

Estudio de hormigones con incorporación de solución urea-bacterias

S. Rupp^{a*}, C. Cerutti^a, A. Baqué^a, D. Gonzalez^a, A. Guillarducci^a, M. E. Ferreras^a, R. E. Puga^a

^aCentro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), CP 3000, Santa Fe, Argentina. srupp@frsf.utn.edu.ar, ccerutti@frsf.utn.edu.ar, abaque@frsf.utn.edu.ar, dgonzalez@frsf.utn.edu.ar, aquillarducci@frsf.utn.edu.ar, meferreras@frsf.utn.edu.ar, rpuga@frsf.utn.edu.ar

Recibido: 30 de diciembre de 2023

Aceptado: 2 de agosto de 2024

RESUMEN

Desde una perspectiva medioambiental, el hormigón tiene un importante impacto, por lo que se busca incrementar su durabilidad para reducir su consumo. Durante el período de servicio, el hormigón es propenso a desarrollar fisuras que comprometen su integridad y vida útil. En este contexto, surgen los biohormigones, capaces de autorepararse mediante la incorporación de bacterias. Específicamente, el uso de bacterias ureolíticas induce la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), el cual sella las fisuras. Este trabajo evalúa la incidencia en las propiedades del hormigón al emplear una solución de urea y bacterias ureolíticas como agua de amasado.

PALABRAS CLAVE: Fisuras, bacterias, biohormigón, propiedades, autoreparante

ABSTRACT

From an environmental perspective, concrete has a significant impact, prompting efforts to increase its durability to reduce consumption. During the service life, concrete is prone to developing cracks that compromise its integrity and lifespan. In this context, bioconcretes emerge, capable of self-repair through the incorporation of bacteria. Specifically, the use of ureolytic bacteria induces the precipitation of calcium carbonate (CaCO_3), which seals the cracks. This study evaluates the impact on concrete properties when using a solution of urea and ureolytic bacteria as mixing water.

KEYWORDS: Fissures, bacteria, bioconcrete, properties, self-healing

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Rupp, S., Cerutti, C., Baqué, A., Gonzalez, D., Guillarducci, A., Ferreras, M. E., y Puga, R. E. (2024). Estudio de hormigones con incorporación de solución urea-bacterias. *Revista Hormigón*, 66, 18–28. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/u7eehd7pd>

1. Introducción

Los problemas ambientales son reconocidos como un desafío significativo a nivel mundial, con un consenso generalizado sobre la importancia de abordar este tema. En este contexto, se destaca al desarrollo sustentable o sostenible como una alternativa para enfrentar la crisis ambiental vigente [1].

Dentro de las actividades humanas que poseen un impacto significativo sobre el medio ambiente, se encuentra la industria de la construcción como una gran fuente de contaminación. El proceso de extracción de materias primas, así como los procesos industriales para la fabricación de materiales de construcción causan daños al medioambiente.

El hormigón es uno de los materiales más utilizados dentro de la industria de la construcción en todo el mundo. Su popularidad se debe a varios factores combinados, de los cuales se puede mencionar: la capacidad de moldearse en cualquier forma, el bajo costo de fabricación en relación con otros materiales y la alta resistencia final [1]. No obstante, la producción de los materiales que componen al hormigón implica el uso intensivo de energía y procesos de transformación que generan considerables emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En términos medioambientales, esto convierte al hormigón en un material poco sustentable.

La vida útil del hormigón es el lapso temporal en el cual el material conserva su integridad estructural y funcional en un contexto específico. Durante este período, el hormigón exhibe la capacidad de soportar las cargas y condiciones para las cuales fue concebido, sin manifestar una degradación de consideración o pérdida de eficacia. La extensión de la vida útil del hormigón puede variar en función de diversos factores, entre los que se cuentan la calidad de los componentes empleados en su elaboración, el diseño estructural subyacente, las circunstancias medioambientales a las que se encuentra expuesto y el nivel de monitoreo y mantenimiento [2].

Durante la vida en servicio del hormigón, se generan solicitaciones que superan su capacidad resistente, resultando en la formación de fisuras. Estas fisuras no solo tienen un impacto estético, sino que también incrementan el riesgo de degradación de la matriz. Al no ser reparadas, facilitan la entrada de sustancias nocivas, desencadenando mecanismos de deterioro que afectan la durabilidad del material y provocan una disminución en la vida útil de las estructuras.

Una alternativa para abordar este problema es llevar a cabo la reparación de fisuras *in situ*. Sin embargo, esta técnica conlleva costos adicionales, además de que debe considerarse que algunas fisuras pueden no ser visibles a simple vista o pueden ser de difícil acceso para su reparación.

Para afrontar este desafío, diversas líneas de investigación han propuesto el uso de hormigones autoreparantes, los cuales cuentan con la capacidad de sellar fisuras de forma autónoma desde el mismo momento de su generación, preservando la integridad de las estructuras y protegiéndolas de otras patologías [3-5].

Dentro de esta corriente, se introduce el término “biohormigones” para denominar a aquellos hormigones autoreparantes que, a través del proceso de biomineralización, producen minerales que obturan las fisuras.

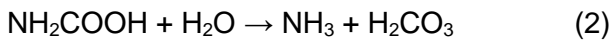
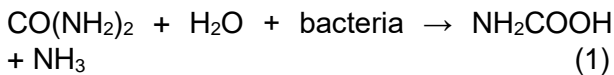
La biomineralización no solo ofrece la posibilidad de autoreparación, sino que también reduce la permeabilidad del hormigón al llenar los poros con productos minerales. Esta reducción en la permeabilidad contribuye a mejorar la durabilidad, dificultando el ingreso de agentes agresivos, como el agua junto con otros compuestos químicos, que suelen desencadenar procesos de deterioro en el hormigón.

La biomineralización es un proceso por el cual los organismos vivos producen minerales [6]. En el caso de la mineralización inducida biológicamente, los minerales se forman extracelularmente como resultado de la

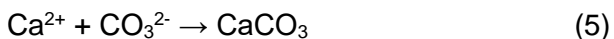
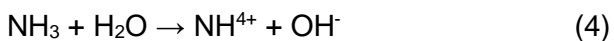
actividad metabólica del organismo. Específicamente, el empleo de bacterias ureolíticas induce la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3).

En trabajos previos, se confirmó la factibilidad del uso de la cepa bacteriana *Lysinibacillus sphaericus* 2362, un bacilo ureolítico, para inducir la precipitación de CaCO_3 [7-9].

Las bacterias ureolíticas tienen una enzima ureasa, que cataliza la hidrólisis de la urea. Así, mediante la actividad microbiana, 1 mol de urea se hidroliza a 1 mol de amoníaco y 1 mol de carbamato (1), el carbamato se hidroliza espontáneamente para formar 1 mol adicional de amoníaco y ácido carbónico (2), como sigue:



Estos productos se equilibran en agua para formar carbonato (3), iones de amonio e hidróxido (4), que dan lugar a un aumento del pH. El carbonato así generado se combina con los iones de calcio (Ca^{2+}) presentes en la solución de poros formando carbonato de calcio (5).



Existen diversas metodologías para incorporar bacterias en el hormigón con el fin de generar un material autoreparante. Una de las formas de lograr la biomineralización dentro de la matriz de materiales cementicios es mediante la incorporación directa de bacterias en la mezcla de hormigón durante el proceso

de elaboración, a través del agua de amasado [3].

Este artículo tiene como objetivo evaluar la viabilidad de incorporar la cepa bacteriana *Lysinibacillus sphaericus* 2362 (solución urea-bacterias) al hormigón a través del agua de amasado, cumpliendo con los requisitos de la norma IRAM 1601 (2012). Además, se analiza mediante el estudio de la permeabilidad del material la posible precipitación de CaCO_3 por biomineralización para una concentración determinada de bacterias. Por otro lado, se examina la capacidad de autoreparación de fisuras de 0,04 mm a 0,08 mm en morteros elaborados con la solución urea-bacterias en estudio.

2. Materiales y métodos

2.1 Cemento

El cemento empleado para la elaboración de morteros y hormigones corresponde a un cemento Portland normal (CPN40), suministrado por una empresa elaboradora de cemento. En la Tabla 1 se detalla la composición proporcionada por el proveedor de dicho cemento. A su vez, el fabricante informa para este cemento una finura Blaine de 338 m^2/kg y que el material retenido sobre tamiz #200 corresponde a 3,0g/100g y en tamiz #325 a 13,0 g/100g.

2.2 Agregados

Para la elaboración de mortero se compuso arena normal de acuerdo con las fracciones especificadas en la norma IRAM 1633 (2011),

Tabla 1. Composición en óxidos del cemento CPN40 empleado.

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	RI*	PPC**
Contenido (%)	20,89	3,69	3,81	63,81	0,58	2,80	1,07	0,07	0,91	3,05

* RI: Residuo insoluble

** PPC: Pérdida por calcinación

empleando para ello arena proveniente del río Paraná.

Para la elaboración de hormigón, se empleó arena fina del río Paraná como agregado fino y piedra partida granítica como agregado grueso. Ambos materiales son comercializados en correlones en la Ciudad de Santa Fe. En la Tabla 2 se detallan las principales características de estos materiales.

2.3 Agua de amasado

Con fines comparativos, se emplearon dos alternativas como agua de amasado: agua destilada hervida (patrón) y una solución de urea-bacterias (UB). Esta última consiste en una disolución de urea en agua destilada hervida a la que se añade un concentrado de

bacterias *Lysinibacillus sphaericus* 2362 (biomasa).

Cabe destacar que este microorganismo ureolítico fue cedido por la Dra. Mariana Allievi (CONICET y Facultad de Cs. Exactas y Naturales, UBA) y es una cepa original del Instituto Pasteur de París.

En instancias anteriores, se trabajó en la formulación de la solución utilizada para incorporar las bacterias a través del agua de amasado. La primera formulación, denominada UME + bacterias, presentaba una elevada concentración de materia orgánica debido a que incluía medio de cultivo, lo que afectaba significativamente el tiempo de fraguado. Por esta razón, se modificó la formulación con el objetivo de disminuir el contenido de materia orgánica, obteniendo la

Tabla 2. Características de los agregados empleados en la elaboración de hormigón.

Material	Normativa	Propiedad determinada	Valor	Unidad	
Agregado grueso	IRAM 1505 (2019)	TMN*	0,019	m	
		Módulo de finura	6,38	-	
	IRAM 1548 (2003)	Densidad granel	1580	kg/m ³	
		Densidad granel SSS**	1650	kg/m ³	
	IRAM 1533 (2002)		Volumen de vacíos	44	%
			Densidad relativa real	3080	kg/m ³
			Densidad relativa aparente del agregado seco	2730	kg/m ³
			Densidad relativa aparente del agregado SSS**	2840	kg/m ³
	Agregado fino	IRAM 1505 (2019)	Absorción	4,11	%
			Módulo de finura	2,90	-
IRAM 1520 (2002)			Densidad relativa real	2740	kg/m ³
			Densidad relativa aparente del agregado seco	2700	kg/m ³
			Densidad relativa aparente del agregado SSS**	2670	kg/m ³
		Absorción	0,48	%	

* TMN: Tamaño máximo nominal

** SSS: Saturado superficie seca

solución UB que se evalúa en el presente trabajo que corresponde a un concentrado del cultivo (1 ml de biomasa por litro) [7].

2.3.1 Caracterización del agua de amasado

La calidad y cantidad de impurezas en el agua pueden afectar las propiedades más significativas del hormigón [10]. La norma IRAM 1601 (2012) establece los requisitos y métodos de ensayo para el agua destinada a la preparación y/o curado de morteros y hormigones de cemento Portland. Dentro de los requisitos químicos, esta norma establece límites para el contenido de residuos sólidos, materia orgánica, pH, sulfatos, cloruros y hierro.

A su vez, se indica que cuando sea superado el contenido máximo de materia orgánica, se debe evaluar la incidencia sobre los tiempos de fraguado, determinado de acuerdo con la norma IRAM 1619 (2006), y la resistencia mecánica a compresión a 7 días según la norma IRAM 1622 (2006). Siendo aceptable el empleo del agua en estudio cuando se cumplan los requisitos establecidos para dichos parámetros.

En este sentido, se determinó el contenido de residuos sólidos, materia orgánica, pH, sulfatos y cloruros del agua destilada hervida (patrón) y de la solución UB.

Asimismo, se evaluó el tiempo de fragüe y la resistencia mecánica a compresión a 7 días empleando cemento CPN40, y agua destilada hervida (patrón) o la solución UB como agua de amasado.

El análisis del agua patrón se llevó a cabo con el objetivo de obtener resultados de comparación, mientras que el análisis de la solución UB se realizó para determinar si era apta para su uso como agua de amasado.

2.4 Determinación de propiedades del hormigón

Para evaluar la incidencia de la solución UB sobre las propiedades del hormigón, se elaboraron dos hormigones siguiendo la dosificación indicada en la Tabla 3, variando el tipo de agua de amasado utilizada. Uno de los hormigones se realizó con agua hervida destilada (patrón), y el otro con solución de urea-bacteria (UB), este último resultando en un hormigón que contiene 201,81 mg de biomasa por m³.

En ambos hormigones, se determinó el asentamiento según la norma IRAM 1536 (1978), un ensayo que permitió evaluar la consistencia del hormigón en estado fresco. Posteriormente, se elaboraron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura con ambos tipos de hormigón. Estas probetas se utilizaron para la determinación de varios parámetros, incluyendo absorción, succión capilar (según norma IRAM 1871, 2021), carbonatación y resistencia a compresión a 28 días (según norma IRAM 1546, 2013).

La precipitación de carbonato de calcio conduce a una reducción en la cantidad de poros en la matriz del hormigón, resultando en una disminución de la porosidad [3]. Para confirmar esta hipótesis, se determinó en ambos hormigones la capacidad de succión capilar, siguiendo la norma IRAM 1871 (2021), así como el porcentaje de absorción.

Tabla 3. Dosificación empleada.

Material	Unidad	Valor
Cemento	kg/m ³	381
Agregado Fino	kg/m ³	895
Agregado Grueso	kg/m ³	870
Relación agua/cemento	--	0,53

En la Fig. 1 se ilustra el procedimiento de aserrado de las probetas para obtener las muestras utilizadas en el ensayo de succión capilar y absorción. Según lo establecido en la norma IRAM 1871 (2021), las muestras denominadas “B” se destinaron a la evaluación de la succión capilar, mientras que las muestras denominadas “A” se utilizaron para determinar la absorción. Cabe destacar que este proceso se llevó a cabo por triplicado, empleando 3 probetas para generar 3 muestras de succión y 3 muestras de absorción para cada tipo de hormigón.

Para determinar el porcentaje de absorción del hormigón, se utilizaron tres muestras cilíndricas de 28 días de edad, con un diámetro de 10 cm y una altura de 5 cm. Estas probetas se pesaron y se colocaron en una estufa a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Una vez secas, se sumergieron en agua a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un período de 48 horas, y se registró el peso de cada muestra. Posteriormente, se volvieron a sumergir por 24 horas y se determinó su peso. Este procedimiento se repitió hasta que la diferencia de pesos fue inferior al 0,2 %.

La carbonatación en el hormigón es un proceso en el cual el dióxido de carbono (CO_2) se combina con los hidróxidos de calcio, sodio y potasio presentes en los poros del hormigón, formando carbonatos que reducen el pH. Cuando la carbonatación alcanza una condición crítica, desencadena la corrosión de la armadura. Los óxidos de hierro, productos de la corrosión, ocupan un volumen mayor que la barra de acero, lo que genera tensiones internas que, al superar la capacidad intrínseca del material, provocan la aparición de fisuras [2]. Por otro lado, el proceso químico que ocurre durante la biomineralización produce carbonato de calcio, que tiende a neutralizar el pH del hormigón, y amonio, que genera un aumento del pH [7].

En función de lo expuesto, resulta de interés evaluar el comportamiento de los hormigones UB frente a la carbonatación natural, ya que podrían presentar una mayor resistencia a los

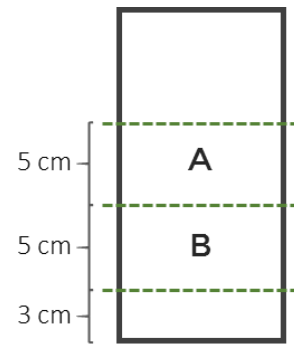


Figura 1. Preparación de muestras para evaluar succión capilar y absorción.

efectos de la carbonatación en comparación con el hormigón convencional. Para ello, se realizaron mediciones con una solución hidroalcohólica de fenolftaleína en probetas de hormigón Patrón y UB. Esta solución de fenolftaleína es un indicador de pH que cambia de incoloro a rosa permitiendo detectar zonas con un pH superior a 8.

Luego de un curado en cámara húmeda por 7 días, las probetas cilíndricas se expusieron a condición ambiente, protegidas de la lluvia, durante un máximo de 8 meses. A los 3 meses de edad, se efectuó un primer aserrado para obtener muestras del extremo superior, de 10 cm de diámetro y 5 cm de alto, sobre las cuales se realizó la prueba de fenolftaleína en la cara interna. Posteriormente, al completar los 8 meses de edad, se llevó a cabo un segundo aserrado, repitiendo la prueba con estas nuevas muestras (Fig. 2).

Las pruebas de fenolftaleína se realizaron por triplicado y los espesores de carbonatación se

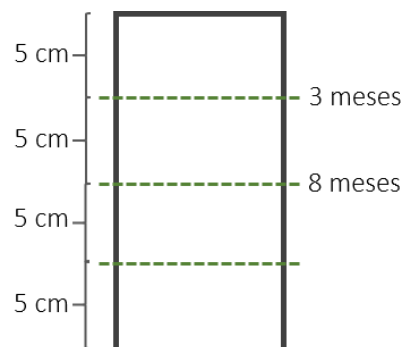


Figura 2. Determinación del frente de carbonatación.

midieron con un calibre, tomando 8 lecturas por muestra. Estas pruebas permiten, además de evaluar el comportamiento del avance de la carbonatación natural, observar, en el caso de los hormigones UB, si conserva la alcalinidad considerando que se ha producido la biomineralización. La resistencia a compresión se evaluó con el objetivo de determinar si el empleo de bacterias afecta el desempeño del material, para ello se siguió el procedimiento indicado en la norma IRAM 1546 (2013).

2.5 Estudio de la posibilidad de auto reparación en morteros

Con el objetivo de evaluar si la solución urea-bacterias sella fisuras con el tiempo, se realizó el monitoreo fotográfico de probetas de mortero que han sido fisuradas. Para ello, se moldearon por triplicado probetas de mortero de 4 cm x 4 cm x 16 cm, siguiendo el procedimiento de moldeo y curado indicado en la norma IRAM 1622 (2006). A la edad de 2 días se generaron fisuras de tamaño entre 0,04 mm - 0,08 mm, utilizando una prensa hidráulica para generar esfuerzos de flexión. Se realizó un seguimiento fotográfico de las fisuras generadas en las probetas, empleando una lupa de 60X de aumento, a la edad de 2 días, 3 meses y 8 meses.

3. Resultados y discusión

De los resultados obtenidos en la caracterización del agua de amasado (Tabla 4) se observa que los valores de pH, contenido de sulfato y cloruro cumplen con los parámetros establecidos por la norma IRAM 1601 (2012) tanto en el Patrón como en la solución UB. Respecto del contenido de materia orgánica y de residuos sólidos de la solución UB, se determinó que supera ampliamente los valores límites establecidos por normativa.

Conforme a lo indicado por la norma, al no cumplirse con los criterios mencionados anteriormente, se evaluó la incidencia en los tiempos de fraguado y en la resistencia a compresión simple a 7 días, obteniendo los resultados que se detallan en la Tabla 4.

En cuanto al tiempo de fraguado, la norma establece un mínimo de 45 minutos para el inicio de fraguado, con una variación de hasta el 25 % respecto de la muestra patrón, y un máximo de 720 minutos para el fin de fraguado, con una variación de hasta el 25 % respecto de la muestra patrón. Como se indica en la Tabla 4, los requisitos establecidos por la norma se cumplen satisfactoriamente.

Tabla 4. Caracterización del agua de amasado.

Parámetro	Patrón	UB	Límites según norma	Norma IRAM
Contenido de residuos sólidos [kg/m ³]	0,00	7,67	Max. 5,00	1601 (2012)
Contenido de materia orgánica [kg/m ³]	0,000	9,786	Max. 0,003	1601 (2012)
pH	5,53	8,97	Min. 6,00	1601 (2012)
Cloruros [kg/m ³]	0,00	0,01	Max. 1,00	1601 (2012)
Sulfatos [kg/m ³]	0,00	0,00	Max. 2,00	1601 (2012)
Tiempo de inicio de fragüe [min]	230	260	Min. 45 230±57	1619 (2006)
Tiempo de fin de fragüe [min]	375	405	Max. 720 375±94	1619 (2006)
RCS a 7 días [MPa]	25,9	25,6	25,9±2,59	1622 (2006)

Al comparar los resultados de resistencia a compresión (RCS) a 7 días, se observa que la resistencia alcanzada al emplear la solución UB como agua de amasado es menor respecto al Patrón. Sin embargo, se encuentra dentro del rango de variación del 10 % establecido por la norma.

En base a lo mencionado, se puede afirmar que la solución UB es apta para ser utilizada como agua de amasado en la preparación y/o curado de morteros y hormigones.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de las propiedades evaluadas en el hormigón Patrón y UB. Como se puede observar, no se evidencian diferencias significativas entre las muestras analizadas.

Al analizar los valores de asentamiento, se identifica un incremento de este parámetro para el caso del hormigón UB. Esto podría indicar que la incorporación de bacterias a través del agua de amasado modifica las características reológicas del hormigón en estado fresco, pero no representa una alteración significativa en las características del material en estado endurecido.

Si bien los resultados de asentamiento se encuentran dentro del rango de tolerancia para

mezclas de consistencia fluida (± 3 cm), el resultado obtenido en la mezcla elaborada con UB está fuera de la sensibilidad del ensayo del cono de Abrams. Por lo tanto, no se puede afirmar con certeza la incidencia de la solución UB sobre este parámetro. Sería de interés evaluar, en futuras experiencias, hormigones de comparación con igual consistencia, es decir, que cumplan con los rangos de consistencia y tolerancias establecidos en el Reglamento CIRSOC 201 (2005).

En cuanto a las propiedades del material en estado endurecido, no se observan diferencias significativas entre el hormigón Patrón y UB, lo que sugiere que no se ha producido la biomineralización o que la tasa de producción de CaCO_3 no es suficiente para modificar la microestructura del material.

3.1 Estudio de la posibilidad de auto reparación en morteros

Del monitoreo fotográfico de los morteros UB se observa que la solución urea-bacteria empleada no ha logrado el sellado de fisuras generadas por acción mecánica. En la Fig. 3 se observan algunas de las imágenes del seguimiento fotográfico realizado.

Tabla 5. Caracterización de los hormigones.

Parámetro		Norma	Unidades	Patrón	UB
Asentamiento		IRAM 1536 (1978)	cm	18	22
RCS a 28 días		IRAM 1546 (2013)	MPa	25,7 (1,9)	24,3 (1,9)
Carbonatación*	3 meses	-	mm	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
	8 meses	-	mm	4,64 (0,90)	5,08 (1,14)
Capacidad de succión (C)			g/m^2	956,87	1156,60
Velocidad de succión capilar (S)		IRAM 1871 (2021)	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$	5,32	6,33
Absorción		-	%	6,25 (0,24)	6,26 (0,37)

Nota: Los valores indicados entre paréntesis corresponden a la desviación estándar de cada parámetro en base a los resultados obtenidos por triplicado en cada ensayo.

* En ambos hormigones se observó un frente de carbonatación que avanza desde el exterior. No se evidenció disminución de pH en las probetas por biomineralización.

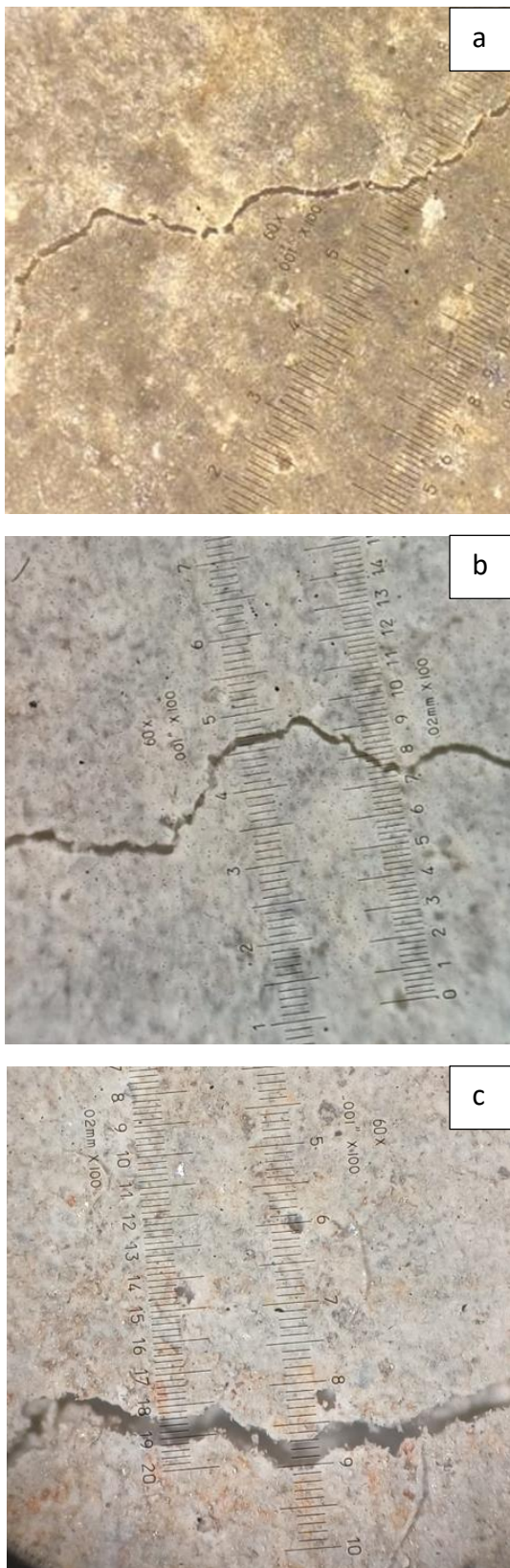


Figura 3. Monitoreo fotográfico de fisuras en morteros elaborados con solución urea-bacteria a las edades de 2 días (a), 3 meses (b) y 8 meses (c).

Los resultados del seguimiento fotográfico de fisuras en morteros elaborados con solución de UB, junto con la caracterización de los hormigones estudiados, indican que el proceso de precipitación de CaCO_3 no se ha desarrollado. A pesar de haber confirmado previamente la presencia de bacterias dentro de la matriz de materiales cementicios elaborados con UB [6,8], la similitud en las propiedades finales de los hormigones y la falta de cicatrización de las fisuras sugiere que la biomineralización no se ha producido o que no ha alcanzado una tasa de producción suficiente para modificar la microestructura del material.

El proceso de precipitación de CaCO_3 por biomineralización se rige principalmente por cuatro factores claves: la concentración de ion calcio, la concentración de carbono inorgánico disuelto (CID), el pH y la disponibilidad de sitios de nucleación [11,12]. Por lo que, en trabajos futuros será necesario ajustar la formulación de la solución UB y del hormigón para generar las condiciones óptimas que favorezcan la precipitación de CaCO_3 y lograr cambios en la estructura de poros.

6. Conclusiones

Los resultados de este estudio se enmarcan en la investigación que tiene por objetivo mejorar la durabilidad del hormigón a partir del proceso de precipitación de CaCO_3 por biomineralización. En este artículo, se evaluó específicamente las características de un hormigón (UB) elaborado con una solución denominada UB, que consiste en una disolución de urea en agua destilada hervida a la que se añade un concentrado de bacterias *Lysinibacillus sphaericus* 2362 (biomasa), comparándolo con un hormigón de igual dosificación, elaborados con agua destilada hervida (Patrón). De la comparación, no se observan diferencias significativas entre las propiedades del hormigón Patrón y UB.

Inicialmente se verificó que la solución UB cumple con los requisitos de la norma

IRAM 1601 (2012) y es apta para su uso como agua de amasado en morteros y hormigones.

Por otro lado, no se evidenció la cicatrización de fisuras en morteros elaborados con solución UB monitoreados hasta la edad de 8 meses.

Estos resultados indican que el proceso de precipitación de CaCO_3 no se ha producido, o no ha alcanzado una tasa de precipitación que modifique y mejore las características del hormigón, por lo que se concluye que se debe ajustar la formulación de la solución UB y del hormigón para favorecer la precipitación de CaCO_3 y lograr cambios en la estructura de poros.

Considerando que el proceso de precipitación de CaCO_3 por biomineralización depende principalmente de la actividad metabólica de la bacteria ureolítica y de la disponibilidad de ion calcio, se prevé en trabajos futuros la necesidad de modificar la solución UB y evaluar la incorporación de una fuente de calcio en morteros y hormigones experimentales.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo fue financiado por la Universidad Tecnológica Nacional (PID: MAPPAFE0008210).

Contribución de autoría

Rupp, Sharon; Cerutti, Catalina y Baqué, Augusto: Investigación, redacción original-borrador. Gonzalez, Dianela: Investigación, redacción original-borrador. Ferreras, María Emilia: Metodología, redacción original-borrador. Guillarducci, Anabela: Conceptualización, metodología, redacción-revisión-edición. Puga, Raúl Esteban: Conceptualización, redacción-revisión-edición.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] Gambetta Rossi, S. (2019). Hormigón auto-reparante basado en el uso de bacterias que precipitan minerales. En G. Rodríguez de Sensale, y V. De Lima (Eds.), *Memorias de hormigones especiales* (pp. 19–29). Universidad de la República.
- [2] Giovambattista, A. (Ed.) (2011). *Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005* (1ra ed.). Ed. INTI CIRSOC.
- [3] Rupp, S., y Cerutti, C. (2021). Biohormigones: viabilidad de las bacterias y su afectación en las propiedades físico-mecánicas del hormigón. En P. Acevedo, M. Avalo, y M. Tulián (Colab.), A. R. Tymoschuk (Compil.), *JIT 2021: Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos* (pp. 253–257). Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe.
- [4] Tiano, P., Biagiotti, L., y Mastromei, G. (1999). Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*, 36(1-2), 139–145. <https://doi.org/fxfx2f>
- [5] Seifan, M., Samani, A. K., y Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 2591–2602. <https://doi.org/f8cvkd>
- [6] Pérez-González, T., Valverde-Tercedor, C., y Jiménez-López, C. (2010). Biomineralización bacteriana de magnetita y aplicaciones. En L. Fernández Díaz, y J. M. Astilleros García-Monge (Eds.), *Seminario de la Sociedad Española de Mineralogía - Biominerals and Biomineralization Processes* (Vol. 7) (pp. 58–74). Sociedad Española de Mineralogía.
- [7] Gonzalez, D., Guillarducci, A., Grether, R., Guerrero, S., y Andrés, F. (2023). Precipitación de carbonato de calcio inducida por microorganismos. Evaluación de su utilidad en la reparación de fisuras en morteros de experimentación. *Encontro Latino Americano e Europeu Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, 3, 947–953.
- [8] Muhammad, N. Z., Shafaghat, A., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Ghoshal, S. K., Yasouj, S.

- E. M., Ganiyu, A. A., Kouchaksaraei, M. S., Kamyab, H., Taheri, M. M., Shirdar, M. R., y McCaffer, R. (2016). Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 1123–1132. <https://doi.org/ggbqnr>
- [9] Marzari, M. J., González, D. G., Maldonado Torales, M., Manrique, H. L., Crespo, K. A., Páez, P. L., Paraje, M. G., y Guillarducci, A. G. (2022). Biocementation using *Lysinibacillus sphaericus* to improve building material physical-mechanical properties. En SAMIGE (Ed.), *XVII Congreso Argentino de Microbiología General - Sociedad Argentina de Microbiología General - Libro de Resúmenes* (pp. 147–148). SAMIGE.
- [10] Rupp, S., y Cerutti, C. (2023). Biohormigones: evaluación del agua de amasado. *AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN)*, 24, 1–7. Recuperado a partir de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1273>
- [11] Hammes, F, y Verstraete, W. (2001). Bacterial Ca^{2+} metabolism as the key to microbial carbonate precipitation. *Meded RijksunivGent Fak Landbouwk Toegep Biol Wet.*, 66(3a), 169–172.
- [12] Bauerlein, E. (2003). Biomineralization of unicellular organisms: an unusual membrane biochemistry for the production of inorganic nano- and microstructures. *Angewandte Chemie International Edition*, 42(6), 614–641. <https://doi.org/c5fdg5>