

Endosporas en la resistencia mecánica de un concreto: autorreparación de grietas

Endospores on the mechanical strength of concrete: self-healing of cracks

J.A. Cuadros-Portales ^a, M. Gallardo-Heredia ^{a,*}, J.J. Sosa-Santillán ^a, C.M. López-Badillo ^a, E.M. Múzquiz-Ramos ^{a,*}

^a Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

Resumen

El desarrollo de microgrietas afecta al concreto convencional reduciendo su durabilidad y resistencia estructural, aumentando los costos de mantenimiento aunado a un consumo mayor de cemento Portland. Se estudiaron las propiedades de concretos elaborados con cemento Portland, estas formulaciones fueron adicionadas con microorganismos y nutrientes precursores de CaCO_3 , materiales conocidos como concretos autorreparables. Se realizaron pruebas de regeneración, ensayos de densidad, porosidad y resistencia a la compresión. Los resultados de Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Difracción de Rayos-X (DRX) indicaron que al utilizar un 9% en peso (e.p.) de aditivo, las endosporas de los *Bacillus subtilis* promovieron la formación de cristales de CaCO_3 regenerando grietas de hasta 1mm de espesor. Los ensayos de resistencia a la compresión indicaron un incremento de ~70% para sistemas con aditivo respecto a sistemas sin adición de agente reparador. El costo aumentó 14%, respecto a muestras sin aditivos, no obstante, la mezcla permitió mantener la resistencia mecánica de diseño con 42% menos de cemento

Palabras Clave:

Concreto, cemento, grietas, autorreparable, microorganismos.

Abstract

The development of microcracks affects conventional concrete, reducing its durability and structural strength, increasing maintenance costs, and its consumption of Portland cement. The properties of concrete made with Portland cement were studied. These formulations were supplemented with microorganisms and CaCO_3 precursor nutrients, materials known as self-healing concrete. Regeneration tests, density, porosity, and compressive strength tests were performed. Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) results indicated that when using 9% by weight (wt.) of additive, *Bacillus subtilis* endospores promoted the formation of CaCO_3 crystals, regenerating cracks up to 1 mm thick. Compressive strength tests indicated an increase of ~70% for systems with additives compared to systems without the addition of a repair agent. The cost increased by 14% compared to samples without additives, however, the mix allowed the design mechanical strength to be maintained with 42% less cement.

Keywords:

Concrete, cement, cracks, self-repairing, microorganisms.

1. Introducción

En la actualidad existe un gran interés en la investigación y desarrollo de materiales con propiedades físicas y químicas adecuadas, para diversas aplicaciones científicas y tecnológicas.

En los últimos diez años, la investigación sobre el concreto autorreparable, la cual depende de pequeños organismos vivos, no ha tenido un impacto significativo en el área de la construcción (Villegas *et al.*, 2013). La razón de esta falta de impacto es que, estos microorganismos no pueden soportar la tensión a la que se ven sometidas las estructuras de concreto (Wang *et al.*, 2014). Por este motivo, la nueva combinación de bacterias y nutrientes debe ser lo suficientemente resistente y asequible para compensar los costos asociados al mantenimiento del concreto agrietado

(Yamasamit N. *et al.*, 2023). Esto es esencial para su aceptación en la industria de la construcción, y

a que el concreto es el material de construcción más utilizado en todo el mundo (Seifan *et al.*, 2019). Desafortunadamente este material es propenso a desarrollar grietas que, sin el cuidado adecuado, pueden convertirse en vías de humedad y de otros agentes nocivos, afectando su estructura y sus refuerzos estructurales (Cuadros *et al.*, 2019), (Harmsen, 2017), (Jonkers *et al.*, 2010). Esto puede hacer que las propiedades mecánicas sean ineficientes e incluso conducir a la demolición de estructuras o la construcción de otras nuevas, lo que en última instancia aumenta el uso de cemento Portland (Jonkers 2007). Durante el crecimiento de las endosporas a partir de nutrientes adecuados, se producen aminoácidos, los cuales están directamente relacionados en la

*Autor para la correspondencia: emuzquiz@uadec.edu.mx

Correo electrónico: emuzquiz@uadec.edu.mx (Elia Martha Múzquiz-Ramos), j.cuadros@uadec.edu.mx (Juan Andrés Cuadros-Portales), marisol.gallardo@uadec.edu.mx (Marisol Gallardo-Heredia), gdejsoa@uadec.edu.mx (Gerardo de Jesús Sosa-Santillán), clllopezb@uadec.edu.mx (Claudia Magdalena López Badillo).

formación del CaCO_3 . La formación de estos cristales de CaCO_3 , tienden a llenar el volumen de las grietas. (Zamba *et al.*, 2023)

Por otro lado, un problema creciente que está bajo observación es el proceso de producción de cemento Portland, debido a que en este se liberan cantidades significativas de CO_2 por la descarbonatación de las materias primas, siendo este gas el principal contribuyente al efecto invernadero que se ha convertido en un problema medioambiental al ser precursor del calentamiento global y consecuentemente del cambio climático (Magallanes R. *et al.*, 2024).

Un enfoque innovador para abordar el problema de las grietas del concreto es la biorreparación, el cual es un proceso que se basa en microorganismos que producen un mineral que sella las grietas en presencia de un nutriente adecuado llamado CaCO_3 (Yamasmit *et al.*, 2023). Para que este método tenga éxito, los microorganismos a utilizar deben soportar la alta alcalinidad de la mezcla de concreto y las tensiones mecánicas a las que es sometido durante su vida útil.

Bacillus subtilis, es un microorganismo robusto capaz de formar endosporas latentes, por lo que es el principal candidato para esta tarea ya que se puede encontrar en el suelo, el aire, el agua y en la mayor parte de la vegetación, puede soportar condiciones altamente alcalinas y obtiene fácilmente nutrientes de su entorno, lo que lo hace adaptable a casi cualquier hábitat natural (Cuadros *et al.*, 2020) (Viveros-Aguilar *et al.*, 2024). Además, esta bacteria no es patógena para los humanos y tiene antecedentes de ser utilizada como precursora del CaCO_3 a través del proceso de ureolisis (Hoffmann *et al.*, 2021). Las endosporas son un mecanismo de defensa que permite a estas células procariontas sobrevivir en ambientes hostiles, gracias a proteínas especializadas llamadas SASP (small acid-soluble proteins). Cuando las endosporas germinan utilizando los nutrientes adecuados, estas proteínas se descomponen rápidamente, dando lugar a la producción de aminoácidos esenciales para el crecimiento. Esto, a su vez, conduce a la generación de CaCO_3 que sella eficazmente las grietas del concreto (Wang *et al.*, 2012), (Pérez y Castaño, 2013), (Wang *et al.*, 2014).

El objetivo de esta investigación consiste en el estudio del efecto de endosporas de *Bacillus subtilis* sobre la resistencia a la compresión de un concreto, analizando el efecto de autorrellenado sobre las grietas presentes en el material y su desarrollo microestructural.

2. Desarrollo experimental

Los materiales que se utilizaron fueron cemento Portland Compuesto (Holcim Apasco) clase C Resistencia 30. El agregado fino fue arena caliza estandarizada de tamaño nominal $\frac{3}{4}$ mientras que el agregado grueso fue caliza de tamaño nominal de 5/16, ambos con forma de partícula angular. El concreto para una $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ se preparó en una relación 5:4:1.75 de grava, arena y cemento respectivamente y con una relación a/c 0.44.

Las bacterias *Bacillus subtilis* no pueden ser agregadas al concreto en el estado reproductivo de división, debido a que la alta alcalinidad del concreto no favorece su crecimiento (Cuadros *et al.*, 2020). Para solucionar esto, las bacterias fueron agregadas en forma de endosporas, asegurando su potencial reproducción y posterior producción de CaCO_3 (Wang *et al.*, 2015). Las endosporas fueron cultivadas durante un período de 4 días a 35°C y 100 rpm utilizando prácticas microbiológicas y nutrientes comunes, incluyendo caldo nutritivo (elaborado a partir de extracto de carne de res y peptona), sacarosa, levadura y malta. La concentración de endosporas se calculó usando una cámara de recuento Neubauer Marienfeld encontrando aproximadamente $1.63 \times 10^9 \pm 930$ endosporas por mililitro. Este método, ofrece una mejora significativa con respecto a investigaciones anteriores,

donde las técnicas especializadas podían tardar hasta 28 días en producir endosporas (Van Tittelboom y de Belie, 2013). Esta reducción en el tiempo de producción es crucial para prevenir demoras en el proceso de fabricación de concreto cuando se utilizan microorganismos.

Una vez obtenidas las endosporas y siguiendo el procedimiento descrito por Cuadros Portales (Cuadros *et al.*, 2020), se agregaron nutrientes como extracto de levadura, urea y nitrato de calcio para que sirvieran como precursores del CaCO_3 . Estas endosporas y nutrientes fueron inmovilizados en una matriz de alginato la cual fue reticulada con CaO . Con este método, se logró generar hasta un 79 % de CaCO_3 en forma de calcita (equivalente a 100 g). La amalgama resultante de endosporas y nutrientes dentro del gel reticulado se denominó Agente Reparador. Con la finalidad de analizar el porcentaje de porosidad y absorción por sistema, se prepararon 3 muestras seleccionadas de los sistemas propuestos (Tabla 1). Estas fueron muestras cilíndricas de concreto con una resistencia de control de $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ con medidas de 10 cm de diámetro por 3 cm de espesor, con cantidades de 2 a 18 % e.p. de agente reparador en función del cemento. Se conoce que ambas propiedades están relacionadas directamente con la densidad (Vélez, 2010), (Mancini *et al.*, 2019). Estas fueron determinadas siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C642 (ASTM C642-13, 2013).

Para la elaboración de los cilindros se siguió el procedimiento estándar (ACI, 1997), para fabricar la mezcla de control con una resistencia de diseño de $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de curado según lo establecido en la norma ASTM C192 (ASTM C192, 2019). Estos cilindros se prepararon con porcentajes de 2-18 % e.p., de agente reparador, como adición respecto al cemento; Los cilindros, de 5 cm de diámetro y 15 cm de altura, se ensayaron por compresión con 7, 14 y 28 días de curado según la norma ASTM C39 ensayando 3 muestras por tiempo de curado (ASTM C39, 2020). La porosidad, absorción y densidad se determinaron según la norma ASTM C642, analizando 3 muestras seleccionadas de los sistemas propuestos (Tabla 1) (ASTM C642-13, 2013).

Para simular grietas en el concreto se realizaron 3 escarificaciones de dimensiones de A) 0.5 x 1 mm, B) 1 x 2 mm, y C) 2 x 3 mm. El equipo que se utilizó fue una cortadora angular con disco de diamante, prevista con un dispositivo de medición y control de profundidad y anchura de la escarificación. Estas escarificaciones se aplicaron sobre muestras de concreto de 10 cm de diámetro y 3 cm de espesor, como se ilustra en la Figura 1, y con los porcentajes 2, 4, 9, 10 y 18% e.p., de agente reparador. Los criterios para establecer las medidas de escarificación se referenciaron de diversos estudios sobre los tamaños típicos de grietas que se desarrollan en el concreto (Maruyama y Lura, 2019), (Ahn *et al.*, 2019), (Li y Li, 2019).

Las muestras fueron sometidas a una humedad ambiental controlada del 40% durante un período de 60 días, simulando las condiciones ambientales aproximadas a las que se expone el concreto (Vera y Trujillo 2013). Para observar de cerca el sellado y la producción de CaCO_3 en las escarificaciones, se analizaron utilizando un microscopio óptico digital VE-M5LCD (fabricado por Velab Co), con una resolución óptica de 100 μm , aumentos hasta 1600X y resolución digital de 1080 pixeles (HD). Para observar la morfología presente se tomaron micrografías del CaCO_3 que creció en el interior de las grietas a los 7, 14 y 28 días, utilizando un microscopio electrónico de barrido Hitachi modelo SU8010 (fabricado por Hitachi High-Tech), se determinó el tipo de fase y la estructura cristalina mediante Difracción de Rayos-X (DRX) PANalytical (fabricado por Malvern Panalytical) empleando una fuente de radiación de CuK (alfa) a una potencia de 40 Kv y corriente de 30 Ma, de 10-80 grados y una velocidad de barrido de 0.026 grados/s. Los equipos utilizados se encuentran

en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila.

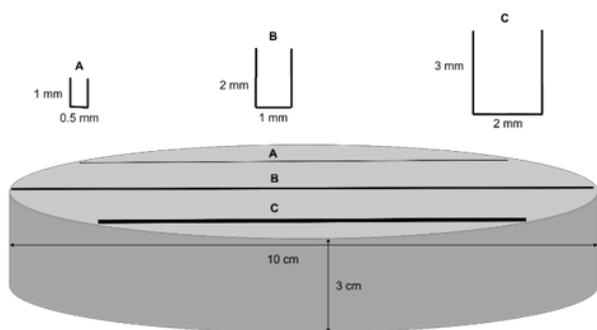


Figura 1: Esquema de las escarificaciones realizadas a las muestras, las letras A, B y C representan el espesor y profundidad.

Para el análisis de costos del agente reparador y del concreto autorreparable, se consideró el precio promedio de los materiales utilizados, excluyendo los de fabricación, ya que estos pueden variar en función de las condiciones locales de fabricación y venta a nivel mundial. El análisis del costo promedio por gramo del agente reparador se llevó a cabo relacionándolo con el porcentaje requerido para 1 m³ de concreto regular, que asciende aproximadamente a \$70,00 (Concrete Price, 2023). En el análisis de costos del agente reparador se consideraron los materiales necesarios para la producción de endosporas *Bacillus subtilis* así como los precios aproximados de varias regiones alrededor del mundo (Jaganmohan, 2023), (Index Mundi, 2020), (Quiminet, 2023), (Yang et al., 2020).

3. Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las variaciones porcentuales de densidad, absorción y porosidad en función del agente reparador en un rango de 2% a 18% e.p.

Tabla 1: Resultados de pruebas de absorción, porosidad y densidad.

% agente reparador	Densidad (kg/m ³)	% Absorción	% Porosidad
Control	2413.00	9.40	17.86
2	2695.39	6.85	14.53
4	2823.14	8.26	18.35
9	2635.25	8.30	17.22
10	2585.51	8.23	16.76
18	2593.22	9.00	18.38

Se observa que las muestras con agente reparador exhibieron densidad mayor al promedio (2,570.05 kg/m³), absorción menor al promedio (9.82%) y porosidad reducida en comparación con la mezcla control (19.29%). Estos valores se consideran aceptables para la producción de muestras cilíndricas. Se espera que, en el concreto con menor absorción y porosidad, la penetración de líquidos u otros agentes nocivos para éste y el acero de refuerzo disminuya (Arya, 2016), (Ai Z. et al., 2015).

Las variaciones observadas en los resultados de absorción, porosidad y densidad se pueden atribuir al mecanismo de biomineralización de la producción de CaCO₃ a través de la ureolisis cuya formación depende de la disponibilidad de agua y oxígeno necesario para la germinación temprana de endosporas. Menor porosidad reduce la absorción de agua limitando la mineralización si el entorno es demasiado denso mientras que una porosidad excesiva puede afectar las propiedades mecánicas (Lu et al., 2021). Este mecanismo se activa durante el proceso de fraguado del concreto. En su estado fresco, el concreto exhibe diferentes concentraciones de agua y oxígeno dentro de los poros dispersos por toda la matriz.

Este proceso está influenciado por la disposición de las partículas y la uniformidad de la superficie de la muestra. Como resultado, la producción de CaCO₃ tiende a ser algo aleatoria, a pesar de tener un porcentaje calculado de porosidad. En el comportamiento típico del concreto, el aumento de la densidad reduce proporcionalmente la porosidad y la absorción (Van y Belie, 2013), (Vélez, 2010,) (Millones, 2008), (Solís-Carcaño y Moreno 2006). Sin embargo, en este caso, la densidad cambia independientemente del porcentaje de porosidad.

En la Figura 2, se presentan los difractogramas correspondientes al CaCO₃ producido a través del proceso de biomineralización.

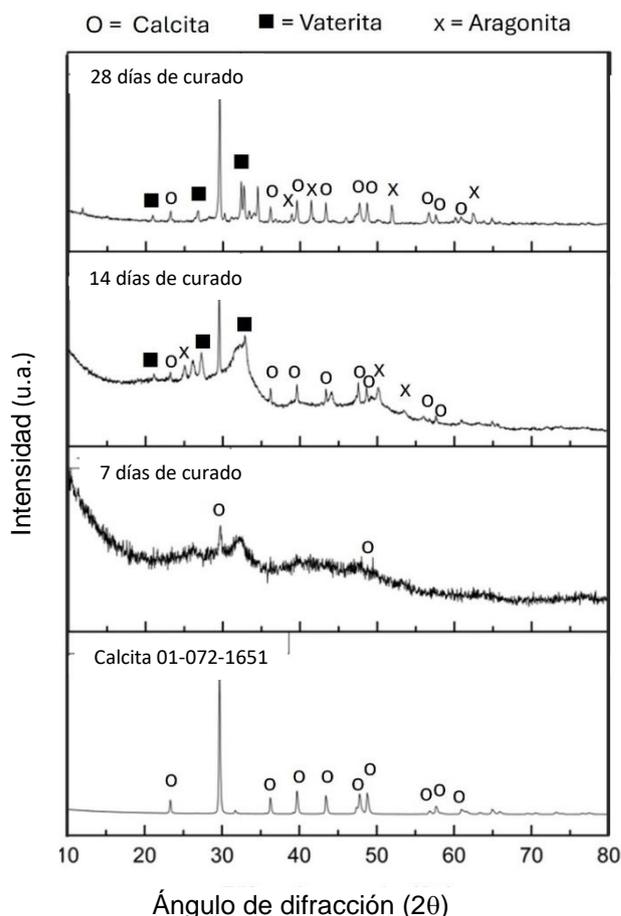


Figura 2: DRX de CaCO₃ producido por biomineralización de *Bacillus subtilis*.

A los 7 días, el patrón de difracción de Rayos-X, indica que el CaCO₃ analizado se encuentra como fase amorfa, la cual es una fase extremadamente inestable bajo condiciones normales

actuando como fase precursora transitoria de calcita (ICDD, PDF-2-01-072-1651), aragonita (ICDD, PDF-2-98-016-1820) o vaterita (ICDD, PDF-2-98-001-8127) tal y como se observa en los difractogramas de los 14 y 28 días donde se presentan reflexiones correspondientes a estas fases, donde la cristalización del CaCO_3 produce picos más definidos (Sun R. *et al.*, 2020). El proceso de biomineralización se inicia cuando el nutriente y el microorganismo entran en contacto con el agua residual, dentro de la mezcla y su entorno circundante. La transformación y cristalización del CaCO_3 amorfo se produce a través de una secuencia energética decreciente de dos fases cristalinas: CaCO_3 monohidratada y CaCO_3 hexahidratada dando lugar a tres modificaciones polimórficas anhidras como vaterita, aragonita y calcita (la secuencia puede o no involucrar todas las transformaciones). Estas transformaciones involucran una serie de procesos de ordenamiento, deshidratación y cristalización, reduciendo la entalpía del sistema, siendo la cristalización del material amorfo deshidratado la que más reduce la entalpía (Nielsen *et al.*, 2014) (Molnár *et al.*, 2023). La secuencia de transformación observada en la biomineralización sugiere la fase CaCO_3 hidratado, que luego se convierte en fase anhidro que implica la reorganización estructural durante la deshidratación finalizando con la cristalización mayormente de calcita y en menor proporción aragonita y vaterita (DRX 28 días) (Addadi *et al.*, 2003).

En la Figura 3 se presenta la evolución de la morfología producida por biomineralización de *Bacillus subtilis* de 7 a 28 días. A los 7 días de curado, la producción de CaCO_3 comienza con la transformación de un sólido amorfo a un sólido con una microestructura más organizada con formas bien definidas similares a diatomeas (Ehrlich *et al.*, 2016).

A medida que avanza el período de curado, estas sirven como puntos de nucleación para el crecimiento y la definición de cristales. A los 14 días de fraguado, las formas de diatomeas están cubiertas por el crecimiento de cristales de CaCO_3 . A los 28 días, ya muestran una estructura cúbica distintiva característica de la calcita, que también se puede observar en una micrografía ampliada en la marca de los 28 días, lo que refleja el proceso de cristalización de CaCO_3 o calcita.

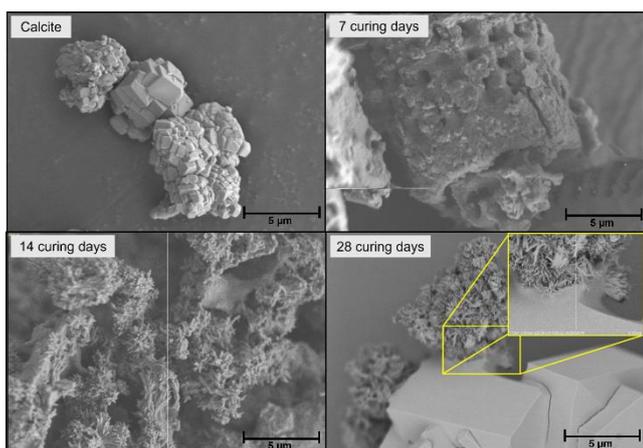


Figura 3. Micrografías de CaCO_3 producido por biomineralización de *Bacillus subtilis*.

En la Figura 4 se presenta la evaluación de la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días de curado.

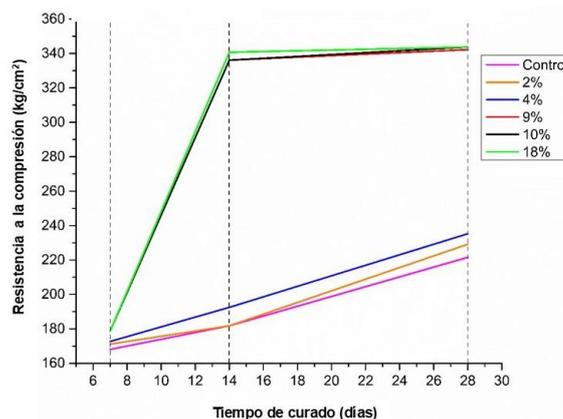


Figura 4: Resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, con porcentajes de agente reparador de 2, 4, 9, 10 y 18 % en peso.

A los 7 días de curado todos los sistemas con adición de agente reparador superaron la resistencia obtenida por la mezcla control al mismo tiempo de curado. A los 14 días, se observa un importante aumento de la resistencia para los sistemas con adición de 9, 10 y 18 % e.p. de agente reparador, superando por ~ 160 kg/cm^2 a la muestra control manteniéndose esta resistencia a los 28 días de curado, tiempo en el que se asume las reacciones de hidratación se han llevado a cabo casi en su totalidad. Los resultados indican que con 9 % e.p. de adición de agente reparador, se desarrollan resistencias superiores hasta en ~ 70 % respecto a la mezcla control, por lo tanto, no es necesario introducir más agente reparador, debido a que no se presentaron cambios sustanciales en la resistencia.

Al examinar las escarificaciones después del proceso de autorreparación, se observó una capa cristalina blanquecina de CaCO_3 en la superficie de las muestras que contenían 9-18 % e.p. de agente reparador. En la Figura 5a la presencia de esta capa es claramente visible donde cristales de distintos tamaños se encuentran distribuidos homogéneamente en casi toda la superficie de la muestra.

Por otro lado, en la Figura 5b correspondiente a una mezcla sin agente autorreparador no se observa la presencia de cristales ni alteración en color que indique reacciones de formación de CaCO_3 . Esta clara diferencia entre las muestras analizadas indica la notable capacidad de reparación del concreto, donde la formación del CaCO_3 fue respuesta a las escarificaciones, mejorando su integridad estructural.

En la Figura 6 se presenta una secuencia del crecimiento de cristales de CaCO_3 en muestras seleccionadas curadas a 28 días. En la Figura 6a se observa una estructura común del concreto, con una escarificación con espesor y profundidad sin alteración o presencia de cristales en el interior de esta o en la superficie que indiquen reacciones de formación de CaCO_3 . Por otro lado, en la muestra con mismas condiciones que la anterior y con un contenido de 4 % e.p., de agente reparador (Figura 6b) se observa la presencia de cristales hasta de $54.13 \mu\text{m}$ dentro de la escarificación. No se observa un llenado completo, indicando que es necesario mayor porcentaje de agente reparador para sellar y densificar por completo la escarificación. En las muestras que contenían 9% y 18% e.p. de agente reparador, se observó el sellado casi completo de las escarificaciones que oscilaban entre 0.5 y 1 mm, como es evidente en la Figura 6c y 6d. Sin embargo, para las escarificaciones que medían 2 mm solo se observó una regeneración parcial (6e y 6f). Estos resultados demuestran la capacidad de autorreparación del concreto, particularmente en el tratamiento de grietas pequeñas, así como la influencia de la concentración de agente reparador en el proceso de sellado.

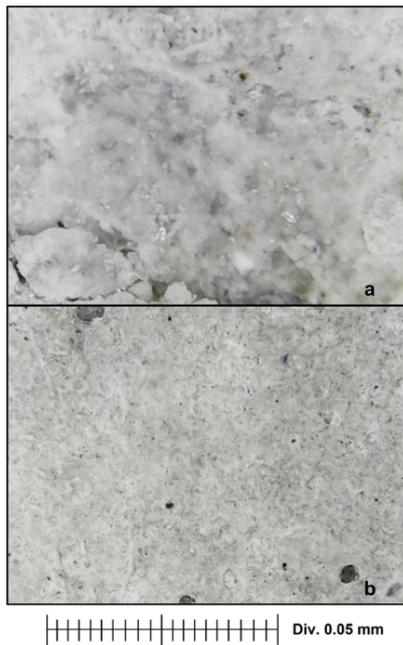


Figura 5: a) Superficie de concreto con 9% e.p. de agente reparador y b) muestra control.

Para presentar una visión más clara del progreso de la regeneración en la Tabla 2 se presentan porcentajes aproximados de llenado en función de la cantidad de agente reparador sobre escarificaciones de 0.5 (A), 1.0 (B) y 2.0 (C) mm. El porcentaje de regeneración fue estimado mediante análisis de imagen con software Imagej (sin licencia restrictiva).

Tabla 2: Porcentaje de regeneración de las escarificaciones.

% e.p. Agente reparador	% Regeneración en cada escarificación		
	A (0.5mm)	B (1.0 mm)	C (2.0 mm)
2	15	10	5
4	15	10	5
9	99	99	40
10	100	100	40
18	100	100	50

Los resultados indican una clara relación con el aumento en la resistencia mecánica, donde una mayor concentración de agente reparador origina altas resistencias y el valor más alto se obtiene con 9% e.p., siendo esta la concentración que presenta ~ 99% de sellado de escarificación en grietas de 0.5-1.0 mm (6c), un contenido 18% e.p. de agente reparador no indica un cambio significativo en el sellado de las escarificación presentando una densificación similar a la del contenido de 9% e.p. (6d). Para las escarificaciones de 2.0 mm las concentraciones utilizadas en este trabajo no cumplieron con un sellado óptimo, debido a que el crecimiento de cristales no fue en la cantidad necesaria para efectuar una densificación y óptimo sellado. Por lo tanto, se puede determinar que las concentraciones de 9-18% e.p. de agente reparador solo son aplicables para grietas con un espesor de 0.5-1.0 mm.

3.1 Análisis de costos

Para el análisis de costos de producción por metro cúbico de agente reparador evaluando únicamente gastos de materia prima (consumibles) se consideró que 1 g de nutrientes tiene un costo de \$0.0002 USD, y 1 gramo de endosporas aproximadamente \$0.001655 USD. Teniendo en cuenta que la composición del agente reparador es una mezcla 50-50 de nutrientes y endosporas, el costo final de 1 gramo equivale aproximadamente a \$0.0009275 USD.

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión, con un porcentaje 9% e.p. del agente reparador, se incrementa la resistencia a la compresión ~ 70%, y un incremento en este porcentaje ya no es significativo, por lo que se establece el 10% e.p. como porcentaje óptimo para la producción de concreto autorreparable para establecer un margen de seguridad en aplicaciones reales, sin aumento significativo de costo. Acorde a lo anterior se calculó el costo del concreto a diferentes valores de resistencia a la compresión tal y como se presenta en la Figura 7. La elaboración de esta gráfica se realizó de acuerdo con un diseño de concreto con un tamaño nominal de agregado de 3/4" y un asentamiento de 8-10 cm siguiendo el procedimiento establecido en la norma ACI 211 (ACI, 1997). Los resultados de estos cálculos indican lógicamente un incremento en el costo de producción de un concreto autorreparable donde el ahorro significativo va a recaer en estructuras más duraderas, menos costos de mantenimientos y estructuras con mayores propiedades mecánicas y entrar al mercado como un material de construcción con una visión sostenible.

El distintivo más sobresaliente de este concreto con agente autorreparable es que requiere un 42% menos de cemento en peso. Al multiplicar el peso original de cemento requerido para el concreto convencional por un factor de resistencia de 0.5882 es posible determinar la cantidad requerida para el concreto

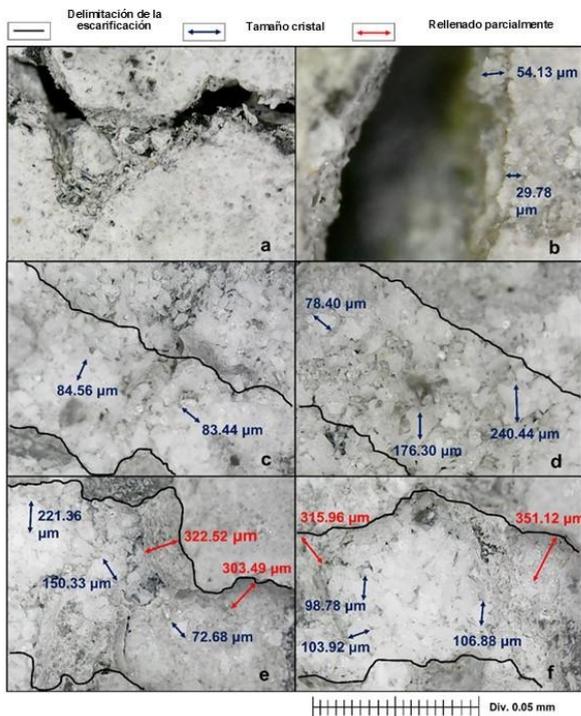


Figura 6: Escarificaciones a) A muestra de control, b) A con 4% e.p. de agente reparador, c) B con 9% e.p. de agente reparador, d) B con 18% e.p. de agente reparador, e) C con 9% e.p. de agente reparador y f) C con 18% e.p. de agente reparador.

autorreparable. La reducción en el uso de cemento no sólo trae ventajas económicas, sino que también conlleva implicaciones ambientales positivas, ya que la producción de cemento está asociada a importantes problemas medio ambientales generados por las altas emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) y la demanda de recursos naturales como materias primas para su producción (Magallanes R. et al., 2024).

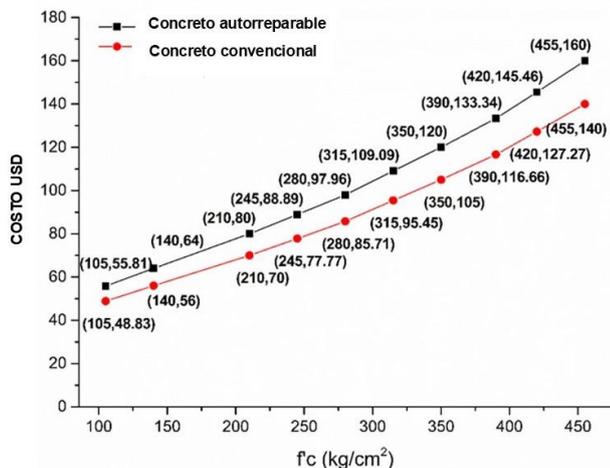


Figura 7: Proyección de costos del concreto autorreparable con 10% e.p. de agente reparador vs un concreto convencional.

Conclusiones

Este estudio demostró que el uso de endosporas de *Bacillus subtilis* encapsuladas con nutrientes precursores de carbonato de calcio es efectivo para desarrollar concreto autorreparable. A través de la biomineralización inducida por estos microorganismos, se logró sellar grietas de hasta 1 mm de ancho utilizando un 9% e.p. de agente reparador, incrementando la resistencia a la compresión ~70%. Este resultado permitió mantener el desempeño mecánico con una reducción del 42% en el uso de cemento Portland. Aunque el costo aumentó en un 14%, por 1 m³, esta tecnología en el área de la construcción se presenta como una alternativa viable, sostenible y eficiente para mejorar la durabilidad del concreto.

Agradecimientos

El autor principal agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca #922845 y al Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

ACI Committee 211 (1997). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute, USA.

Addadi L., Raz S., Weiner S., (2003). Taking advantage of disorder: amorphous calcium carbonate and its roles in biomineralization. *Advanced Materials* 15(12), 959-970. DOI:10.1002/adma.200300381 15:959-970

Ahn E., Shin M., Popovics J. S., Weaver R. L., (2019). Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of microcracking damage in concrete.

Cement and Concrete Research 124, 105862. DOI:10.1016/j.cemconres.2019.105862

Ai Z., Sun W., Jiang J., (2015). Recent status of research on corrosion of low alloy corrosion resistant steel and analysis on existing problems. *Corrosion Science Protection Technology* 27, 525-536. DOI:10.11903/1002.6495.2014.407

Arya C., (2016). Corrosion of steel in concrete: do cracks matter?, RILEM Proceedings pro117. 3rd International RILEM Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. RILEM Publications SARL 9-17.

ASTM International. (2013). ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2018). ASTM C78 / C78M-18, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2019). ASTM C192 / C192M-19, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2020). ASTM C39 / C39M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA.

Concrete Prices 2023 - How Much Does Concrete Cost? - Concrete Network. Recuperado de: <https://www.concretenetwork.com/concrete-prices.html>.

Cuadros Portales J. A., Sosa Santillán, G. de J., Avalos Belmontes F., Múzquiz Ramos E. M., (2019). Obtaining CaCO₃ with *Bacillus subtilis* for the manufacture of self-repairing concrete. *AvaCient* 7, 29-38. Recuperado de: www.itchetumal.edu.mx/images/2019/12/DICIEMBRE/AVACIENT/2/4.pdf.

Cuadros Portales J. A., Múzquiz Ramos E. M., and Sosa Santillán G. de J., (2020). Adaptation of the *Bacillus subtilis* for the development of a self-repairing concrete. *Revista CiBlyT, Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología* 43, 79-82.

Ehrlich H., Motylenko M., Sundareshwar P. V., Ereskovsky A., Zglobicka I., Noga, T., Płociński, T., Tsurkan, M. V., Wyroba, E., Suski, S., Bilski, H., Wysokowski, M., Stöcker, H., Makarova, A., Vyalikh, D., Walter, J., Molodtsov, S.L., Bazhenov, V.V., Petrenko, I., Langer, E., Richter A., Niederschlag, E., Pisarek, M., Springer A., Gelinsky, M., Rafaja, D., Witkowski, A., Meyer, D.C., Jesionowski T., Kurzydłowski, K.J., (2016). Multiphase Biomineralization: Enigmatic Invasive Siliceous Diatoms Produce Crystalline Calcite. *Advanced Functional Materials* 26 2503-2510. DOI:10.1002/adfm.201504891

Fertilizer International, Fertilizer Week, and World Bank, "Urea - Precio Mensual - Precios de Materias Primas." (2020) Recuperado de: <https://www.indexmundi.com>

Harmsen T. E., (2017). Diseño de estructuras de concreto armado. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Hoffmann, T. D., Paine, K., Gebhard, S., (2021). Genetic optimisation of bacteria-induced calcite precipitation in *Bacillus subtilis*. *Microbial Cell Factory* 20, 214. DOI:10.1186/s12934-021-01704-1

Madhumitha, J., (2023). Change in global cement prices. *Statista*. Recuperado de: <https://www.statista.com/statistics/248359/change-in-global-cement-prices/>

Jonkers H. M., (2007). Self Healing Concrete: A Biological Approach in Self Healing Materials. In: Sybrand Zwaa (Ed), *An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*. Springer, pp195-204. DOI:10.1007/978-1-4020-6250-6

- Jonkers H. M., Thijssen A., Muyzer G., Copuroglu O., Schlangen E., (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering* 36, 230-235. DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
- Li K., Li L., (2019). Crack-altered durability properties and performance of structural concretes. *Cement and Concrete Research* 124, 105811. DOI:10.1016/j.cemconres.2019.105811
- Lu, H., Huang, Y. C., Hunger, J., Gebauer, D., Cölfen, H., Bonn, M., (2021). Role of Water in CaCO₃ Biomineralization. *Journal of the American Chemical Society* 143(4), 1758-1762. DOI:10.1021/jacs.0c11976
- Magallanes R. R. X., Bazaldua M. M. M., Escalante G. I., (2024). Alternative hydraulic concretes based on calcium sulfate-granulated blast furnace slag composites. *Journal of Cleaner Production* 44, 141811. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.141811
- Mancini A., Frondini F., Capezzuoli E., Galvez Mejia E., Lezzi G., Matarazzi D., Brogi A., Swennen R., (2019). Porosity, bulk density and CaCO₃ content of travertines. A new dataset from Rapolano, Canino and Tivoli travertines (Italy). *Data in Brief*. 25, 104158. DOI:10.1016/j.dib.2019.104158
- Maruyama I., Lura P., (2019). Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research* 123, 105770. DOI:10.1016/j.cemconres.2019.05.015
- Millones Prado A. A., (2008). Concreto de alta densidad con superplastificante. Tesis. Universidad Ricardo Palma. Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/8ec9e807-5d6d-4605-b4c4-3fd6e144e955>
- Molnár Z., Dódony I., Pósfai M., (2023). Transformation of amorphous calcium carbonate in the presence of magnesium, phosphate, and mineral surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 345, 90-101. DOI:10.1016/j.gca.2023.01.028
- Nielsen, M. H., Aloni, S., De Yoreo, J. J., (2014). In situ TEM imaging of CaCO₃ nucleation reveals coexistence of direct and indirect pathways. *Science* 345(6201), 1158-1162.
- Pérez Mancilla X., Castaño D. M., (2013). Endospore formation in *Clostridium* and its interaction with solventogenesis, *Revista Colombiana de Biotecnología* 15, 180-188. Recuperado en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100020
- QuimiNet. (2023). Precios de Extracto de levadura en polvo – Información Comercial. Recuperado en: <https://www.quiminet.com/productos/extracto-de-levadura-en-polvo-17264245850/precios.htm>
- Seifan, M., Berenjian, A., (2019). Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. *Applied Microbiology and Biotechnology* 103, 4693-4708. DOI:10.1007/s00253-019-09861-5
- Solís-Carcaño R., Moreno E. I., (2006). Porosity analysis of concrete made with limestone aggregate. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* 21 101-109.
- Sun R., Tai Cheuk-Wai., Strømme M., Cheung O., (2020). The effects of additives on the porosity and stability on amorphous calcium carbonate. *Microporous and Mesoporous Materials* 292, 109736. DOI:10.1016/j.micromeso.2019.109736
- Van Tittelboom K., de Belie N., (2013). Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials* 6, 2182-2217. DOI:10.3390/ma6062182
- Vélez L. M., (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. *Revista Tecnológica* 25, 169-187. Recuperado de: <https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/20.500.12622/869/1/131-Manuscrito-245-1-10-20170208.pdf>.
- Vera M. J., Trujillo L. A., (2013). Factores relevantes de calidad en el servicio en el sector de concreto en el mercado de clientes pequeños y de hogar. *Panorama Socioeconómico* 31, 14-28. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/335057390> Factores relevantes de calidad en el servicio en el sector de concreto en el mercado de clientes pequeños y de hogar *Panorama Socioeconómico* ISSN 0716-1921#fullTextFileContent
- Villegas Flores N., Parapinski dos Santos A. C., (2013). Analysis of indicators that determine the sustainability level in special concretes. *Tecnura* 17, 12-25. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/262754014> Analysis of indicators that determine the sustainability level in special concretes
- Viveros-Aguilar O. A., Herrera-Alamillo M. A., Rodríguez-Zapata L. C., (2024). *Bacillus*: Microorganismos versátiles para la biorremediación del suelo. Desde el Herbario CICY 16, 163-168.
- Wang J. Y., de Belie, N., Verstraete W., (2012). Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 39, 567-577. DOI: 10.1007/s10295-011-1037-1
- Wang J. Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N., (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement Concrete Research* 56, 139-15. DOI:10.1016/j.cemconres.2013.11.009
- Wang J., Mignon A., Snoeck D., Wiktor V., Van Vlietgergrehe S., Boon N., De Belie N., (2015). Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. *Frontiers in Microbiology* 6, 1-14. DOI:10.3389/fmicb.2015.01088
- Yamasmit, N., Sangkeaw, P., Jitchaijaroen, W., Thongchom, C., Keawsawasvong, S., Kamchoom, V., (2023). Effect of *Bacillus subtilis* on mechanical and self-healing properties in mortar with different crack widths and curing. *Scientific Reports* 13, 7844. DOI:10.1038/s41598-023-34837-x
- Yang K., Xu M., Zhu J., (2020). Evaluating the impact of four major nutrients on gut microbial metabolism by a targeted metabolomics approach. *Journal of Proteome Research* 9, 1991-1998. DOI:10.1021/acs.jproteome.9b00806
- Zamba, D. D., Mohammed, T. A., (2024). Self-healing performance of normal strength concrete with *Bacillus subtilis* bacteria. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 9, 4 (2024). DOI:10.1007/s41024-023-00356-5