

El bioconcreto como agente reparante en estructuras de concreto Bio concrete as a repairing agent in concrete structures

Edith Hernández-Piedrazul ^a, Iván E. Castañeda-Robles ^b, Liliana Lizárraga-Mendiola ^{b,*}

^aLicenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bÁrea Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Las roturas en el concreto clasificadas de acuerdo con su espesor como fisuras o grietas, forman parte del cálculo estructural de cualquier obra civil, ya que se consideran como límites de servicio. Es necesario minimizar o erradicar la formación de grietas en el concreto, para garantizar el funcionamiento adecuado de la estructura diseñada y evitar daños futuros. Para mitigar estos daños se utilizan impermeabilizantes, inyecciones de resina, pastas, aditivos líquidos y en polvo. El objetivo de este trabajo es resaltar al bioconcreto como agente reparante de fisuras y grietas en estructuras de concreto sometidas a esfuerzos de compresión y tracción. Se presenta una revisión bibliográfica sobre el uso de bioconcretos para reparación de daños estructurales: síntesis, propiedades y sus aplicaciones. Se identifican las ventajas y desventajas que ayudan a anticipar la aparición de estas roturas, con el uso de un agente bacteriano para incrementar la capacidad de autorreparación.

Palabras Clave: Bacterias, concreto ecológico, deterioro, durabilidad.

Abstract

Cracks in concrete, classified according to their thickness as fissures or cracks, are part of the structural calculation of any civil work since they are considered service limits. It is necessary to minimize or eradicate the formation of cracks in the concrete, to ensure the proper functioning of the designed structure, and to prevent future damage. Waterproofing agents, resin injections, pastes, and liquid and powder additives are used to mitigate these damages. This work highlights bio concrete as a repair agent for fissures and cracks in concrete structures subjected to compression and traction efforts. A bibliographic review on bio concretes for structural damage repair is presented: synthesis, properties, and applications. The advantages and disadvantages that help anticipate the appearance of these breaks are identified by using a bacterial agent to increase the self-repair capacity.

Keywords: Bacteria, deterioration, durability, ecological concrete.

1. Introducción

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo debido a su trabajabilidad y resistencia. Sin embargo, en ocasiones los procedimientos de elaboración, colocación o curado no son los adecuados; incluso, se puede ver afectado por otros factores de origen físico y químico como la calidad de los materiales, mano de obra, métodos de aplicación, medio ambiente (Toirac-Corral, 2004). También, con el transcurso del tiempo este material comienza a deteriorarse (Sonali et al., 2019), afectando de manera directa su comportamiento mecánico y su calidad (Orozco et al., 2018) generando problemas de grietas en edificios, presas y otras obras de

infraestructura civil, debido a los esfuerzos de compresión y tracción, consiguiendo posteriormente su deterioro.

Las fisuras y grietas son roturas que aparecen en elementos estructurales como losas, vigas, columnas, trabes, etc. (Lv et al., 2016), que pueden comprometer la serviciabilidad y durabilidad de las estructuras (Bardales-Soriano, 2021). Por lo tanto, es importante atender su aparición para evitar las fugas y la corrosión en caso de que la estructura contenga acero en su interior. Además, cuando las roturas se encuentran expuestas a agentes contaminantes, la suciedad puede acentuar el ancho aparente de las grietas y hacer que sean más notables (Wight y MacGregor, 2009). Por otra parte, las fisuras son de menor nivel de gravedad; éstas son estrechas y alargadas (Souza, 2021), con aberturas de espesor de hasta 1 mm que afectan la superficie del concreto, y su origen se debe a

*Autor para la correspondencia: mendiola@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: he385797@uaeh.edu.mx (Edith Hernández-Piedrazul), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván E. Castañeda-Robles), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga-Mendiola).

cambios de humedad, temperatura y fuerzas de tensión del elemento. Por otra parte, las grietas son más profundas y marcadas (Souza, 2021), con un espesor mayor a 1 mm, que afectan a la estructura del concreto y su seguridad. La formación de micro fisuras afecta a propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la permeabilidad, reduciendo así la vida útil del concreto y aumentando el coste del mantenimiento y la reparación de las infraestructuras (Achal y Mukherjee, 2015).

El origen de ambas aberturas está asociado con fenómenos de índole natural como movimientos del suelo, sobrecargas, o variaciones térmicas que pueden causar corrosión en las armaduras (Sotomayor, 2020). Así mismo, el código ACI 224.R-01 (ACI 224.R-01, 2018) limita el ancho máximo de las fisuras y grietas en las estructuras de concreto sometidas a compresión y tracción (flexión) para diferentes condiciones climáticas y agresividad química (Sotomayor, 2020).

Con el paso del tiempo se han aplicado avances tecnológicos para hacer duradero al concreto convencional, por lo cual se ha implementado el uso de aditivos, impermeabilizantes, inyecciones de resinas y pastas (Conexión Expo CIHAC, 2021). Sin embargo, estos aditivos elevan los costos de producción y de mantenimiento, que durante el proceso de producción genera emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo al aumento de la contaminación (Giatec Scientific Inc., 2015; Rodgers, 2018). Como resultado, los investigadores enfocados en materiales de la construcción buscan una solución que contribuya de forma amigable con el ambiente, pero que a su vez no afecte la funcionalidad de las estructuras, ni eleve los costos de producción y mantenimiento del concreto (EPO, 2015). Para tal efecto, existen innovaciones tecnológicas como los bioconcretos (Daza-Sánchez y Guarnizo-Trujillo, 2020).

El bioconcreto se dio a conocer por el investigador Hendrik Marius Jonkers, quien desarrolló un bioconcreto incorporando bacterias en la mezcla que pueden producir piedra caliza (carbonato de calcio), la cual es capaz de rellenar la grieta (Gonzalez et al., 2018). La finalidad del bioconcreto es no requerir intervención humana para repararse después de haber sido utilizado en una construcción (BBC, 2016). Las bacterias empleadas pueden sobrevivir hasta 200 años en la estructura de concreto y se activan al sufrir una rotura (Giatec Scientific Inc., 2015). Además de garantizar las propiedades de autorreparación del material, estos microorganismos mejoran la resistencia a la tracción y disminuyen la permeabilidad del concreto (EPO, 2015). A partir de esta idea se desarrollaron tres productos utilizando el principio de Jonkers: Concreto autorreparable, mortero de reparación y un medio de reparación líquido (Palin et al., 2017). Con la utilización de este innovador material se espera mejorar su sustentabilidad, extender su vida útil y funcionamiento (Sierra et al., 2016). El bioconcreto también es un material cuyo diseño cumple con la capacidad de autorreparar sus grietas y/o fisuras. En otro estudio se incorporaron elementos adicionales tales como bacterias del género *Bacillus pseudofirmus* y *Bacillus cohnii*, así como lactato de calcio, a la composición de un concreto convencional; éstos cumplieron la función de un agente curativo (Mors y Jonkers, 2017).

Otros casos de aplicación de este material son: un proyecto realizado en Ecuador, en el cual se implementó el bioconcreto

para el revestimiento de un canal (Sierra et al., 2016); mientras que en Chile se implementó en algunas vialidades (González et al., 2018). En México se han realizado investigaciones utilizando la adición de la cepa bacteriana obtenida de suelos, ACRN5, la cual presentó mejores características físico-mecánicas y estructurales en el biomortero, como el aumento de la resistencia y la durabilidad (Castro-Alonso et al., 2017). Por otra parte, se ha reportado la formación de calcita (CaCO_3) a partir de cepas ureolíticas que mejoran la biomineralización, como mecanismo para reparar y rellenar fracturas en estructuras de concreto (Castro-Alonso et al., 2019). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo consiste en resaltar al bioconcreto como agente reparante de fisuras y grietas en estructuras de concreto sometidas a esfuerzos de compresión y tracción, por medio de una revisión bibliográfica que se enfocó en su aplicación en la reparación en estructuras de concreto.

2. Funciones del bioconcreto

2.1. Mecanismos bacterianos

Las esporas bacterianas se encapsulan dentro de gránulos de arcilla de dos a cuatro milímetros de ancho y se integran a la mezcla de cemento con nitrógeno, fósforo y un agente nutritivo por separado (EPO, 2015). En la mezcla, las bacterias y el lactato de calcio están en cápsulas que, cuando aparecen las fisuras en las estructuras, entran en contacto con el agua y se abren permitiendo que las bacterias se multipliquen y se alimenten (Dong et al., 2013), para finalmente segregar la piedra caliza que reparará, en un período de tres semanas, las grietas existentes (Jonkers, 2007). La piedra caliza es parecida al concreto, ya que alrededor del mundo la mayoría de los concretos están hechos a base de triturados de este producto pétreo, por ser un material que cementa muy bien (Anneza et al., 2016).

El hecho de que se utilizaran las bacterias *Bacillus* en concretos como agente reparante se debe a su membrana gruesa, la cual les permite sobrevivir en condiciones y ambientes extremos (Asenjo-Alarcón, 2019), como el ambiente de producto fraguado, las reacciones químicas del concreto, radiaciones ultravioletas, rayos X y fuerzas intra mecánicas del cuerpo del concreto (Rahmani y Bazrgar, 2015). Algunas bacterias llegan a tomar forma de endosporas, las cuales contienen en su material genético las sustancias necesarias para poder vivir en algunos casos, desde 50 hasta 200 años (Yang et al., 2011).

Entonces, se deduce que la incorporación de endosporas como bacterias inmovilizadas es de vital importancia para su incorporación en el bioconcreto, con el objetivo de aumentar su vida útil (Van-Tittelboom y De-Belie, 2013). La adición de lactato de calcio aumenta de manera significativa la resistencia a la compresión en el concreto y disminuye la permeabilidad del agua, ya que las bacterias que son incorporadas en éste son capaces de producir calcita (Uña-Orejón et al., 2018). Cuando el concreto presenta roturas y está expuesto al aire, la humedad, o la penetración de agua a través de sus grietas, se genera una reacción química que produce calcita como sellante. Las bacterias utilizadas en el estudio del Dr. Jonkers son del tipo *Bacillus* (Jonkers et al., 2010), ya que son capaces de sobrevivir en un ambiente alcalino, es decir, con un pH mayor a 10 (De León-Echegaray et al., 2015).

2.2. Biomineralización

Un bioconcreto se elabora a partir de la mezcla del concreto convencional, agregando un cierto porcentaje de algún tipo de bacteria. La bacteria modificará las propiedades mecánicas del material, aumentando o disminuyendo en cierto porcentaje; esta variación dependerá del tipo de bacteria empleada y la concentración de la misma en la mezcla (Ascate et al., 2019).

Existe una gran variedad de bacterias mencionadas en diferentes trabajos de bioconcreto, con un término en común, “biomineralización” (Amiri y Bundur, 2018). Este proceso se refiere a que los microorganismos utilizados en un concreto son capaces de producir biominerales como resultado de su metabolismo. Con dichos minerales se irán sellando los agrietamientos en un lapso de 3 semanas, que oscilan desde un ancho de fisura igual a cero hasta 8 mm (PUPC, 2015; Alshalif et al., 2016). La formación de minerales es impulsada biológicamente y ocurre en un ambiente abierto como un proceso descontrolado de la actividad metabólica microbiana (Seifan et al., 2018). En este proceso, los biominerales se forman a través de la reacción de los productos metabólicos generados por los microorganismos. La precipitación mineral ocurre por la unión de los iones cargados positivamente a las paredes celulares microbianas cargadas negativamente, como se muestra en la Figura 1.

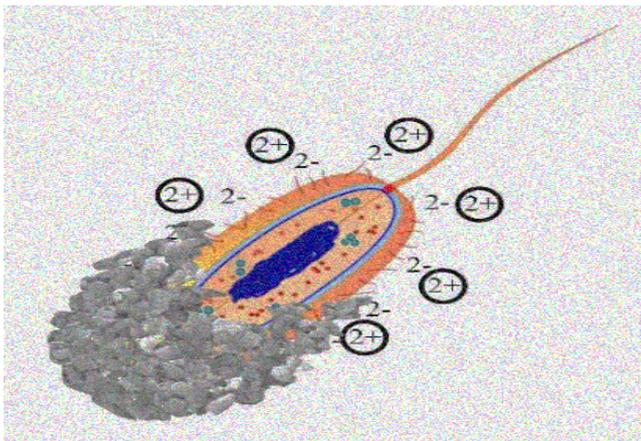
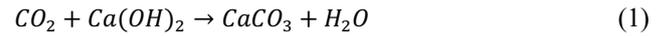
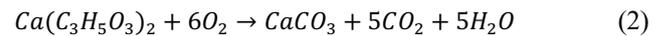


Figura 1. Precipitación mineral para la producción de calcita (Seifan et al., 2016).

Entre la producción generalizada de minerales a través de la biomineralización, la precipitación de carbonato de calcio ha llamado la atención de la comunidad científica debido a su capacidad de unión eficiente y la compatibilidad con las composiciones del concreto (Seifan et al., 2016). El carbonato de calcio (calcita) es uno de los rellenos más adecuados para el concreto, debido a su alta compatibilidad con las composiciones cementosas. El carbonato de calcio (CaCO_3) se puede precipitar mediante un proceso de mineralización inducido biológicamente en presencia de una fuente de calcio (Cuadros-Portales, 2018). La reacción de carbonatación se basa en el principio de obtención de carbonato de calcio (Kadapure y Deshannavar, 2021), en donde el dióxido de carbono que está inmerso en el medio ambiente, así como en residuos de la reacción química del concreto al momento de fraguar, reacciona con el hidróxido de calcio producto de hidratación por agua o humedad en el medio ambiente (Mohammed et al., 2020) (Ecuación 1):



Cuando las moléculas de agua (H_2O) entran en los agrietamientos, activan las bacterias que se encuentran en estado latente y ocurre la precipitación de carbonato de calcio gracias a un compuesto (Irwan et al., 2016), el cual es un precursor de un mineral incorporado al concreto junto a todos sus compuestos (Pasnur y Jain, 2018). Estos compuestos pueden ser también nutrientes o alimento para las bacterias. Como ejemplo, se toma el compuesto de lactato de calcio ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)$) (Novoa-Arroyo, 2020). La reacción química ocurre cuando las bacterias sólo actúan como catalizadores (Yatish-Reddy et al., 2020) (Ecuación 2):



De la conversión metabólica del lactato de calcio se produce dióxido de carbono, que reacciona con el hidróxido de calcio que se encuentra en el cuerpo del concreto. De acuerdo con la reacción química (Ecuación 1), se produce carbonato de calcio adicional (Bundur et al., 2017). La producción en masa de precipitaciones de carbonato de calcio cristalino de más de 100 μm sella y bloquea las grietas, evitando el paso de agua y otras sustancias que afecten la calidad del concreto; también promueven la oxidación del acero de refuerzo de la misma estructura de concreto (Wiktor y Jonkers, 2011). Las moléculas de agua (H_2O) que ingresan activan a las bacterias en estado latente en las superficies de las grietas abiertas. Éstas empiezan a multiplicarse y precipitan el carbonato de calcio sucesivamente rellenando la grieta y, a su vez, protegiendo al acero de refuerzo en el interior del cuerpo del concreto (Wiktor y Jonkers, 2011).

3. Bacterias usadas en el bioconcreto

Las bacterias *Bacillus* pertenecen a la familia *Bacillaceae*; éste es un género que alberga 60 especies de bacterias, conformado por microorganismos bacilares de Gram positivo, formadores de endosporas anaerobias o aerobias. Estas bacterias, además de ser termorresistentes, también son resistentes a factores físicos perjudiciales para las infraestructuras como la radiación, ácidos y desinfectantes químicos (De Clerck, 2004; Santos-Estrada, 2021). Esta clase de microorganismos se encuentra en suelos y plantas, pues es ahí donde cumple un papel importante en el ciclo del carbono y el nitrógeno (Giraldo-Mora, 2017). El género es claramente diverso desde el punto de vista fenotípico y genotípico. La diferenciación fenotípica entre especies del género *Bacillus* se basa en los resultados de la fermentación de lactosa, sorbitol, manitol, hidrólisis de la urea (Jadhav et al., 2018) y descarboxilación de la lisina (Maheswaran et al., 2014).

El grupo de microorganismos *Bacillus sphaericus* y *Bacillus pasteurii* son los más utilizados en el concreto (Khaliq y Ehsan, 2016) debido a que son capaces de producir biominerales a través de la reacción metabólica en una fuente de calcio, la cual es la de menor interferencia con un concreto. Estos microorganismos Gram positivo son compatibles con la ureasa, están involucrados en el ciclo del nitrógeno y son capaces de producir carbonato de calcio mediante hidrólisis de la urea (Wang et al., 2012). El trabajo metabólico microbiano lleva a un aumento de concentración de carbonato y del pH, lo

cual facilita la transformación del dióxido de carbono en carbonato (Chen et al., 2017). Estas transformaciones metabólicas favorecen la precipitación de carbonato de calcio (principalmente configuradas como calcita, que es abundante en la naturaleza) bloqueando el ingreso de moléculas de agua y químicos corrosivos en las grietas (Wang et al., 2014).

El mecanismo de precipitación es un proceso para obtener un sólido a partir de una disolución. Para el caso del bioconcreto el Gram positivo es compatible con la urea, permitiendo producir carbonato de calcio mediante un proceso denominado hidrólisis de la urea, también conocido como ureólisis. Por otra parte, la conversión metabólica en los

organismos produce un aumento de concentración de carbonato y del pH, lo cual facilita la transformación del dióxido de carbono en carbonato (Cuadros-Portales, 2018). Estas transformaciones metabólicas favorecen la precipitación de carbonato de calcio (principalmente conocidas como calcita, que es abundante en la naturaleza) bloqueando el ingreso de moléculas de agua y químicos corrosivos en las grietas (Cuadros-Portales, 2018).

En la tabla 1 se sintetizan las reacciones básicas para la formación del carbonato de calcio, así como los medios en los cuales se produce la activación (mecanismo de precipitación)

Tabla 1. Nutrientes y su efecto sobre la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la permeabilidad y auto curación de la matriz del bioconcreto (Fuente: elaboración propia).

Bacteria / Acoplamiento en el concreto / Mecanismo	Nutrientes	Mejoramiento de la propiedad mecánica del concreto	Absorción de agua	Referencia
<i>Bacillus pseudofirmus</i> / Directo / Conversión metabólica en organismos	Lactato de calcio, acetato de calcio, extracto de levadura y peptona	-	Disminución del 42% - 47%	Schlangen y Jonkers (2008)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> / Directo / Ureólisis	Aguas residuales de licor madre de lactosa, urea, caldo nutritivo, extracto de levadura	Aumento del 17% a compresión de la muestra de concreto	-	Achal et al. (2009)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> / Directo / Ureólisis	Aguas residuales de licor de maíz, caldo nutritivo, extracto de levadura	Aumento del 35% a compresión de la muestra de concreto	-	Achal et al. (2010)
<i>Bacillus pseudofirmus</i> - <i>Bacillus cohnii</i> / Directo / Ureólisis	Lactato de calcio, acetato de calcio, extracto de levadura y peptona	Aumento del 15% a compresión de la muestra de concreto	Disminución del 35%	Jonkers et al. (2010)
<i>Bacillus cohnii</i> / Latente / Ureólisis	Lactato de calcio y extracto de levadura	Aumento del 40% a compresión de la muestra de concreto	Disminución del 22%	Sierra-Beltrán et al. (2014)
<i>Bacillus alkalinitricus</i> / Latente	Lactato de calcio y extracto de levadura	-	-	
<i>Bacillus sphaericus</i> / Latente / Ureólisis	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	Aumento del 30% - 35% a compresión de la muestra de concreto	Disminución del 45% - 50%	Wang et al. (2014)
<i>Bacillus sphaericus</i> / Directo / Ureólisis	Urea y cloruro de calcio			
<i>Bacillus sphaericus</i> / Latente / Ureólisis	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura			
<i>Bacillus sphaericus</i> / Directo / Ureólisis	Urea y cloruro de calcio			
<i>Bacillus sphaericus</i> / Latente / Ureólisis	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	-	Disminución de hasta el 40%	Maheswaran et al. (2014)
<i>Bacillus sphaericus</i> / Latente / Ureólisis	Urea, cloruro de calcio, nitrato de calcio y extracto de levadura			
<i>Sporosarcina pasteurii</i> / Directo / Ureólisis	Urea, extracto de levadura	Aumento del 33% a compresión de la muestra de concreto	Disminución del 33%	Abo-El-Enein et al. (2014)
<i>Bacillus subtilis</i> / Directo / No determinado	Peptona, extracto de levadura	Aumento del 16.6% a compresión de la muestra de concreto	-	Sarkar et al. (2015)
<i>Bacillus mucilaginous</i> / Latente / Ureólisis	Sacarosa, extracto de levadura, nitrato de calcio	Aumento del 56% - 72% a flexión de la muestra de concreto	-	Chen et al. (2016)
<i>Bacillus cereus</i> / Directo / Ureólisis	Aguas residuales de tofu	Aumento del 27.8% a compresión de la muestra de concreto	-	Fang et al. (2019)

y el trabajo de las bacterias (microorganismos). En la tabla, se sintetiza el trabajo de varios investigadores con los diferentes nutrientes necesarios para la precipitación de carbonato, así como el acoplamiento en el concreto de las bacterias. Puede apreciarse también los porcentajes de recuperación de las propiedades físicas del bioconcreto antes de presentar roturas, así como la mejora de sus propiedades mecánicas. Por ello es importante conocer a través de estudios previos, algunos métodos de precipitación y los resultados obtenidos partir de ellos, ya que se han usado estas mismas bacterias en otros trabajos, pero adicionando fibras de vidrio (Alcaraz-Martin y Parra-Costa, 2015; Seifan et al., 2016; Gupta et al., 2017).

4. Comparación del bioconcreto con el concreto convencional

Existen diversas comparaciones entre un concreto convencional y un bioconcreto, una de ellas es el comportamiento que ambos tienen. El concreto convencional presenta un comportamiento frágil que propicia fallas sobre los elementos según las fuerzas aplicadas (compresión, cortante, flexión y tracción) (Colunga y Contreras, 2017; Redacción, 2021), mientras que el bioconcreto se comporta como un material dúctil, es decir, más maleable y resistente (ACI, 2017; Daza-Sánchez y Guarnizo-Trujillo, 2020).

4.1. Resistencia a la compresión

Para comprobar la resistencia a la compresión del concreto, Osorio (2014) sometió especímenes a ensayos con pruebas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, para posteriormente ser roturadas mediante cargas rápidas. Es importante mencionar que por razones prácticas y técnicas se debe tener un tiempo de 28 días de fraguado, pues en este tiempo el concreto alcanza gran proporción de la resistencia final (Osorio, 2014). Como resultado de las pruebas, se determinó que la resistencia a la compresión del concreto convencional mejoró un 14.92% mediante la adición de la bacteria *Bacillus subtilis*, mientras que la *Bacillus sphaericus* mejoró la resistencia a la compresión del bioconcreto un 30.76% a 3 días, 46.15% a 7 días y 32.21% a 28 días, en comparación con el concreto convencional, como se puede apreciar en la Tabla 2 (De León-Echegaray et al., 2015).

4.2. Resistencia a la tracción

Para comprobar este tipo de resistencia se sometió a ensayos a vigas de concreto no reforzado con sección transversal de 15x15 cm y con longitud mínima de 3 veces el espesor, cargadas en los puntos tercios, haciendo que la mitad de la carga se aplique en cada tercio de la longitud (De León-Echegaray et al., 2015). Esta resistencia a la tracción se determinó estirando los dos extremos de la muestra y aplicando fuerza en ambos extremos (Úbeda-Bernabé, 2014). Enseguida, se midió su deformación con relación a la fuerza aplicada hasta que la muestra rebasó su límite de deformación elástica y se deforma permanentemente o se rompe (Jesus, 2013).

Tabla 2. Comparativa de esfuerzos de compresión entre el concreto convencional y bioconcreto con la bacteria *Bacillus sphaericus* (De León-Echegaray et al., 2015)

Prueba #	No. días	Resistencia a compresión de concreto convencional, N/mm ²	Resistencia a compresión de bioconcreto con <i>Bacillus sphaericus</i> , N/mm ²	Aumento de la resistencia, %
1	3	19.24	25.16	30.76
2	7	23.66	34.58	46.18
3	28	34.52	45.72	32.21

Se determinó que la resistencia a la tracción es mejor en un bioconcreto que en un concreto convencional (Jesus, 2013). Los resultados de la comparación de la resistencia a la tracción entre un concreto convencional y un bioconcreto se muestran en la Tabla 3, en la cual puede apreciarse una mejora en la resistencia de casi 18.5% (De León-Echegaray et al., 2015).

Tabla 3. Comparación de resistencia a la tracción entre concreto convencional y bioconcreto con la bacteria *Bacillus sphaericus* (De León-Echegaray et al., 2015)

Prueba #	No. días	Resistencia a tracción de concreto convencional, N/mm ²	Resistencia a tracción de bioconcreto con <i>Bacillus sphaericus</i> , N/mm ²	Aumento de la resistencia, %
1	3	3.78	4.30	13.75
2	7	4.62	5.28	14.28
3	28	4.85	5.74	18.35

4.3. Durabilidad y costo del concreto y bioconcreto

En obras de ingeniería civil, las fisuras que aparecen durante el periodo de vida útil del concreto requieren mayor costo durante su reparación; por esta razón, el bioconcreto es mucho más factible que el concreto convencional, ya que se reducen los precios de reparación hasta en un 50% a través del tiempo (EPO, 2015). Se considera como precio promedio del concreto convencional (Precios Unitarios, 2022) de \$1,328.41 pesos mexicanos por m³, (promedio entre los diferentes tipos que existen en el mercado: concreto premezclado y concreto hecho en obra, considerando las resistencias a compresión del diseño de la mezcla). Bajo estas condiciones, el bioconcreto costaría entre \$1,411.44 y \$1,660.52 pesos mexicanos por m³, adicionando el nuevo agente de curación encapsulado (EPO, 2015). Cabe destacar que, ya que este material aumenta la vida útil de una estructura, el costo efectivo representa un ahorro considerable. En cuanto a su durabilidad, el bioconcreto reduce la permeabilidad gracias a la reacción química que produce calcita, mineral que sella las fisuras o grietas, por lo cual evita que el acero contenido en la estructura se oxide; además, presenta mejores propiedades de endurecimiento en comparación con el concreto convencional, debido a que las grietas llegan a reducir el ancho (ACI, 2017).

4.4. Limitantes

Los resultados comparativos son escasos debido a que el bioconcreto no se ha estudiado en alguna aplicación existente en infraestructura, sino sólo en lapsos cortos en laboratorio, haciendo pruebas de compresión y tracción. El diseño del bioconcreto tiene como objetivo mejorar las propiedades del concreto y su resistencia a la exposición de factores físicos y químicos. El empleo de la bacteria *Bacillus* ha reducido el proceso de corrosión del acero en el concreto armado por medio de la mineralización de calcita, que evita que el agua se infiltre hasta el acero de refuerzo. Sin embargo, para favorecer el proceso anterior, el bioconcreto tiene que trabajar a compresión, por lo cual es de vital importancia mejorar sus propiedades de resistencia a compresión y tracción (De León-Echegaray et al., 2015; Seifan et al., 2016).

5. Discusión

El concreto es el material de construcción más utilizado; en la actualidad, existen concretos masivos, armados, prefabricados, pretensados, entre otros, pero poco se sabe del bioconcreto y sus propiedades (Conexión Expo CIHAC, 2021). El bioconcreto, en comparación con el concreto convencional, tiene adicionadas en la mezcla bacterias del género *Bacillus* (Dong et al., 2013) y éstas no representan un riesgo para la salud humana, ya que sólo pueden sobrevivir en las condiciones alcalinas en el interior del concreto desde 50 hasta 200 años (EPO, 2015). Este tipo de bacterias segregan calcita, que rellena la grieta de forma autónoma gracias al agua contenida en la humedad del ambiente en un período de tres semanas (Jonkers, 2007). Una gran ventaja del bioconcreto es que este mineral reduce su permeabilidad, gracias a que en la reacción química hace uso del agua, impidiendo que el acero existente en el interior del concreto se oxide; de esta forma, aumenta considerablemente la vida útil de la misma y evita tener mantenimientos que generen costos adicionales, por lo que se vuelve un material más económico que el concreto convencional (ACI, 2017).

En el caso de buscar un bioconcreto que ofrezca mejores resultados de resistencia a la compresión y tracción, a través de esta revisión se recomienda el uso de las bacterias *Bacillus sphaericus* (De León-Echegaray et al., 2015), ya que éstas mejoran su resistencia a la compresión hasta un 32.21% con respecto al concreto convencional pasados los 28 días de curado, mientras que la resistencia a la tracción aumenta hasta un 18.35% en comparación con el concreto convencional. Por ello, el concreto convencional presenta un comportamiento frágil cuando es sometido a los esfuerzos de compresión y tracción, mientras que el bioconcreto se comporta de manera más dúctil, lo que permite mayor resistencia a la aparición de grietas y fisuras (Daza-Sánchez y Guarnizo-Trujillo, 2020). Al mejorar la resistencia del bioconcreto se disminuyen los costos de mantenimiento que incluyen mano de obra y materiales hasta en un 50% comparado con el concreto convencional (EPO, 2015). Por otra parte, los costos de producción promedio del bioconcreto superan entre un 6 y 20% el costo de un concreto convencional, sin embargo, esta diferencia se vuelve insignificante cuando se comparan los costos de

reparación y mantenimiento que necesitan las estructuras construidas con ambos tipos de material (Precios Unitarios, 2022). Mientras tanto, es deseable mejorar las técnicas enfocadas a la inclusión de bacterias y sus respectivos nutrientes en la matriz del concreto, ya que no existe un método o protocolo que asegure exactamente las características finales que el bioconcreto adoptará. También, hay que tomar en cuenta la reducción de costos que se obtendría al aumentar la eficiencia del bioconcreto en relación a su valor de producción, e inducir al sector industrial en el uso del mismo, como un material básico para la construcción en un futuro cercano (Cuadros-Portales, 2018).

6. Conclusiones

Las roturas en estructuras de concreto pueden repararse correctamente si se conoce el origen de la aparición de grietas y fisuras. Es entonces cuando se eligen los procedimientos de reparación adecuados; en caso contrario, las reparaciones durarán poco tiempo y aumentarán los costos de mantenimiento. Por ello, el bioconcreto se presenta como una alternativa sustentable de construcción y reparación para reducir los problemas patológicos de estructuras de concreto, ya que minimizan los gastos de reparación debido a su naturaleza autorreparante. Además, es un material viable para emplear en lugares en donde se pudieran presentar fisuras y agrietamientos no mayores a un espesor de 8 mm y considerar que la longitud de la estructura no es una limitante.

Es recomendable la incorporación de bacterias del género *Bacillus*, ya que, a pesar de que pueden utilizarse una gran variedad de estos microorganismos, estas bacterias fueron las que obtuvieron los mejores resultados en pruebas a la compresión y tracción en laboratorio (fenómenos que originan las roturas en el concreto) en comparación con el concreto convencional. El método de preparación de un bioconcreto puede variar de acuerdo con el método de adición y/o encapsulamiento, por lo cual la dosificación cambia. Es importante mencionar que, aunque el mejor tipo de bacteria *Bacillus* a utilizar sea *sphaericus*, en algunos casos ésta no podría usarse, pues depende del tipo de proyecto ejecutado, considerando los factores ambientales y tipo de exposición que no sean favorables para *Bacillus sphaericus*, con el propósito de presentar óptimas condiciones.

Es importante utilizar este tipo de materiales para la construcción con adición bacteriana, ya que pueden multiplicarse los microorganismos y generan una huella de carbono más baja, ayudando a construir edificios sostenibles. Esto será posible siempre que el bioconcreto cumpla con las pruebas de calidad estipuladas por las normativas correspondientes que brinden seguridad. Otro de los beneficios a largo plazo que contribuyen a su durabilidad, es que un bioconcreto puede retrasar la corrosión del acero contenido en la estructura, gracias a que las bacterias reaccionan en contacto con el agua y humedad, evitando el contacto directo con el acero de refuerzo.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión y guía de la Dra. Liliana G. Lizárraga Mendiola y

el Dr. Iván Erick Castañeda Robles, a quien expreso mi más profundo agradecimiento por su apoyo y hacer posible la realización de este artículo científico, pero sobre todo por su paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron.

A mis padres y mi hermano por apoyarme incondicionalmente en todo lo que me he propuesto y alentarme para siempre dar lo mejor de mí sea cual sea mi decisión, quienes han sido las personas que me impulsan a ser mejor persona día con día con el objetivo de hacerlos sentir siempre orgullosos de mí. A mis amigos quienes me ayudaron y apoyaron con la investigación y revisión bibliográfica, para comenzar con la realización del artículo, por confiar en mí y alentarme a la realización del mismo.

Referencias

- Abo-El-Enain, S. A., El-Sayed, H. A., Ali, A. H., Mohammed, Y. T., Khater, H. M., & Ouda, A. S. (2014). Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume. *HBRC Journal*. Vol.10(1), 43–48. Doi: 10.1016/j.hbrj.2013.06.002
- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2010). Biocalcification by *Sporosarcina pasteurii* using corn steep liquor as the nutrient source. *Ind Biotechnol*. Vol. 6, 170–174. Doi: 10.1089/ind.2010.6.170
- Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P. C., & Reddy, M. S. (2009). Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii*. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*. Vol. 36, 433–438. Doi: 10.1007/s10295-008-0514-7
- Achal, V., & Mukherjee, A. (2015). A review of microbial precipitation for sustainable construction. *Constr. Build. Mater*. Vol. 93, 1224–1235. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.051
- ACI 224.R-01 (2008) Control of Cracking in Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, U.S.A. Recuperado de: <https://www.concrete.org/topics/inconcrete/topicdetail/precast%20concrete?search=precast%20concrete>
- ACI, American Concrete Institute (2017). Precast Concrete. Definition: concrete cast elsewhere than its final position. Recuperado de: <https://www.concrete.org/topics/inconcrete/topicdetail/precast%20concrete?search=precast%20concrete>
- Alcaraz-Martín, J., & Parra-Costa, C. J. (2015). Hormigones auto-regenerantes: Mecanismos y procesos de autosellado de fisuras. *Anuario de Jóvenes Investigadores*. Vol. 8, 126-128. Recuperado de: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5371/hac.pdf?sequence=1>
- Alsharif, A. F., Irwan, J. M., Othman, N., & Anneza, L. H. (2016). Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 47, 01016. Doi:10.1051/mateconf/20164701016
- Amiri, A., & Bundur, Z. B. (2018). Use of corn-steep liquor as an alternative carbon source for biomineralization in cement-based materials and its impact on performance. *Const and Build Mat*. Vol. 165, 655–662. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.070
- Anneza, L. H., Irwan, J. M., Othman, N., & Alsharif, A. F. (2016). Identification of Bacteria and the Effect on Compressive Strength of Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 47, 01008. Doi:10.1051/mateconf/20164701008
- Ascate, M., Miranda-Torres, C. P., & de Jesús, M. A. (2019). Diseño de bioconcreto con *Bacillus Subtilis* para mejorar la resistencia en un concreto $f'c=210$ kg/cm², Tarapoto. *Tesis de grado*, Universidad Cesar Vallejo, Repositorio Digital Institucional. Recuperado de: <https://repositorio.uvc.edu.pe/handle/20.500.12692/46462>
- Asenjo-Alarcón, D. E. (2019). Influencia de la incorporación del aditivo bacteriano en la reparación del proceso de fisuración controlada del concreto. *Tesis de grado*, Universidad Nacional de Cajamarca. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado de: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/3243>
- Bardales-Soriano, O. R. (2021). Determinación y evaluación de las fisuras y grietas de la Residencial Los Cipreses II en la ciudad de Cajamarca-2019. *Tesis de grado*, Universidad Nacional de Cajamarca. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/11537/28233>
- BBC. (2016). *El revolucionario bioconcreto, el material que se repara a sí mismo*. BBC News Mundo. Recuperado de: <https://bbc.in/3k9Hsxy>
- Bundur, Z. B., Kirisits, M. J., & Ferron, R. D. (2017). Use of pre-wetted lightweight fine expanded shale aggregates as internal nutrient reservoirs for microorganisms in bio-mineralized mortar. *Cem. Concr. Compos*. Vol. 84, 167–174. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.003
- Castro-Alonso, M. J., López-Ortiz C. E., García-Perez, S. O., Narayanasamy, R., Fajardo-San Miguel, G. J., Herrera-Hernández, H., & Balagurusamy, N. (2017). Improved strength and durability of concrete through metabolic activity of ureolytic bacteria. *Environ Sci Pollut Res*. Vol. 25, 21451–21458. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9347-0>
- Castro-Alonso, M. J., Montañez-Hernandez, L. E., Sanchez-Muñoz, M.A., Macias-Franco, M. R., Narayanasamy, R., & Balagurusamy, N. (2019) Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts. *Front. Mater*. Vol. 6:126. Doi: 10.3389/fmats.2019.00126
- Chen, H., Qian, C., & Huang, H. (2016). Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively. *Constr. Build. Mater*. Vol. 126, 297–303. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.023
- Chen, Y., Xia, C., Shepard, Z., Smith, N., Rice, N., Peterson, A. M., & Sakulich, A. (2017). Self-Healing Coatings for Steel-Reinforced Concrete. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, Vol. 5(5), 3955–3962. Doi:10.1021/acsuschemeng.6b03142
- Colunga, A., & Contreras, A. G. (2017). Determinación de parámetros de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía hysteréticos. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, Vol. 14(1), 36-58. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Arturo-Tena-Colunga/publication/337655292_Determinacion_de_parametros_de_diseño_sismico_para_marcos_ductiles_de_concreto_reforzado_con_disipadores_de_energía_histeréticos/links/600cabec92851c13fe321a38/Determinacion-de-parametros-de-diseño-sismico-para-marcosduc-tiles-de-concreto-reforzado-con-disipadores-de-energía-histeréticos.pdf
- Conexión Expo CIHAC. (2021). Concreto sustentable: el siguiente paso a la sostenibilidad. *Conexiones 365*. Recuperado de <https://www.conexiones365.com/nota/expo-cihac/tecnologia/concreto-sustentable-el-siguiente-paso-a-la-sostenibilidad>
- Cuadros-Portales, J. A. (2018). Bioconcreto un material con vida propia. *CienciaAcierta*. Vol. 55: 1-13. Recuperado de <http://www.cienciaacierta.uadec.mx/2018/09/09/bioconcreto-un-material-con-vida-propia/>
- Daza-Sánchez, O. E., & Guarnizo-Trujillo, F. (2020). Revisión bibliográfica entre el concreto auto reparable y el concreto convencional. *Tesis de grado*, Universidad católica de Colombia. Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/2VIBGIY>
- De Clerk, E. (2004). *Anoxybacillus contaminans* sp. nov. and *Bacillus gelatini* sp. nov., isolated from contaminated gelatin batches. *Int. J. Syst. Evol.* Vol. 54(3), 941–946. Doi:10.1099/ijs.0.02960-0
- 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*. Vol. (7), 36-38. Recuperado de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/16153/16575>
- Dong, B., Han, N., Zhang, M., Wang, X., Cui, H., & Xing, F. (2013). A microcapsule technology based self-healing system for concrete structures. *J. Earthq. Tsunami*. Vol. 07(03), 1350014. Doi:10.1142/s1793431113500140
- EPO, European Patent Office, (2015). “Bio-concrete” set to revolutionize the building industry: Dutch inventor of self-healing concrete named finalist for European Inventor Award. Recuperado de: <https://www.epo.org/news-events/press/releases/archive/2015/20150421i.html>
- Fang, C., He, J., Achal, V., & Plaza, G. (2019). Tofu wastewater as efficient nutritional source in biocementation for improved mechanical strength of cement mortars. *Geomicrobiol. J*. Vol. 36, 515–521. Doi: 10.1080/01490451.2019.1576804
- Giatic Scientific Inc. (2015). *Self-Healing Bio-Concrete*. Recuperado de: <https://www.giaticscientific.com/education/bio-concrete/>
- Giraldo-Mora, N. (2017). Autorreparación de fisuras en concreto rígido para pavimentos mediante la adición de bacterias bioprecipitadoras de carbonato de calcio-estado del arte y diseño experimental. *Tesis de grado*. Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/378797366/Autorreparacion-de-Fisuras-en-Concreto>
- González, A., Parraguez-Macaya, A. C., Corvalan, L., Corréa, N., & Stuckrath, C., (2018). Hormigón autorreparable con bacterias para la infraestructura vial. Investigación de posgrado. *13° congreso Internacional PROVIAL*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/328135440_Titulo_HORMIGON_AUTORREPARABLE_CON_BACTERIAS_PAR_A_LA_INFRAESTRUCTURA_VIAL_Autores

- Gupta, S., Pang, S. D., & Kua, H. W. (2017). Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review. *J. Con Build Mat. Vol. 146*, 419–428. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111
- Irwan, J., Anneza, L., Othman, N., Faisal-Alsharif, A., Zamer, M. M., & Teddy, T. (2016). Calcium Lactate addition in Bioconcrete: Effect on Compressive strength and Water penetration. *MATEC Web of Conferences*, 78, 01027. Doi:10.1051/mateconf/20167801027
- Jadhav, U. U., Lahoti, M., Chen, Z., Qiu, J., Cao, B., & Yang, E.-H. (2018). Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer. *J. Con Build Mat. Vol. 169*, 716–723. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.039
- Jesus J. (2013). *Resistencia a la tensión. Club Ensayos*. Recuperado de <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Resistencia-A-LaTension/922408.html>
- Jonkers, H. M. (2007). Self Healing Concrete: A Biological Approach. In: van der Zwaag, S. (eds.). *Self Healing Materials. Springer Series in Materials Science, vol. 100*. Springer, Dordrecht. Doi:10.1007/978-1-4020-6250-6_9
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muys, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecol Eng. Vol. 36(2)*, 230–235. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036
- Kadapure, S. A., & Deshannavar, U. B. (2021). Bio-smart material in self-healing of concrete. *Mater. Today: Proc. Vol. 49*, Part 5, 1498-1503. Doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.245
- Khalique, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Constr Build Mater. Vol. 102*, 349–357. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006
- Lv, L., Yang, Z., Chen, G., Zhu, G., Han, N., Schlangen, E., & Xing, F. (2016). Synthesis and characterization of a new polymeric microcapsule and feasibility investigation in self-healing cementitious materials. *Constr Build Mater. Vol. 105*, 487–495. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.185
- Maheswaran, S., Dasuru, S.S., Rama-Chandra-Murthy, A., Bhuvaneshwari, B., Ramesh-Kumar, V., Palani, G.S., Iyer, N.R., Krishnamoorthy, S., & Sandhya, S. (2014) Strength improvement studies using new type wild strain *Bacillus cereus* on cement mortar. *Curr. Sci. India. Vol. 106*: 50–57. https://www.researchgate.net/publication/269275002_Strength_improvement_studies_using_new_type_wild_strain_Bacillus_cereus_on_cement_mortar
- Mohammed, H., Ortoneda-Pedrola, M., Nakouti, I., & Bras, A. (2020). Experimental characterization of non-encapsulated bio-based concrete with self-healing capacity. *Constr Build Mater. Vol. 256*, 119411. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119411
- Mors, R., & Jonkers, H. (2017). Effect on Concrete Surface Water Absorption upon Addition of Lactate Derived Agent. *Coatings. Vol. 7(4)*, 51. Doi:10.3390/coatings7040051
- Noiva-Arroyo, C. M. (2020). Obtención de ácido láctico por el método de células inmovilizadas del *Lactobacillus casei*. *Tesis de pregrado*, Universidad Técnica del Norte. Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9776>
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Rev. Ing. de Construcción. Vol. 33(2)*, 161–172. Doi:10.4067/s0718-50732018000200161
- Osorio, J. D. (2014). *Control de calidad del concreto en obra*. Recuperado de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/control-de-calidad-del-concreto-en-obra>
- Palin, D., Wiktor, V., & Jonkers, H. (2017). A Bacteria-Based Self-Healing Cementitious Composite for Application in Low-Temperature Marine Environments. *Biomimetics. Vol. 2(3)*, 13. Doi:10.3390/biomimetics2030013
- Pasnur, P. K., & Jain, V. (2018). A Review Paper on Basic Characteristics of Bacterial Concrete. *J. Adv. Sch. Res. Allied Ed. Vol. 15(2)*, 657–660. Doi:10.29070/15/56947
- Precios Unitarios (2022). *Todos los Precios del Concreto premezclado y hecho en obra. Precios Unitarios de Construcción*. Recuperado de: <https://preciosunitariosconstruccion.com/basicos/concreto/#:~:text=E1%20precio%20del%20concreto%20por,emplazar%2C%20deberemos%20ajustar%20dicha%20cantidad.>
- PUPC, ACLI. (2015). *Bioconcreto*. Recuperado de: <https://www.chilecubica.com/materiales-de-construccion/C3%uB3n/bio-concreto/>
- Rahmani, H., & Bazrgar, H. (2015). Effect of coarse cement particles on the self-healing of dense concretes. *Mag. Concr. Res. Vol. 67(9)*, 476–486. Doi:10.1680/mac.14.00158
- Redacción (2021). *Definición de Tipos de Esfuerzo*. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/tipos-de-esfuerzo/>
- Rodgers, L. (2018). La enorme fuente de emisiones de CO² que está por todas partes y que quizás no conocías. *BBC News Mundo*. Recuperado de: <https://bbc.in/3h3CPDo>
- Santos-Estrada, A. J., (2021). Aplicación del bioconcreto para reparar agrietamientos de los decantadores de la planta de tratamiento de agua La Atarjea – Lima. *Tesis de pregrado*, Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas. Recuperado de: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655332>
- Sarkar, M., Adak, D., Tamang, A., Chattopadhyay, B., & Mandal, S. (2015). Genetically-enriched microbe-facilitated self-healing concrete—a sustainable material for a new generation of construction technology. *RSC Adv. Vol. 5*, 105363–105371. Doi: 10.1039/C5RA20858K
- Schlangen, E., & Jonkers, H. (2008). A two component bacteria-based self-healing concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*, 119–120. Doi:10.1201/9781439828403.ch27
- Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol. 100(6)*, 2591–2602. Doi:10.1007/s00253-016-7316-z
- Seifan, M., Sarmah, A. K., Samani, A. K., Ebrahimezhad, A., Ghasemi, Y., & Berenjian, A. (2018). Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. *Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol. 102(10)*, 4489–4498. Doi:10.1007/s00253-018-8913-9
- Sierra, G., Mera, W., & Jonkers, H. (2016). Concreto autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: principios y aplicaciones en Ecuador. *Alternativas. Vol. 17(3)*, 207–214. doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.229
- Sierra-Beltran, M. G., Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2014). Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Con Build Mat. Vol. 67*, 344–352. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.012
- Sonali-Sri, D., C., Ruben N., Sri-Rama C. M., & Venkatesh C. (2019). Performance studies on rate of self-healing in bio concrete. *Mater. Today: Proc. Vol. 27*, Part 1: 158-162. Doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.151
- Sotomayor, C. (2020). *Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto*. Recuperado de: <http://www.consultcreto.com/pdf/Wan/entendiendo.pdf>
- Souza, J.C. (2021). "¿Qué significan las grietas en las estructuras de hormigón?". *ArchDaily México*. Traducido y publicado el 25 de junio de 2021. ISSN :0719-8914. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/880210/que-significan-las-grietas-en-las-estructuras-de-hormigon>
- Toirac-Corral J. (2004). Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención. *Ciencia y Sociedad. Vol. 29(1)*, 72-114. ISSN: 0378-7680. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029104>
- Úbeda-Bernabé C. (2014). Estudio comparativo de concretos autosellantes. *Tesis de maestría*, Universidad Politécnica de Madrid. Repositorio de la Universidad Politécnica de Madrid <https://11library.co/document/zp0dl60q-estudio-comparativo-de-hormigones-autosellantes.html>
- Uña-Orejón R., Huercio-Martínez I., Mateo-Torres E., Jofré-Escudero C., & del Prado-Ureta-Tolsada M. (2018). ¿Es correcta la inclusión del lactato en la nueva definición de sepsis? *Rev Esp Anestesiol Reanim. Vol. 65(2)*, 121. Doi: 10.1016/j.redar.2017.09.005
- Van-Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013) Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials. Vol. 6*: 2182–2217.
- Wang, J. Y., Snoeck, D., Van-Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Con Build Mat. Vol. 68*, 110–119. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018
- Wang, J., Van-Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2012). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Con Build Mat. Vol. 26(1)*, 532–540. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2009). Reinforced Concrete, Mechanics and Design. (5a ed.) EEUU: Pearson.
- Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cem Concr Compos. Vol. 33(7)*, 763–770. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012
- Yang, Z., Hollar, J., He, X., & Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cem Concr Compos. Vol. 33(4)*, 506–512. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.01.010
- Yatish-Reddy, P. V., Ramesh, B., & Prem-Kumar, L. (2020). Influence of bacteria in self healing of concrete - a review. *Mater. Today: Proc. Vol. 33*, Part 7: 4212-4218. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.233