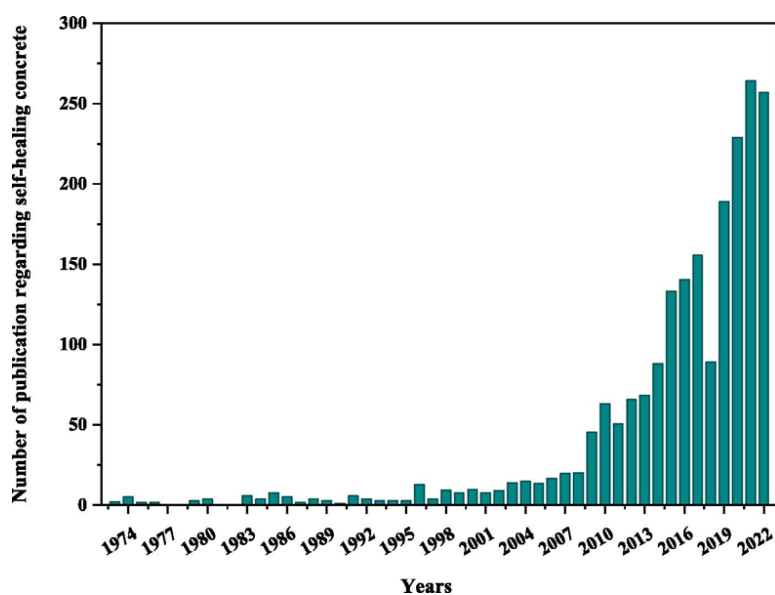


Figura 1. Incremento de publicaciones científicas sobre materiales autorreparables con el paso del tiempo [3]

Otro reto importante es la necesidad de llevar a cabo más estudios para poder comprender en profundidad los mecanismos biogeoquímicos involucrados en la precipitación inducida de carbonato de calcio, así como para optimizar la eficiencia y reproducibilidad del proceso.

A través de una revisión crítica de la literatura científica y el análisis de estudios experimentales, se pretende ofrecer una visión integral sobre el estado actual y el futuro de esta nueva tecnología dentro del contexto de la construcción sostenible y duradera. En este sentido, se alinea directamente con varios puntos de la Agenda 2030 y el Pacto Verde Europeo: [10,11].

- ✓ ODS 9 (industria, innovación e infraestructura): fomenta la innovación en materiales para infraestructuras resilientes.
- ✓ ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles): contribuye a edificaciones más duraderas y seguras.
- ✓ ODS 12 (Producción y Consumo Responsable): promueve el uso eficiente de recursos y la reducción del impacto ambiental.
- ✓ Pacto Verde Europeo: impulsa la economía circular, la eficiencia energética en la construcción.

En el presente trabajo, con la finalidad de conocer la influencia que tienen las bacterias en la capacidad de autorreparación de los materiales base-cemento, se van a estudiar los sistemas más sencillos, basados en cemento y bacterias. La caracterización de los materiales se va a llevar a cabo tanto en pastas de cemento como en morteros.

2. OBJETIVOS

Por todo lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño y desarrollo de un eco-material base-cemento con capacidad de reparación autónoma a partir de bacterias precipitadoras de carbonato cálcico.

Para la consecución de dicho objetivo principal, se llevaron a cabo diferentes objetivos específicos:

- Evaluación de propiedades en estado fresco (demanda de agua, fraguado, densidad y reología) y estado endurecido (resistencias mecánicas a compresión) de los materiales, tanto de referencia como con bacterias que permitan conocer la influencia que tienen diferentes tipos de bacterias en las propiedades físico-mecánicas de los materiales base-cemento.
- Selección de la especie bacteriana más adecuada en función de las propiedades de los materiales.
- Evaluación de la capacidad de autorreparación del material base-cemento en base a metodologías no destructivas (absorción de agua y microscopía óptica).
- Sustitución del 50% del árido natural empleado en estos materiales por árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición (RCD) para dotar a los nuevos materiales diseñados de una mayor sostenibilidad.
- Evaluación de la capacidad del nuevo material desarrollado para ser imprimible en 3D tanto a escala de laboratorio como a escala semi-industrial.

3. MATERIALES y MÉTODOS

3.1 Materiales

Los materiales empleados en la investigación fueron:

- Cemento tipo I - 52,5R (CEM) según normativa europea EN 197-1 [17], suministrado por Cementos Portland Valderrivas (Fábrica “El Alto”). La composición química está basada en óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y azufre principalmente, tal y como se muestra en la Tabla 1.
- Arena normalizada (A.N), natural, de naturaleza silíceo y con un contenido en sílice de al menos un 98% (EN 196-1 [15]). La granulometría se recoge en la Tabla 2.
- Residuos de construcción y demolición (RCD) suministrados por Holcim y procedentes de una de sus plantas de mortero. Se llevó a cabo un cribado del material recibido originalmente para conseguir una granulometría análoga a la de la arena natural normalizada (Tabla 2). La composición química del residuo se muestra en la Tabla 1.
- Aditivo superplastificante (SP) Melflux® suministrado por BASF.
- Sepiolita (Sep) suministrada por SEPIOLSA.

Tabla 1. Composición química del cemento y RCD empleados (% en peso)

	CEM I 52,5R	RCD
SiO ₂	20,08	40,24
CaO	62,48	36,06
K ₂ O	0,96	2,77
Al ₂ O ₃	5,91	6,01
SO ₃	2,98	1,69
Fe ₂ O ₃	2,52	1,54
P ₂ O ₅	0,08	0,13
MGO	0,82	0,94
CL	0,02	0,03
Na ₂ O	0,13	0,66
TiO ₂	0,20	0,25
MNO	0,07	0,03
ZNO	0,07	0,01
SRO	0,05	0,04
ZRO ₂	-	0,01
CR ₂ O ₃	-	0,03
RB ₂ O	-	0,02
PPC	2,00	9,54

* PPC: Pérdida por calcinación a 950°C

Tabla 2. Distribución granulometría de la arena empleada

Dimensión malla tamiz (mm)	Especificación EN 196-1 (%)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

3.2 Técnicas instrumentales

3.2.1 Fluorescencia de rayos X

La caracterización química del cemento y de los residuos de construcción y demolición (RCD) se llevó a cabo mediante fluorescencia de rayos X (FRX). Las muestras se molieron en el molino de ágata hasta obtener un polvo homogéneo con tamaño de partícula inferior a 63 micras antes de su análisis. Para ello se empleó un espectrómetro S8 Tiger de Bruker (IETcc-CSIC).

3.2.2 Microscopía óptica

El microscopio utilizado es un Olympus SZ61/Olympus SC50 (IETcc-CSIC). El propósito de emplear esta técnica en este trabajo es el seguimiento del sellado progresivo de las grietas generadas en las probetas fabricadas.

3.3 Metodologías de ensayo

3.3.1 Cultivo de bacterias

Se seleccionaron tres especies bacterianas: *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*.

En el caso de las especies *B. subtilis* (CECT 39, de la colección española de cultivos de Valencia) y *S. pasteurii* (DSM 33, de la colección de cultivos de Alemania). Se partió de un liofilo que se recuperó siguiendo las instrucciones del proveedor en cada caso. Para la especie *B.cereus* (CECT 131, de la colección española de cultivos de Valencia) se partió de un glicerol conservado a -80°C.

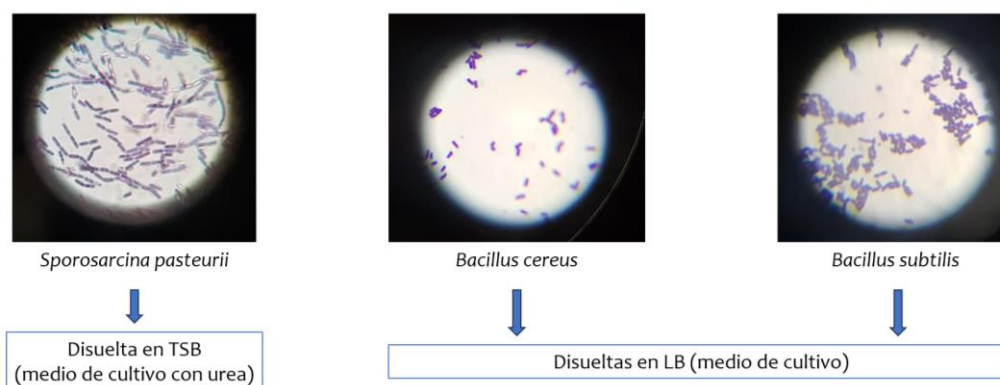


Figura 3: cultivo y tinción Gram de las tres especies bacterianas seleccionadas. Imagen propia.

El proceso de cultivo de *S. pasteurii*, consistió en la inoculación medio TSB (Scharlau) suplementado con urea 5M (Scharlau). Los cultivos se llevaron a cabo mediante incubación a 30°C y con agitación a 200 rpm. En cada caso se realizaron preinóculos que se incubaron toda la noche. Éstos se emplearon para inocular erlenmeyers conteniendo 250ml del medio de cultivo anteriormente mencionado. Los erlenmeyers se incubaron en agitación a 30°C durante 16-18 horas y las bacterias se recuperaron mediante centrifugación a 7.000FCR a 20°C durante 10 minutos.

El pellet obtenido tras la centrifugación se resuspendió en medio TSB/urea a concentración 37g/L para las mezclas de mortero y a concentración 60,29g/L para las mezclas de las pastas.

En relación con los cultivos *B. subtilis* y *B. cereus*, el inicio del cultivo fue diferente para cada especie bacteriana. En el caso de *B. cereus*, se utilizó como punto de partida un preinóculo proveniente de un glicerinado amablemente cedido por el Dpto. de Biociencias de la Universidad Europea de Madrid.

En el caso de *B. subtilis*, el líofilo de la colección se resuspendió en medio de cultivo (LB). El proceso a partir de este paso fue similar al proceso de la especie bacteriana *S. pasteurii*, destacando que la incubación de los erlenmeyers durante 24 horas fue a 35°C. Se obtuvieron falcons con las cantidades de peso húmedo resuspendido en medio de cultivo (LB), anteriormente mencionadas.

En todo momento se estuvieron realizando tinciones gram de los cultivos para comprobar que no existía contaminación y poder proceder con el siguiente paso. Al igual que se hicieron tinciones gram de las bacterias recuperadas del glicerol o de los líofilos en cada caso para comprobar la identidad de las bacterias. En todos los casos, las bacterias eran bacilos gram positivos. El proceso de cultivo se puede ver en la Figura 4.

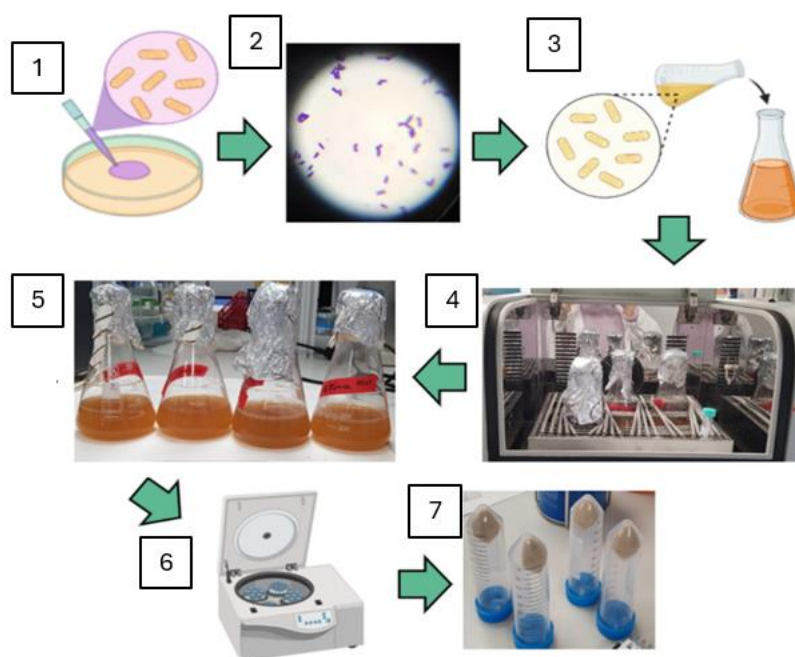


Figura 4: Explicación gráfica del proceso de cultivo de las especies bacterianas (*Bacillus subtilis*, *Sporosarcina pasteurii* y *Bacillus Cereus*). 1. Inoculación en placa para obtención de colonias aisladas, 2. comprobación del crecimiento de bacilos gram positivos en placa, 3. inoculación del medio de cultivo en erlenmeyer, 4. incubación a 37°C, 5. Medida de densidad óptica mediante espectrofotómetro, 6. recuperación de los pellet mediante centrifugación, 7. Pellet resuspendido en medio de cultivo correspondiente a cada especie bacteriana. Algunas imágenes en las que se han usado Biorender y otras imágenes propias.

3.3.2 Ensayos en pastas de cemento

En la ciencia de materiales base-cemento, una pasta, es aquel material formado por cemento y agua. En el caso del presente estudio, se incorporaron además las bacterias en su caldo de cultivo correspondiente (0,41% en peso bacterias/cemento).

El amasado de las pastas de cemento se llevó a cabo siguiendo la normativa europea EN 196-3 [16] de la forma en la que se detalla a continuación:

- 1º Se incorpora el cemento (500 g) y el agua en la amasadora y se mezcla a velocidad lenta ($140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$) durante 90s.
- 2º Se detiene el amasado durante 30s para limpiar paredes y homogeneizar toda la mezcla.
- 3º Se reanuda el amasado durante 90s a velocidad lenta.

El ensayo realizado en las pastas de cemento es el que establece y se encuentra recogido en la normativa europea EN 197-1 [17]: determinación del tiempo de fraguado, es decir, el tiempo que tardan los cementos en endurecer cuando están en contacto con agua. Para la realización de dicho ensayo, era necesario conocer primero el agua de consistencia normal o demanda de agua (agua necesaria para el correcto amasado del cemento), puesto que esa cantidad de agua es la que se iba a emplear para el ensayo mencionado anteriormente (EN 196-3 [16]).

3.3.2.1 Demanda de agua

El procedimiento se llevó a cabo en consonancia con la normativa europea (EN 196-3) [16]: Una vez amasada la pasta de cemento siguiendo la metodología explicada previamente, ésta se colocó en el molde troncocónico, se enrasó y se bajó la sonda hasta que tocó la superficie de la pasta. Se dejó caer y se observó la penetración de dicha sonda (Figura 4). La distancia recorrida debe ser $34 \pm 2 \text{ mm}$ para considerar como correcta el agua de consistencia normal empleada (se realizaron tantas pruebas como fueron necesarias hasta obtener el agua adecuada).

Al incorporar bacterias al amasado, éstas iban disueltas en caldo de cultivo, por lo tanto, fue necesario descontar éste del agua destilada a emplear para el amasado (se añadió primero el caldo de cultivo con las bacterias y posteriormente el agua, para poder arrastrar todo el contenido del falcon).



Figura 5: Demanda de agua, sonda manual apoyada en la superficie y dejando caer para observar la penetrabilidad de la sonda en el material. Imagen propia.

3.3.2.2 Tiempo de fraguado (EN 196-3) [16]

La determinación del tiempo de fraguado se llevó a cabo empleando la pasta de cemento en la que previamente se ha determinado el agua de consistencia normal. Una vez amasada la mezcla, se rellenó el molde interno (Figura 6a) con dicha mezcla y se rellenó el molde externo (Figura 6a) con agua destilada hasta que el molde con la pasta quedó sumergido. El equipo empleado es una aguja de Vicat automática (Figura 6b) que pincha la mezcla en diferentes intervalos de tiempo y va registrando la penetración de la aguja. El fraguado se da por iniciado cuando la aguja penetra 34 mm y se da por concluido cuando la aguja no penetra más 0,5 mm (después de 3 intentos seguidos).

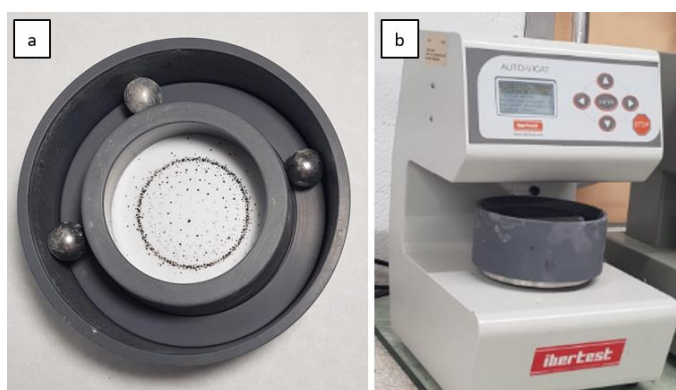


Figura 6: Fraguado. a) molde externo e interno. b) aguja de Vicat automática, donde se puede ver el molde externo conteniendo el molde interno y la pasta, cubiertos por agua destilada. La base gira de tal manera que una vez la aguja ha pinchado en una zona gira para volver a pinchar en otros puntos aleatorios. El objetivo es poder comprobar que toda la masa está fraguada. Imagen propia.

3.3.3 Ensayos en morteros

En la ciencia de materiales base-cemento, un mortero es aquel material que además de cemento y agua, incorpora árido en su composición, y según la normativa europea (EN 196-1 [15]), con tamaño de partícula inferior a 2 mm (arena). En el caso del presente estudio, se incorporaron además las bacterias en su caldo de cultivo correspondiente (0,41% en peso bacterias/cemento). Además, hay que destacar que, en determinadas fases de la investigación, el 50% de la arena normalizada fue sustituida por árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición (RCD).

La formulación general es: 450g de cemento tipo I 52,5R + 1350g de Árido (arena normalizada o RCD) + 225g de H₂O.

De esta forma, la relación cemento:arena es 1:3 y la relación agua:cemento es 0,5.

De forma análoga a como se llevó a cabo en las pastas de cemento, cuando se incorporaron bacterias a la formulación, éstas iban disueltas en caldo de cultivo, por lo tanto, fue necesario descontar éste del agua destilada a emplear para el amasado (se añadió primero el caldo de cultivo con las bacterias y posteriormente el agua, para poder arrastrar todo el contenido del falcon).

El amasado de los morteros se llevó a cabo en consonancia con la normativa europea EN 196-1 [15] de la forma en la que se detalla a continuación:

- 1º Se añade todo el cemento + la mitad del agua (si la mezcla llevase aditivo se adiciona en este paso también) y se agita a velocidad lenta ($140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$) durante 30s.
- 2º Se añade el resto del agua y los 1350g de árido (Arena Normalizada o RCD) se agita durante 30s a velocidad lenta.
- 3º Se cambia a velocidad rápida ($285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$) durante 30s.
- 4º Se deja 90s de reposo para limpiar paredes y homogeneizar toda la mezcla.
- 5º Se vuelve a agitar 60s a velocidad rápida.

La caracterización llevada a cabo en morteros se muestra a continuación:

3.3.3.1 Estudios en estado fresco

- Densidad: Se empleó un recipiente de volumen conocido (1 litro) que se rellenó con el mortero y una vez enrasado, se pesó para conocer la densidad del mortero.



Figura 7: taza de medición de densidad en fresco, con el mortero en su interior y enrasado.
Imagen propia.

- Escurrimiento: una vez se amasó el mortero (EN 196-1) [15] se rellenó el molde troncocónico metálico (Figura 8a) en dos tongadas (porción de material vertido). Entre cada tongada, se deja caer el pisón 10 veces para la compactación de la masa de mortero en el molde. Una vez terminada la compactación de la segunda tongada, se retiró la parte superior del molde y se enrasó la masa de mortero con una espátula (Figura 8b). Una vez enrasado, se retiró lenta y verticalmente el molde (Figura 8c) y se procedió a dar 15 sacudidas a la mesa. Finalizadas las 15 sacudidas, se midieron 3 diámetros de la torta con el calibre (Figura 8d). El dato del escurrimiento fue el promedio de los 3 diámetros medidos y aportó información acerca de la trabajabilidad del mortero, pudiendo compararse con otros morteros.

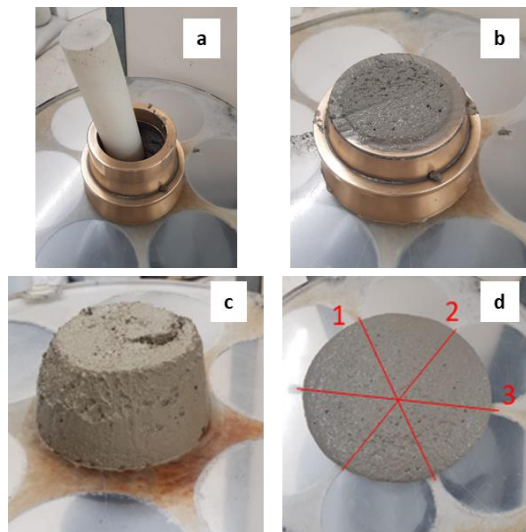


Figura 8: a) relleno molde troncocónico metálico, b) enrasado del cono, c) desmoldado del cono metálico y d) medida de los 3 diámetros necesarios para el escurrimiento. Imagen propia.

3.3.3.2 Obtención de probetas

- Amasado de probetas de mortero: Se realizó en consonancia con la normativa europea EN 196-1 [15]. Se vierte la mitad del mortero en el molde, y con ayuda de una espátula se reparte el contenido. Se tapa el molde y se deja que la compactadora realice 60 sacudidas de forma automática. Posteriormente se añade la otra mitad de la mezcla y se reparte con la espátula más corta, se vuelve a tapar y se vuelven a dar 60 sacudidas. Se saca el molde de la compactadora, se traslada a la zona de trabajo y se deja reposar unos minutos. Tras ese tiempo, se enrasa el molde (Figura 9a).

Para la evaluación de la autorreparación, se pusieron separadores a una distancia equidistante unos de otros para que los cubos fueran lo más parecidos posible (Figura 9b), obteniendo así cubos de 5 x 4 x 4 cm. Por último, se taparon los moldes con un plástico para evitar la evaporación excesiva de agua. Y se dejaron 24 horas fraguando antes de desmoldar.

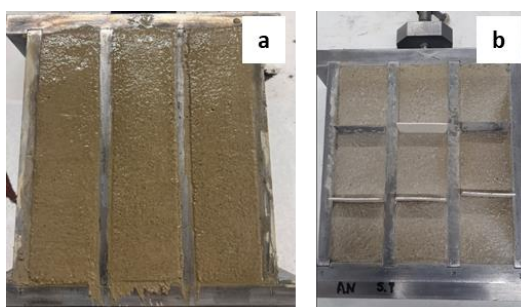


Figura 9: a) moldes enrasados sin separadores y b) moldes enrasados con separadores. Imagen propia.

- Desmoldado de probetas: en primer lugar, se sacaron todos los cubos del molde (Figura 10) y a continuación se procedió a la limpieza y lijado de todas las piezas. Finalmente se montó nuevamente el molde para adicionar el desencofrante (aceite

que se usa para evitar que el mortero fresco se adhiriera al molde) para que el molde quede listo para el siguiente uso. Finalizado el desmoldeo, los cubos obtenidos se introdujeron en los medios de curado (agua para cubos de Referencia, *B. subtilis* y *B. cereus* y para *S. pasteurii* el medio de curado fue agua con urea 5M disuelta). Los cubos se introdujeron en medios de curado para asegurar que el mortero fragua en las condiciones que establece la norma, alcance valores reales de resistencia y pueda ser evaluado de forma realista en el laboratorio.



Figura 10: cubos desmoldados y nombrados. Imagen propia.

3.3.3.3 Estudios en estado endurecido

- Evaluación del comportamiento mecánico: La rotura de los cubos de 4x4x5 cm a compresión se llevó a cabo para edades de curado de 1, 2 y 7 días según las especificaciones de la normativa europea EN 196-1 [15].

A partir de los resultados obtenidos de resistencias mecánicas a compresión, se escogió una de las tres especies bacterianas para realizar el estudio de autorreparación en el que se propuso la sustitución del 50% de Arena Normalizada (A.N) por RCD obteniendo un material base-cemento sostenible con reparación autónoma.

3.3.3.4 Evaluación de la autorreparación:

El esquema general que se ha seguido para la evaluación de la autorreparación se muestra en la Figura 11 y se detalla a continuación:

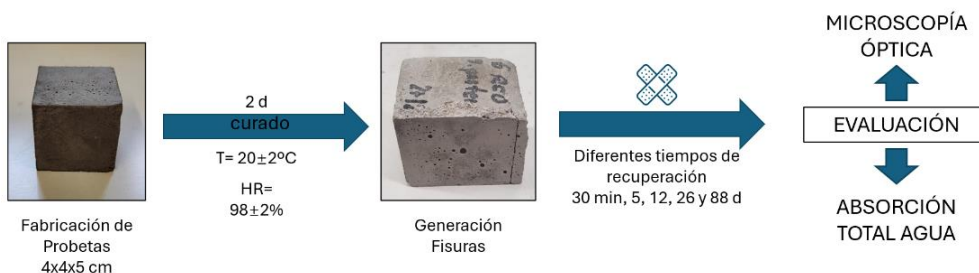


Figura 11: Esquema seguido para la evaluación de la autorreparación. Primero se fabricaron las probetas de donde se obtuvieron los cubos, tras 2 días de curado se sometieron a carga para generar fisuras sin llegar a la carga completa de los mismos. Dichas fisuras se evaluaron a distintos tiempos de recuperación que van desde los 30 min, 5, 12, 26, 88 días y la evaluación no destructiva mediante microscopía óptica y absorción total de agua. Imagen propia.

- Carga de cubos, después de 2 días de curado en agua, para la generación de grietas con la finalidad de poder evaluar la reparación que tuvo lugar gracias a las bacterias incorporadas en los morteros. Para la carga de los cubos, éstos fueron sometidos a compresión hasta la generación de grietas sin llegar a la rotura total de los cubos. Los periodos de reparación fueron de: 30 min, 5, 12, 26 y 88 días. Tiempos a partir de los cuales se llevó a cabo la caracterización.
- Absorción total: se introdujeron los cubos en la estufa a 40°C durante una semana hasta masa constante. Tras ese tiempo transcurrido se sacaron de la estufa y cuando se enfriaron ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) se sumergieron completamente en agua, recogiendo los datos a tiempos: 0, 5, 10, 15, 30 min, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 h y cada 24h hasta completar una semana de ensayo. En este ensayo, fue necesario secar el exceso de agua de todas las caras e intentar pesar las probetas siempre por la misma cara.
- Evaluación de autorreparación de las grietas por microscopía óptica:
Tras la carga de los cubos después de 2 días de haberse fabricado los mismos, se hacen fotos de las grietas recién formadas por la carga de la prensa y se llevó a cabo el seguimiento semanal de las grietas para evaluar su sellado hasta el final del estudio.

3.3.4 Pruebas de impresión 3D

Como objetivo final del presente trabajo se estableció el desarrollo de un material con capacidad autorreparable para impresión 3D que fuese trabajable a nivel laboratorio y que pudiese ser escalado a nivel semi-industrial.

El escalado a nivel semi-industrial se llevó a cabo en una impresora de la casa comercial BeMore3D y tiene las dimensiones que se muestran en la Figura 12.



Figura 12: Impresora 3D donde se llevó a cabo el escalado semi-industrial. Imagen propia.

La boquilla empleada es circular, con un diámetro de 35 mm y la velocidad de impresión fue de 100 mm/s.

Las características que debe tener dicho material se muestran a continuación:

- Extrudabilidad: capacidad del material para extruir de forma uniforme y continua por la boquilla. Una mala extrudabilidad puede causar obstrucciones y defectos en la estructura. Se ensaya previamente en el laboratorio con una pistola de calafateo.
- Continuidad: un material diseñado para impresión 3D debe tener continuidad durante todo el proceso de impresión.
- Edificabilidad: habilidad del material para soportar capas sucesivas sin deformarse. Depende de sus resistencia, adhesión, estabilidad y capacidad para mantener la forma bajo carga.

Para que el material tenga un comportamiento “más fluido” mientras está siendo sometido a un esfuerzo de cizalla (amasado del mortero), es necesario la adición de sepiolita como aditivo reológico para otorgar al mortero de propiedades tixotrópicas, que favorecen la extrudabilidad por la boquilla, y posteriormente la edificabilidad y la retención de forma.

4. RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1 Cultivo de bacterias

Tras realizar una exhaustiva revisión bibliográfica, la mayoría de los científicos que focalizan sus investigaciones en materiales con autorreparación autónoma basada en bacterias centran sus estudios en las especies bacterianas *Bacillus cereus* (CECT 131) y *Bacillus subtilis*, (CECT 39, liófilo) filo Firmicutes, orden *Bacillales*, familia *Bacillaceae*. Por último, la especie bacteriana *Sporosarcina pasteurii* (DSM 33, liófilo) filo Firmicutes, orden *Bacillales*, familia *Planococcaceae*. Dichas especies se escogieron por su capacidad para sobrevivir a pH alcalino (pH característicos de las matrices cementantes) y resistentes a condiciones climatológicas extremas [12, 13].

A pesar de que una vez realizada la revisión bibliográfica se decidió trabajar con *Bacillus subtilis* y con *Sporosarcina pasteurii*, debido a la disponibilidad inmediata de la especie bacteriana *Bacillus cereus* en el laboratorio de la Universidad Europea de Madrid, se incorporó dicha especie a las investigaciones.

Tras la incubación de los distintos cultivos bacterianos, se procedió al análisis mediante densidad óptica de los cultivos por espectrofotómetro para comprobar el correcto crecimiento de las bacterias. Además, se realizó en todo momento tinción gram para comprobar que el cultivo no estaba contaminado.

Posteriormente, se procedió a la centrifugación de los cultivos para obtener pesos húmedos disueltos en sus correspondientes medios de cultivos necesarios para introducirlos en las mezclas de pastas y mezclas de morteros con bacterias.

Los pesos obtenidos fueron de 1,85g disueltos en 50g de caldo de cultivo para los morteros con bacterias y de 2,05g disueltos en 34g de caldo de cultivo para las mezclas de pastas.

La relación bacterias/cemento es de 0,41% en peso y es común para todos los estudios realizados en el presente trabajo [14].

4.2 Ensayos en pastas

4.2.1 Agua de consistencia normal

De acuerdo con el procedimiento experimental explicado anteriormente en el apartado 3.3.2.1, se muestran en la Tabla 3 los resultados obtenidos durante la determinación del agua de consistencia normal.

Tabla 3. Agua de consistencia normal para los cementos estudiados

Muestras	Cantidad de agua (g)	Penetrabilidad (mm)
REF	157	33
<i>B. cereus</i>	157	35
<i>B. subtilis</i>	157	32
<i>S. pasteurii</i>	157	33

Como se puede observar los resultados están dentro del marco de lo esperado puesto que la penetrabilidad es 34 ± 2 mm tal y como se exige en la normativa EN 196-3 [16]. Este resultado dio lugar a una relación agua/cemento (W/C) de 0,314 en peso.

4.2.2 Fraguado

En la Tabla 4 se muestran los tiempos de inicio y final de fraguado obtenidos tanto para la pasta de cemento de referencia como para las pastas de cemento que incorporaron bacterias en su composición.

Tabla 4. Tiempos de inicio y final de fraguado para los cementos estudiados

Fraguado	t INICIO (min)	t FINAL (min)
REF	84	142,2
<i>B. cereus</i>	120	203,4
<i>B. subtilis</i>	125	225
<i>S. pasteurii</i>	295	368

A la vista de los resultados expuestos en la tabla, se puede observar que la incorporación en las formulaciones de las pastas de cemento de bacterias incrementa los tiempos de fraguado. En todos los casos, los tiempos de fraguado obtenidos cumplen con los requerimientos de la normativa europea EN 197-1 [17] (superiores a 45 minutos).

Diversas investigaciones han evidenciado que la incorporación de bacterias como *Sporosarcina pasteurii* y especies del género *Bacillus* puede modificar sustancialmente los tiempos de fraguado y las propiedades reológicas de pastas cementantes. Estudios recientes indican que la presencia de estas bacterias tiende a acelerar el fraguado inicial del cemento, alcanzándose

reducciones significativas, dependiendo del tipo de fuente de calcio empleada [21], característica que no ocurre en el presente trabajo. Asimismo, *S. pasteurii* ha mostrado capacidad para promover una hidratación temprana más activa, aunque este efecto puede verse condicionado por la disponibilidad de un medio de cultivo adecuado [22]. En términos reológicos, la adición de células bacterianas ha evidenciado un aumento tanto en la viscosidad como en el esfuerzo de cedencia de la pasta, lo cual podría incidir en su trabajabilidad [23].

4.3 Ensayos en morteros con arena normalizada

4.3.1 Estado en fresco del mortero

Los resultados de densidades en fresco y escurrimientos para los morteros en los que se empleó arena normalizada se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Densidades y escurrimientos obtenidos para los morteros amasados con arena normalizada

Mortero Arena Normalizada	Densidad (g/L)	Escurrimiento (mm)
REF	1983.9	160.33
<i>B. cereus</i>	1960.2	160.67
<i>B. subtilis</i>	1800	166.33
<i>S. pasteurii</i>	1892.9	164

A la vista de los resultados expuestos en la tabla se observa que la incorporación de bacterias provoca una reducción de la densidad en los morteros amasados, así como un ligero incremento de los escurrimientos lo que deriva en una mayor trabajabilidad de estos.

Estudios recientes reportaron que la adición de bacterias del género *Bacillus* afecta significativamente las propiedades reológicas del mortero, aumentando la fluidez, aunque también elevando la viscosidad y el esfuerzo de cedencia [24]. De manera similar, en otro estudio se encontró que el uso de *S. pasteurii* en la reparación de fracturas de hormigón mejora la densidad y reduce el escurrimiento del mortero, lo que indica una mejor trabajabilidad del material fresco [25]. Estos hallazgos respaldan la idea de que la incorporación de ambas especies bacterianas no solo modifica propiedades físicas como la densidad, sino que también influyen positivamente en la trabajabilidad.

4.3.2 Evaluación del comportamiento mecánico

El estudio de las propiedades mecánicas de los morteros se llevó a cabo para tiempos de curado de 1, 2 y 7 días. Los resultados obtenidos en relación con las resistencias mecánicas a compresión se muestran en la Figura 13.

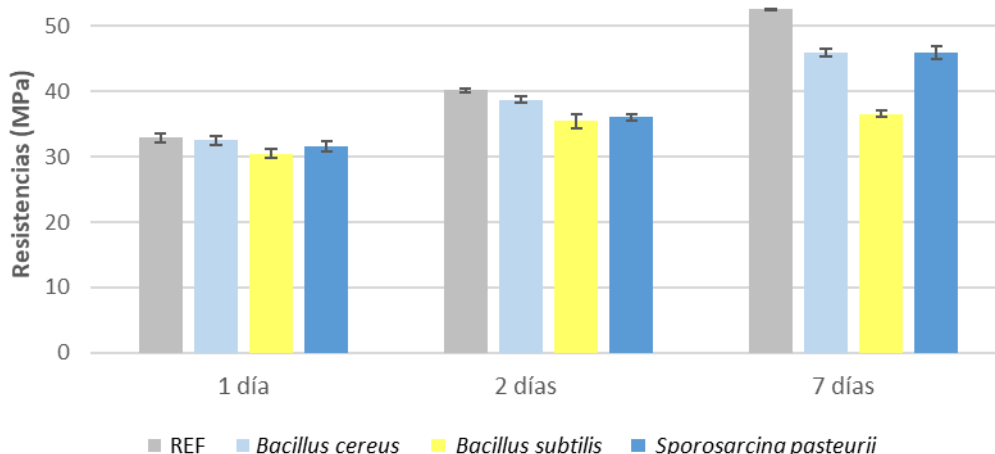


Figura 13: Resistencia mecánica a compresión con arena normalizada a 1, 2 y 7 días donde se comparan los valores obtenidos de la referencia y las 3 especies bacterianas.

En la Figura 13 se observa en primer lugar cómo las resistencias mecánicas a compresión (RMC) de todos los morteros se incrementan a medida que aumenta el tiempo de curado. Es lo esperado, puesto que morteros modificados con bacterias como ocurre en este trabajo, puede verse potenciado por la precipitación de carbonato cálcico, la cual favorece el sellado de fisuras y favorece una mejora en las propiedades mecánicas del material. Por otro lado, hay que destacar que la incorporación de bacterias provoca disminuciones en el comportamiento mecánico en comparación con el mortero de referencia. A pesar de esta disminución, los valores obtenidos de resistencias mecánicas cumplen con la normativa europea EN 197-1 [17], con resistencias a compresión superiores a 30 MPa para tiempos de curado de 2 días.

En contraste, el estudio comparativo realizado en 2018 demostró que la incorporación de bacterias del género *Bacillus*, particularmente *B. subtilis*, y *Sporosarcina pasteurii*, no solo no redujo la resistencia a compresión, sino que la incrementó significativamente, alcanzando hasta un 48 % de mejora en comparación con la referencia [26]. Esta diferencia de comportamiento con respecto al presente estudio podría atribuirse a factores como la concentración bacteriana, las condiciones de curado o la interacción entre los productos y la matriz cementante.

A igualdad de RMC a los 7 días entre las especies bacterianas de *S. pasteurii* y *B. cereus* se seleccionó aquella especie que tenía mejor comportamiento a pH alcalinos, logrando así que dicha especie bacteriana permaneciese durante más tiempo activa en la matriz cementante y haciendo más durable la autorreparación en el tiempo. Se seleccionó la especie *S. pasteurii* ya que reunía las condiciones requeridas para los estudios de autorreparación. Además, en los morteros en los que se incorporó esta especie bacteriana se sustituyó el 50% de la arena normalizada por árido reciclado procedente de RCD aportando una mayor sostenibilidad al material con autorreparación autónoma.

4.4 Ensayos en morteros con árido reciclado

4.4.1 Estado fresco

En la Tabla 6 se muestran la densidad en fresco y el escurrimiento obtenido para los morteros que incorporan 50% de RCD en su composición. Hay que destacar que inicialmente, debido a una mayor absorción de agua por parte del RCD en comparación con la arena normalizada, la trabajabilidad del mortero no fue adecuada haciendo necesaria la incorporación de un aditivo superplastificante que permitiera tener la misma trabajabilidad que los morteros amasados con arena normalizada sin necesidad de incrementar el contenido de agua, siendo de esta manera comparables los resultados que se obtuvieron para todos los morteros.

Tabla 6. Densidad y escurrimiento obtenidos para el mortero amasados con RCD

Mortero RCD	Densidad (g/L)	Escurrimiento (mm)
REF	1981.1	161
<i>S. pasteurii</i>	1979.2	159.5

Una vez adicionado el aditivo superplastificante e igualados los escurrimientos (Tabla 6), se observa en la misma tabla cómo la incorporación de bacterias apenas afectó a la densidad de los morteros. Estudios analizados confirmaron este comportamiento. A pesar de que el tratamiento bacteriano modifica las propiedades del árido reciclado, su efecto sobre la densidad del mortero final fue mínimo, manteniéndose prácticamente constante [27].

4.4.2 Comportamiento mecánico

Una vez evaluado el comportamiento de los morteros amasados con RCD en estado fresco, se estudió el comportamiento mecánico.

En la Figura 14, se muestra la evolución de las resistencias mecánicas a compresión para los morteros amasados con 50% de RCD, para morteros con y sin bacterias.

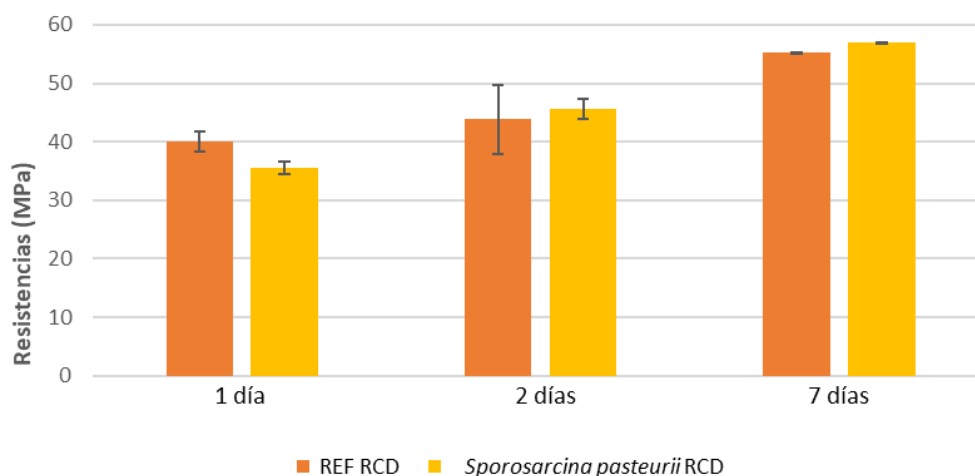


Figura 14: Resistencia mecánica a compresión con RCD a 1, 2 y 7 días.

A la vista de los resultados se observó cómo la incorporación de bacterias disminuye las resistencias mecánicas a 1 día de curado. Por otro lado, a partir de 2 días de curado los morteros amasados con bacterias son capaces de mejorar el desempeño mecánico de los mismos.

En el artículo anteriormente mencionado [27] se muestra como los morteros con áridos finos reciclados tratados con *Sporosarcina pasteurii* mostraron una resistencia a compresión inicial ligeramente inferior en los primeros días, probablemente debido al proceso de precipitación microbiana que puede afectar la hidratación temprana del cemento. Sin embargo, con el avance del curado, la formación de carbonato cálcico contribuyó a una matriz cementante más densa y reforzada, incrementando la resistencia mecánica en tiempos posteriores. Esto indica que la actividad bacteriana requiere un tiempo mínimo para manifestar sus efectos positivos sobre la microestructura y, por ende, sobre la resistencia del mortero.

En la Figura 15, se muestran las resistencias mecánicas a compresión de morteros que incorporan la especie bacteriana *Sporosarcina pasteurii*, tanto en morteros con 100% de árido normalizado como en los morteros con 50% de RCD.

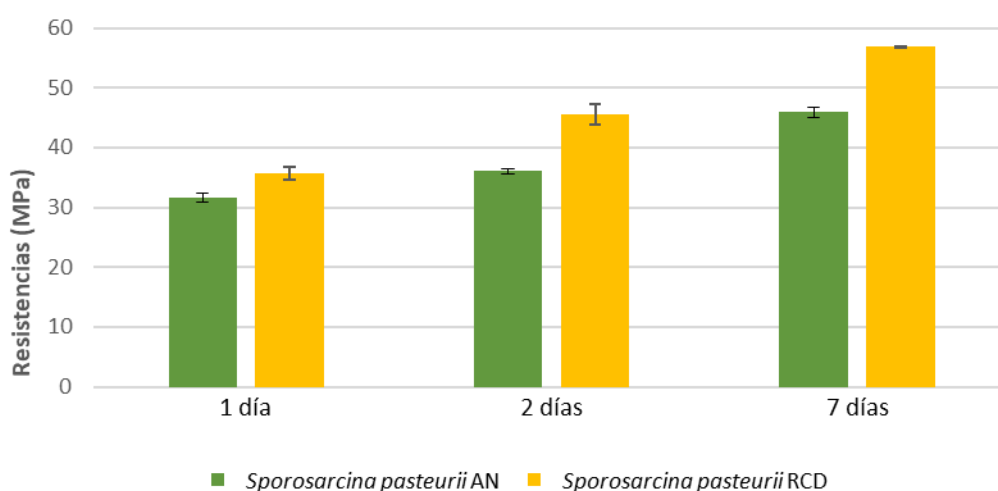


Figura 15: Comparativa resistencia mecánica de morteros con *Sporosarcina pasteurii* con A.N y RCD a 1, 2 y 7 días.

Comparando el comportamiento de los morteros que incorporaron la misma especie bacteriana, se observó cómo la sustitución de un 50% de árido normalizado por RCD, no sólo aumentó la sostenibilidad de los nuevos materiales diseñados, sino que mejoró las prestaciones mecánicas. El artículo con el que se compara en el anterior apartado [27] muestra que los morteros preparados con áridos finos reciclados alcanzaron resistencias cercanas o superiores a las del mortero con áridos naturales.

4.4.3 Evaluación de autorreparación mediante ensayos de absorción total de agua

La absorción total de agua fue determinada según la norma UNE 83980 [19] y va a ser evaluada tal y como ha sido mencionado con anterioridad en el apartado 3.3.3.4, en el eco-material autorreparable (50% de sustitución de A.N por RCD e incorporación de *S. pasteurii*) y comparada con el mortero de referencia (con RCD, pero sin incorporación

de bacterias). La absorción total de agua se evaluó para tiempos de recuperación de 12 días después de ser generadas las grietas en las probetas.

En la Figura 16 se representa la evolución de la ganancia de masa de las probetas con el tiempo de ensayo para los dos morteros objeto de estudio.

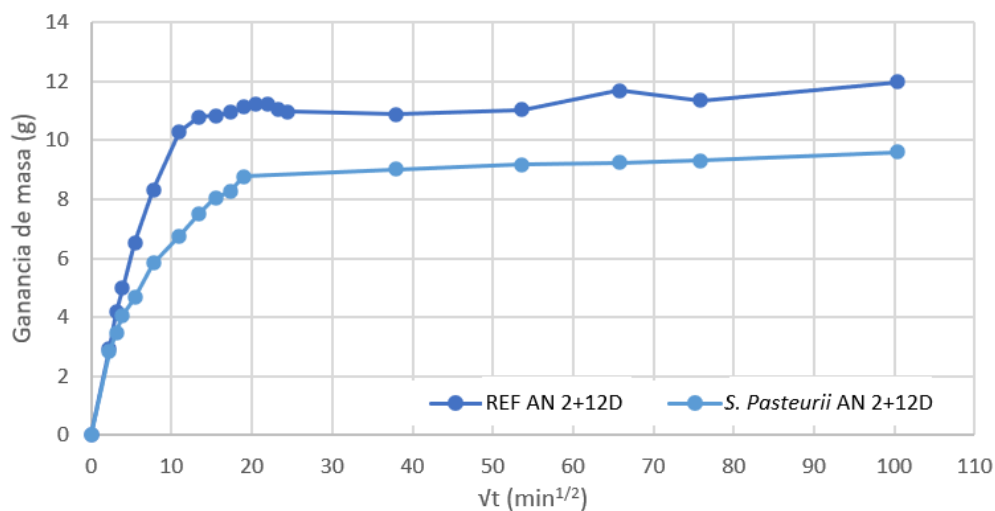


Figura 16: Absorción total Agua Arena Normalizada 2+12D

Con la finalidad de poder determinar la velocidad con la que absorbieron agua los materiales, se calculó la recta de regresión para las 6 primeras horas del ensayo. La pendiente de dicha recta de ajuste será la velocidad de absorción del material.

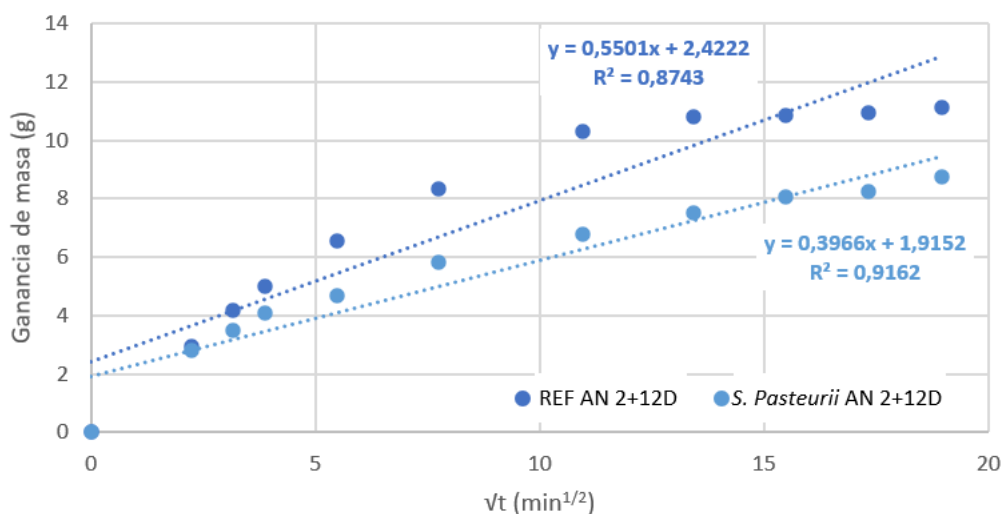


Figura 17: Velocidad de absorción total de agua Arena Normalizada 6 primeras horas 2+12D

Tabla 7: Velocidad de absorción obtenida de las 6 primeras horas ($\text{g}/\text{min}^{1/2}$)

VELOCIDAD DE ABSORCIÓN ($\text{g}/\text{min}^{1/2}$)	
REF 2+12D	0,55
<i>S. pasteurii</i> A.N 2+12D	0,40

A la vista de la Tabla 7 se observó cómo la incorporación de bacterias no sólo disminuyó la cantidad de agua total absorbida por parte de las probetas durante todo el ensayo (Figura 17) sino que también fue capaz de disminuir la velocidad con la que ese agua fue absorbida. Ambos resultados son responsables de un sellado de las grietas por parte de las bacterias.

Una vez se evaluó la influencia que tiene la incorporación de bacteria en los morteros, fue importante conocer la influencia de la presencia de árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición. Para llevar a cabo esta evaluación, se representa en la Figura 18 la absorción de agua total con el paso del tiempo de los dos morteros autorreparables (tanto el mortero con árido normalizado como el mortero en el que el 50% de árido normalizado se sustituye por RCD).

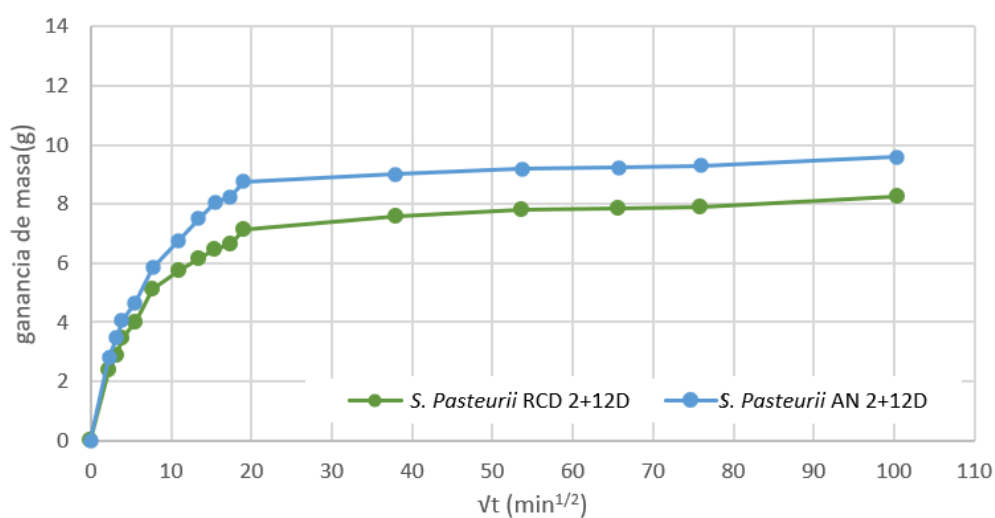


Figura 18: Absorción Total comparativa entre morteros autorreparables con RCD y AN a los 12 días de curado

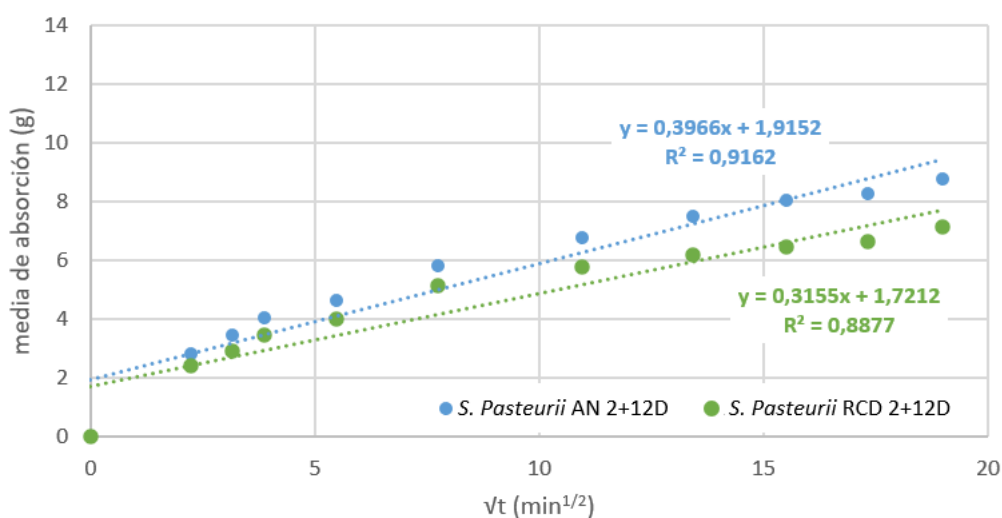


Figura 19: Velocidad de absorción total de agua comparativa de áridos con la especie *S. pasteurii* en las primeras 6 horas 2+12D

De forma análoga al estudio anterior, en la Figura 18 se muestra una ampliación de las 6 primeras horas de ensayo con sus correspondientes rectas de ajuste para poder calcular las velocidades de absorción (Tabla 8) por parte de los dos morteros.

Tabla 8: Velocidad de absorción de agua total comparativa entre áridos de la especie *S. pasteurii*

VELOCIDAD DE ABSORCIÓN (g/min ^{1/2})	
<i>S. pasteurii</i> A.N 2+12D	0,40
<i>S. pasteurii</i> RCD 2+12D	0,32

Los resultados mostrados en la Tabla 8 indican la mejora en el comportamiento de los morteros que incorporaron RCD en su composición en lo que a absorción de agua se refiere.

El aumento de la sostenibilidad en los morteros (incorporación de RCD) aporta mejoras en la capacidad de autorreparación desde el punto de vista de absorción total de agua, siendo indicativo de un mayor sellado de las grietas generadas en el material.

Según el artículo [27], mencionado en anteriores apartados, los resultados respecto a la absorción total de agua son claros a la reducción significativa de los morteros con áridos finos reciclados frente a los morteros que utilizan áridos reciclados no tratados. El presente trabajo coincide con la disminución de absorción de agua, lo que sugiere una mejora en la densidad y durabilidad del material a lo largo del tiempo de curado.

4.4.4 Seguimiento de autorreparación mediante microscopía óptica

Otro tipo de evaluación de carácter no destructivo de la autorreparación es el empleo de la microscopía óptica. Gracias a esta técnica fue posible llevar a cabo el seguimiento del sellado de fisuras generadas previamente en las muestras (cubos de mortero) de *Sporosarcina pasteurii* con distinto árido a tiempos control de 0 y 5 días. Las fotografías en el microscopio fueron tomadas a 0,67 aumentos.

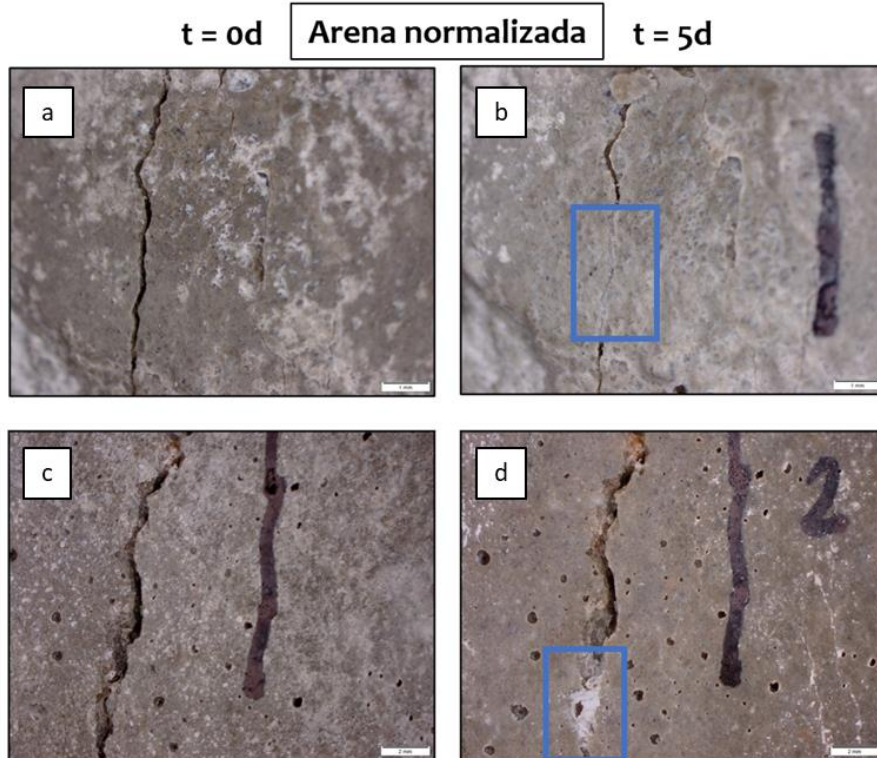


Figura 20: Evaluación del sellado de grietas por microscopía óptica en morteros con arena normalizada, enfoque 0,67x. a) y c) grietas sin cerrar. b) y d) grieta empezando a cerrar a los 5 días

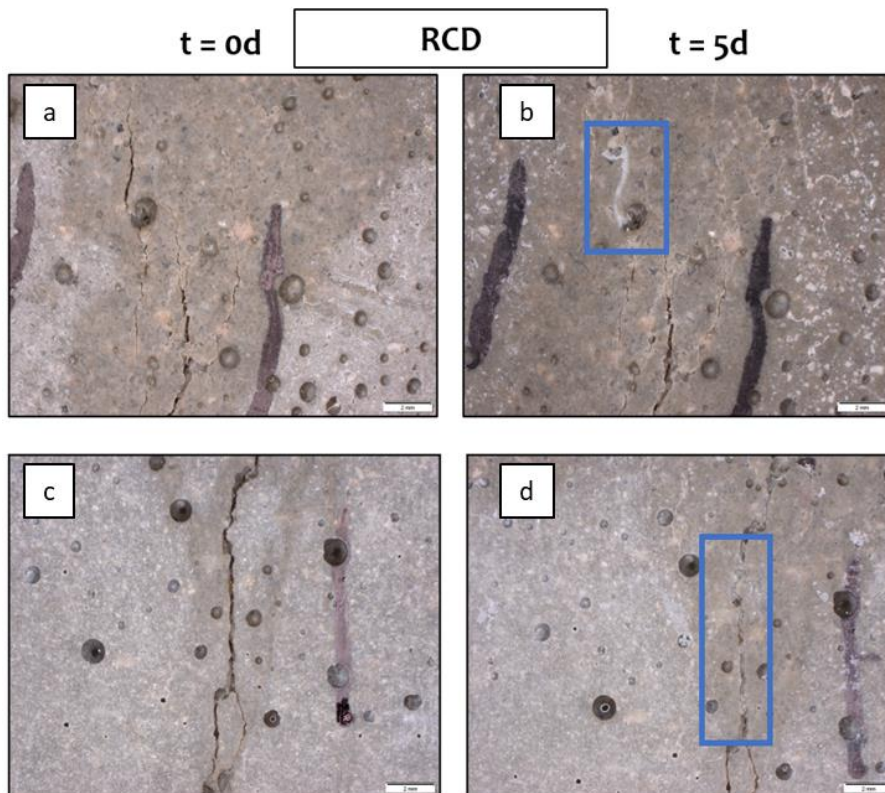


Figura 21: Evaluación del sellado de grietas por microscopía óptica en morteros con RCD, enfoque 0,67x. a) y c) grietas sin cerrar. b) y d) grieta empezando a cerrar a los 5 días

Tal y como se observa en las Figuras 20 y 21, después de tan solo 5 días de inmersión en los medios de curado, las grietas comenzaron a cerrarse. Resultados que se encuentran en consonancia con los obtenidos durante el ensayo de absorción total de agua (apartado 3.3.3.4). Estos resultados son respaldados por investigaciones recientes llevadas a cabo por Parameswaran y col. [21], quienes demostraron que el uso de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* puede inducir el cierre de grietas en un plazo aproximado de 8 días. Así, la biocementación inducida por bacterias emerge como una estrategia prometedora para prolongar la vida útil del hormigón y reducir la necesidad de mantenimiento estructural.

4.5 Impresión 3D del eco-material autorreparable

Una vez diseñado el eco-material autorreparable, y evaluada su capacidad para sellar fisuras con el paso del tiempo gracias a la acción de las bacterias, los siguientes pasos que se llevaron a cabo fueron las pruebas necesarias tanto a escala de laboratorio como a escala semi-industrial para probar la capacidad del material para ser imprimible en 3D.

Durante esta etapa, fue necesaria la modificación de la formulación del mortero autorreparable con la finalidad de mejorar propiedades del material como la extrudabilidad, continuidad, edificabilidad y retención de forma. En la Tabla 9 se muestra la nueva formulación empleada.

Tabla 9: Dosificación empleada en el material autorreparable para impresión 3D (% en peso)

MATERIAL	CEM I 52,5 R	RCD	A.N	SUPERPLASTIFICANTE (SP)	SEPIOLITA (Sep)
CONTENIDO	25	37,33	37,33	0,15	0,19

El contenido de agua y bacterias necesario para el correcto amasado del mortero es un 14% (relación líquido-sólido) manteniendo la relación 0,41% en peso de bacterias/cemento.

En la Figura 22 se muestran las pruebas realizadas a escala de laboratorio. En la Figura 22a se observa cómo el material se puede extruir perfectamente a través de la boquilla de la pistola de calafateo, en la Figura 22b se muestran 3 capas extruidas donde es posible apreciar cómo el material, a escala de laboratorio es capaz de soportar el peso de capas sucesivas sin notarse deformación en las capas debida al peso del resto de las capas. Por último, en la Figura 22c, se muestra el ensayo de retención de forma, cómo el material mantiene la forma inicial, no hay deformación de las capas, después de colocar una placa de metacrilato y 1 kg sobre ella.

Las pruebas realizadas, denotan que el eco-material autorreparable presenta extrudabilidad, continuidad, edificabilidad y retención de forma que lo hacen apto para impresión 3D, pudiendo seguir con la siguiente etapa que sería el escalado a nivel semi-industrial.

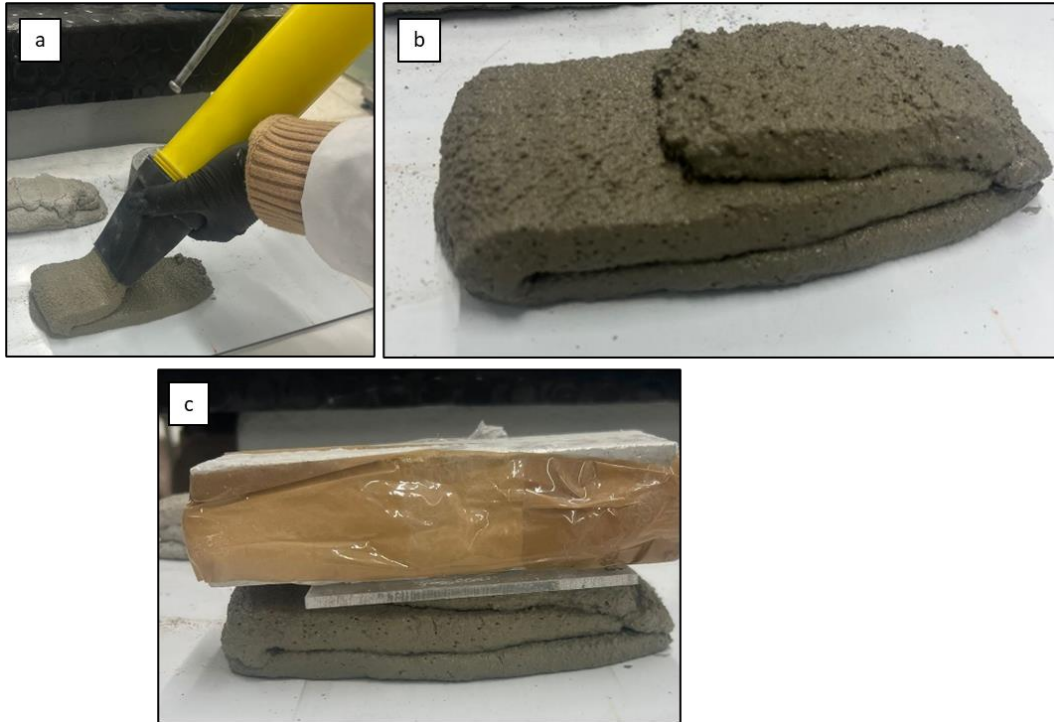


Figura 22: Pruebas realizadas a escala de laboratorio. a) Prueba de extrusión con pistola de calafateo, b) figura impresa y c) ensayo de retención de forma. Imágenes propias.

La Figura 23, muestra el acabado superficial del material empleando el eco-material autorreparable. En la Figura 24a se muestra que el material fue extruible y edificable, observándose como se han impreso las 14 capas que estaban establecidas para el ensayo. En la Figura 24b se muestra que a pesar de ser extruible, edificable y ser capaz de retener la forma, la figura presentó ciertas discontinuidades a lo largo del proceso de impresión.



Figura 23: Aspecto superficial del material. Imagen propia.

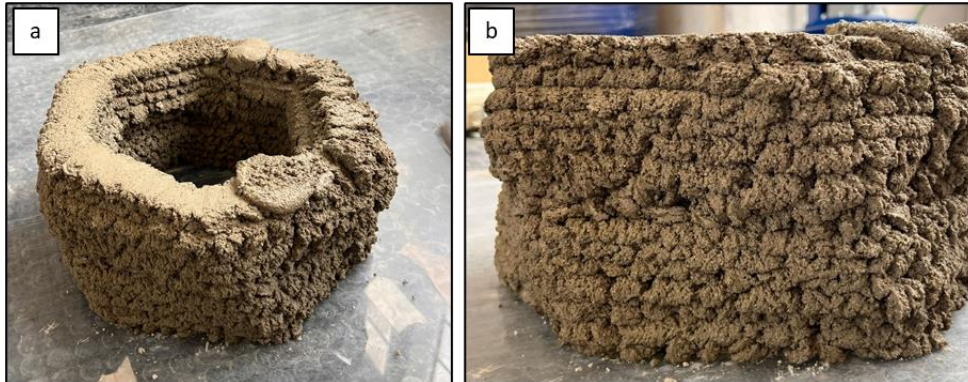


Figura 24: Figura impresa en 3D con el eco-material autorreparable. Imágenes propias.

Los resultados obtenidos después del escalado semi-industrial mostraron que el material denota una falta de continuidad durante diferentes momentos del proceso de impresión, esto hace necesaria la optimización de la formulación del material, la realización de nuevas pruebas que confirmen la impresión 3D a escala de laboratorio y en última instancia, el escalado. Unida a la optimización de la formulación puede ser necesaria una modificación de las condiciones de impresión 3D adaptándolas a las características del material, por ejemplo, la variación de la velocidad de impresión.

El escalado semi-industrial realizado en el presente trabajo, aun siendo una formulación diferente, fue comparable a los resultados obtenidos por Fernández y col. [28], que obtuvieron un material extruible, continuo y edificable tras numerosas pruebas bastante exitosas.

5. CONCLUSIONES

- La incorporación de bacterias aumenta los tiempos de fraguado de los nuevos materiales autorreparables diseñados. Entre las especies analizadas, *Sporosarcina pasteurii* demostró ser la más resistente a ambientes alcalinos, aunque presenta los tiempos de fraguado más prolongados.
- La incorporación de bacterias mejora la trabajabilidad de los nuevos materiales autorreparables.
- A pesar de que la presencia de bacterias disminuye las resistencias mecánicas a compresión, todos los morteros estudiados cumplen con la normativa europea EN 197-1.
- La sustitución parcial de árido natural por residuos de construcción y demolición (RCD) contribuye a mejorar las resistencias mecánicas a compresión de los morteros.
- La absorción total de H₂O disminuye cuando se incorporan bacterias gracias al cierre de fisuras pequeñas tras 12 días de inmersión en el medio de sellado.
- La incorporación de RCD no solo aumenta la sostenibilidad del material, sino que también reduce la absorción total de agua, alineándose con los objetivos de la Agenda 2030 y el Pacto Verde Europeo.
- El eco-material autorreparable se puede considerar como imprimible en 3D debido a que, a pesar de presentar discontinuidades en determinados momentos del proceso de impresión, es extruible, edificable y además mantiene la forma consiguiendo obtener las figuras deseadas.

6. LÍNEAS FUTURAS

Como posibles líneas de continuación y mejora de la investigación realizada y expuesta en el presente Trabajo Fin de Grado se plantean:

- Introducción de fibras en la formulación de los morteros con la finalidad de poder controlar la carga que se realiza en las probetas durante la etapa de generación de fisuras. Por otro lado, la incorporación de fisuras permitiría evaluar la sinergia entre reparación autónoma y reparación autógena.
- Modificar la formulación y/o los parámetros de impresión para que el material tenga una mejor continuidad durante todo el proceso de impresión 3D.
- Realización de un análisis del ciclo de vida del material.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Aytekin, B., Mardani, A., & Yazıcı, Ş. (2023). State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 378, 131198.
- 2) Qiu, Q. (2020). A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. *Construction and Building Materials*, 247, 118503.
- 3) Meraz, M. M., Mim, N. J., Mehedi, M. T., Bhattacharya, B., Aftab, M. R., Billah, M. M., & Meraz, M. M. (2023). Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. *Alexandria engineering journal*, 73, 665-694.
- 4) Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56(1/2), 1–12.
- 5) Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2014). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>
- 6) Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 48, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061>
- 7) Ponce de León Echegaray, C. F. P., Rojas, S. K. H., & Acapana, E. S. (2015). Los beneficios del uso de bacterias en el concreto autorregenerante. *Civilizate*, (7), 36-38.
- 8) Sarkar, M., Maiti, M., Xu, S., & Mandal, S. (2023). Bio-concrete: Unveiling self-healing properties beyond crack-sealing. *Journal of Building Engineering*, 74, 106888.
- 9) Dhama, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(5), 707–714.
- 10) Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- 11) Comisión Europea. (2019). *El Pacto Verde Europeo*.
- 12) Solarte, A., Choque, B., Yagama, C. P., & Amaya, S. U. (2024). Structural performance of self-healing concrete by Bacillus bacteria with addition of rice husk ash. *Structures*, 61, 106111. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106111>
- 13) Luo, M., Ji, A., Li, X., & Yang, D. (2024). Performance evaluation of self-healing recycled concrete using biomineralization modified recycled aggregate as bacterial carrier. *Journal Of Building Engineering*, 86, 109000. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109000>
- 14) Rahaman, S., Srujan, D. S., Dutta, J. R., Kar, A., & Bandyopadhyay, M. (2023). Cell Viability Studies on Bacillus sp. under Different Storage Conditions for Usage in Improving Concrete Compressive Strength. *Buildings*, 13(9), 2392. <https://doi.org/10.3390/buildings13092392>
- 15) UNE-EN 196-1: 2018 - Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias
- 16) UNE-EN 196-3: 2017 - Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.
- 17) UNE-EN 197-1: 2011 – Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes

- 18) UNE-EN 1015-3: 2000 - Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)
- 19) UNE 83980: 2014 - Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón.
- 20) UNE 83982: 2008 - Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido
- 21) Parameswaran, K., Murugesan, R., Ganesan, S., & Bharathi, K. S. (2022). *Investigation on the mechanical properties and self-healing efficiency of bacterial-based concrete using calcium nitrate-urea and calcium chloride-urea medium*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 48965–48979.
- 22) Lee, J. C., Lee, C. J., Chun, W. Y., Kim, W. J., & Chung, C. W. (2015). Effect of microorganism *Sporosarcina pasteurii* on the hydration of cement paste. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(8), 1328-1338.
- 23) Li, Q., Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2019). *Influence of Sporosarcina pasteurii cells on rheological properties of cement paste*. *Construction and Building Materials*, 225, 1052–1063.
- 24) Shabaniyan, S. M., Mirzagoltabar, A., & Dehestani, M. (2024). Performance of various types of Bacillus bacteria on the rheology and mechanical properties of self-compacting concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09730-y>
- 25) Annamalai, S. K. (2012). Production and characterization of biocaulk by *Bacillus pasteurii* and its remediation properties with carbon nano tubes on concrete fractures and fissures. *Materials Research Bulletin*, 47(11), 3269–3277. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.04.016>
- 26) Hsu, C. M., Huang, Y. H., Nimje, V. R., Lee, W. C., Chen, H. J., Kuo, Y. H., ... & Chen, C. Y. (2018). Comparative study on the sand bioconsolidation through calcium carbonate precipitation by *Sporosarcina pasteurii* and *Bacillus subtilis*. *Crystals*, 8(5), 189.
- 27) Feng, Z., Zhao, Y., Zeng, W., Lu, Z., & Shah, S. P. (2020). Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar. *Construction and Building Materials*, 230, 116949.
- 28) Luque FF. (2024) Desarrollo de Un Material Autorreparable Tipo ECC (Engineered Cementitious Composite) Para Impresión 3D.

ANEXO I: ABREVIATURAS

- MICP: bacterias precipitadoras de carbonato cálcico
- RCD: Residuos de Construcción y Demolición
- A.N: Arena Normalizada
- REF: referencia
- W/C: relación agua/cemento
- EN: normativa europea
- RMC: Resistencias Mecánicas a Compresión
- Sep: sepiolita
- SP: superplastificante
- CEM: cemento

ANEXO II: DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TRABAJO FIN DE GRADO

Los resultados de este Trabajo de Fin de Grado fueron expuestos en 2 congresos:

- Congreso de Sostenibilidad y Economía Circular Aplicada (diciembre de 2024) donde el tipo de participación fue la presentación de un póster (Figura 25) y el trabajo llevó por título: *“Comparativa de materiales autorreparables basados en la incorporación de bacterias precipitadoras de carbonato de calcio (MICP)”*

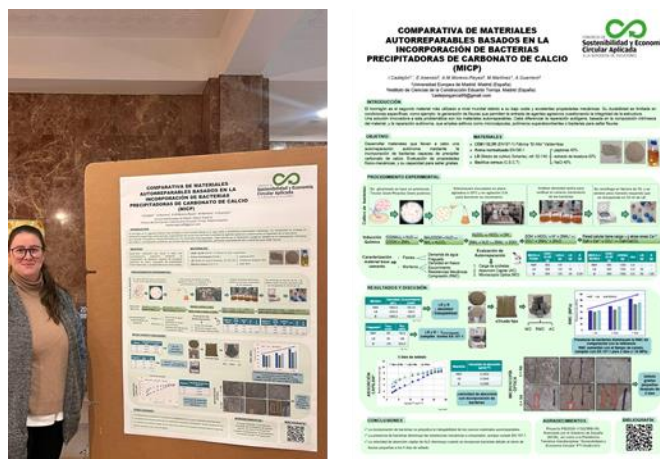


Figura 25: Imagen del póster expuesto en el Congreso de Sostenibilidad y Economía Circular Aplicada

- Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción (mayo de 2025) donde el tipo de participación fue una comunicación oral (Figura 26) y el trabajo llevó por título: *“Empleo de árido reciclado procedente de RCD en el diseño y desarrollo de eco-materiales autorreparables basados en la incorporación de bacterias MICP”*



Figura 26: Imagen de la primera diapositiva de la comunicación oral expuesta en las Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción