



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**Uso de bacterias para el mejoramiento y autorreparación del  
concreto: Una revisión literaria**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:**

Bachiller en Ingeniería Civil

**AUTOR:**

Fernandez Mego, Alex Aldo ([orcid.org/0000-0001-8717-2785](https://orcid.org/0000-0001-8717-2785))

**ASESOR:**

Dr. Choque Flores, Leopoldo ([orcid.org/0000-0003-0914-7159](https://orcid.org/0000-0003-0914-7159))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Diseño Sísmico y Estructural

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ

2024



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, CHOQUE FLORES LEOPOLDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ATE, asesor de Tesis titulado: "Uso de Bacterias para el Mejoramiento y Autorreparación del Concreto: Una revisión literaria", cuyo autor es FERNANDEZ MEGO ALEX ALDO, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 13%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender el Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 20 de Julio del 2024

| Apellidos y Nombres del Asesor:                                       | Firma  |
|---|--|
| CHOQUE FLORES LEOPOLDO<br>DNI: 42289035<br>ORCID: 0000-0003-0914-7159 | Firmado electrónicamente<br>por: LCHOQUEF el 20-07-<br>2024 13:44:28 |

Código documento Trilce: TRI - 0825244



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

### **Declaratoria de Originalidad del Autor**

Yo, FERNANDEZ MEGO ALEX ALDO estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA CIVIL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ATE, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan el Trabajo de Investigación titulado: "Uso de Bacterias para el Mejoramiento y Autorreparación del Concreto: Una revisión literaria", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que el Trabajo de Investigación:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado, ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

| Nombres y Apellidos   | Firma   |
|---|---|
| FERNANDEZ MEGO ALEX ALDO<br>DNI: 72640710<br>ORCID: 0000-0001-8717-2785 | Firmado electrónicamente<br>por: AFERNANDEZM9 el<br>20-07-2024 18:17:39 |

Código documento Trilce: INV - 1684715

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación a toda mi familia. Esencialmente a mis padres que siempre me apoyaron en los momentos malos y buenos, sobre todo por enseñarme a nunca rendirme.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la universidad que me ayudo a crecer como persona y formarme como profesional. Asimismo, a todos los docentes que me brindaron las herramientas para triunfar en la vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |      |
|---|------|
| CARÁTULA .....                                | i    |
| Declaratoria de Autenticidad del Asesor ..... | ii   |
| Declaratoria de Originalidad del Autor .....  | iii  |
| Dedicatoria.....                              | iv   |
| Agradecimiento.....                           | v    |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS.....                     | vi   |
| RESUMEN .....                                 | vii  |
| ABSTRACT .....                                | viii |
| I. INTRODUCCIÓN .....                         | 1    |
| II. METODOLOGÍA .....                         | 2    |
| III. RESULTADOS .....                         | 3    |
| IV. CONCLUSIONES.....                         | 14   |
| REFERENCIAS.....                              | 15   |
| ANEXOS .....                                  | 24   |
| Tabla 5 .....                                 | 24   |

## RESUMEN

En el contexto de la ingeniería civil y el desarrollo de nuevos tipos de concreto, se destaca el uso creciente de bacterias, las cuales se incluyen con el fin de efectuar reparaciones de grietas y microfracturas. El presente estudio encontró que los géneros *Bacillus* y *Sporosarcina* fueron los géneros de bacteria más estudiados actualmente, dentro del contexto de la elaboración de concretos autorreparativos. El género *Bacillus* incluyó especies como *Bacillus Cohnii*, *Bacillus subtilis* y *Bacillus megaterium*, las cuales se han estudiado extensamente debido a su capacidad para precipitar carbonato de calcio y mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Por otro lado, *Sporosarcina* también muestra habilidades significativas en la precipitación de carbonato de calcio y destaca por su robustez frente a condiciones adversas como ciclos de congelación-descongelación y ambientes salinos, lo que resalta su potencial adaptativo y de supervivencia en diversas aplicaciones de concreto autorreparativo.

**Palabras clave:** Concreto, bacterias, autorreparación, propiedades mecánicas

## ABSTRACT

In the context of civil engineering and the development of new types of concrete, there is a growing emphasis on the use of bacteria, which are included to effect repairs of cracks and microfractures. This study found that the genera *Bacillus* and *Sporosarcina* were the most studied bacterial genera currently within the context of self-healing concretes. The genus *Bacillus* includes species such as *Bacillus Cohnii*, *Bacillus subtilis*, and *Bacillus megaterium*, which have been extensively studied due to their ability to precipitate calcium carbonate and improve the mechanical properties of concrete. On the other hand, *Sporosarcina* also demonstrates significant abilities in calcium carbonate precipitation and excels in resilience against adverse conditions such as freeze-thaw cycles and saline environments, highlighting its adaptive and survival potential in various applications of self-healing concrete.

**Keywords:** Concrete, bacteria, self-repair, mechanical properties



## I. INTRODUCCIÓN

Según Gao, Pedro, Zhang, Huang, & Lai (2019), a pesar de que el concreto Portland ordinario (OPC) se utiliza ampliamente en la industria de la ingeniería civil, el OPC a menudo no cumple con los requisitos de alta calidad en algún entorno de ingeniería especiales; tales como un ambiente corrosivo o a temperaturas extremas. En vista de los problemas anteriores, se han explorado muchos métodos para cambiar el rendimiento del cemento mediante el uso de aditivos, tanto sintéticos como naturales.

Entre los muchos materiales que se añaden al concreto para mejorar sus propiedades, se encuentran los de origen biológico. Según Pan, Deng, Li, Wang, & Zhang (2022), el uso de refuerzos de fibras vegetales en el concreto logran reducir la huella de carbono y mejorar sus propiedades geo-mecánicas. Las fibras vegetales se extraen de materiales vegetales reciclados, por lo que su uso no sólo reduce el consumo de recursos no renovables sino que también recicla residuos agrícolas y forestales. En comparación con el refuerzo con metal y fibras sintéticas, las fibras vegetales después de un tratamiento adecuado pueden garantizar las propiedades mecánicas del hormigón y reducir el peso volumétrico y el costo de producción.

Sin embargo, entre los materiales de origen vegetal añadidos al concreto, uno de los más prometedores son los autocurativos, es decir, concretos que con el paso del tiempo se van reparando. Fahimizadeh, y otros (2024), investigó el uso de nanotubos de arcilla de halloysita (HNTs) cargados con un nutrientes para favorecer el crecimiento microbiológico, en lugar de las cápsulas normalmente utilizadas. Estas bacterias, en su proceso natural de vida, depositan carbonatos que reparan el concreto dañado y devuelven el concreto a su estado previo a recibir daño mecánico o por desgaste.

Podemos observar que la ingeniería está impulsando la creación y aplicación de una amplia variedad de nuevos materiales en el concreto, destacándose especialmente el uso de poblaciones de bacterias. Estas bacterias no solo mejoran de manera significativa las propiedades mecánicas del concreto, sino que también tienen la capacidad de efectuar labores de microreparación, contribuyendo a la durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de concreto.

En este contexto, surge la pregunta crucial: ¿Qué género de bacterias es el más investigado en el concreto autoreparativo? Como justificación, tenemos que es importante conocer las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de bacterias más utilizados en concreto autoreparativo, ya que esta información mejoraría la capacidad de las empresas constructoras y de la población en general para escoger la mejor opción en materiales de construcción, optimizando así la eficiencia y durabilidad de las estructuras.

El objetivo del presente artículo es determinar cuál es el género de bacteria utilizado en concreto autoreparativo que cuenta con mayor investigación en la actualidad. Para alcanzar este objetivo, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de los estudios recientes que aborden el tema de los concretos autoreparativos. Se analizarán publicaciones científicas, artículos técnicos y reportes de investigación que proporcionen información sobre el uso de bacterias en el concreto, enfocándose en identificar los géneros bacterianos más estudiados y los resultados obtenidos en términos de mejora de propiedades mecánicas y capacidades de autoreparación.

## **II. METODOLOGÍA**

Para la presente revisión bibliográfica, se tomaron en cuenta los artículos científicos publicados en los últimos cinco años, específicamente del periodo 2020 a 2024, poniendo especial énfasis en las investigaciones más recientes, Web Of Science, Scopus, EBSCOhost, ProQuest y Scielo, artículos centrados en el uso de bacterias en el concreto con el objetivo de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y su capacidad de autocuración.

Para identificar artículos relevantes, se utilizaron palabras clave como “bacteria”, “concreto”. En el proceso de investigación, se encontraron numerosos artículos y revistas indexadas, de los cuales se seleccionaron 14 de Web Of Science, 24 de Scopus, 10 de EBSCOhost, 2 de ProQuest y 2 de Scielo. Estos artículos serán citados en el apartado de resultados siguiendo el formato APA.

Los artículos Modelos predictivos para la tasa de curación, control de patógenos ajenos que aprovechan el bioconcreto para propagarse,

Una primera revisión encontró gran cantidad de artículos que guardaban relación con los efectos de las poblaciones bacterianas en el concreto, sin embargo, muchos de ellos se enfocaban en temas ajenos al estudiado en este artículo de revisión. Algunos trataban de encontrar un modelo matemático predictivo para la tasa de curación del concreto, otros el control de patógenos que aprovechaban el ambiente creado por el bio concreto para propagarse, y otros tantos estudiaban la posibilidad de usar materiales no contaminantes como medio para facilitar la propagación de ciertas bacterias. Por tanto se realizó una selección manual de los artículos con el fin de identificar investigaciones que se enfocaran específicamente en la estabilización físico-mecánica del suelo.

**Tabla 1:** Artículos seleccionados por base de datos.

| <b>Base de datos</b> | <b>Palabra Clave</b> | <b>Documentos</b> | <b>Periodo</b> | <b>Artículos escogidos</b> |
|----------------------|----------------------|-------------------|----------------|----------------------------|
| ScienceDirect        | bacteria, concrete   | 116               | 2020-2024      | 4                          |
| Scielo               | bacteria, concrete   | 6                 | 2020-2024      | 2                          |
| ProQuest             | bacteria, concrete   | 748               | 2020-2024      | 2                          |
| Web of Science       | bacteria, concrete   | 382               | 2020-2024      | 14                         |
| Scopus               | bacteria, concrete   | 997               | 2020-2024      | 24                         |
| EBSCOhost            | bacteria, concrete   | 1908              | 2020-2024      | 10                         |

La información se procesó mediante Excel, detallándose el título de cada artículo, el autor, el año de publicación y otros detalles, entre ellos, la bacteria estudiada. Esto se hizo para facilitar el análisis de los resultados.

### **III. RESULTADOS**

A continuación, se presentan las fuentes de los artículos seleccionados, que serán fundamentales para las conclusiones de este artículo de revisión.

**Tabla 2:** Artículos seleccionados por base de datos y año.

|                       | <b>2020</b> | <b>2021</b> | <b>2022</b> | <b>2023</b> | <b>2024</b> | <b>Total</b> |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>ScienceDirect</b>  | 1           |             | 1           |             | 2           | 4            |
| <b>Scielo</b>         |             |             | 1           | 1           |             | 2            |
| <b>ProQuest</b>       |             |             |             | 1           | 1           | 2            |
| <b>Web of Science</b> | 2           | 1           | 5           | 5           | 1           | 14           |
| <b>Scopus</b>         |             |             | 3           | 6           | 15          | 24           |
| <b>EBSCOhost</b>      | 2           | 1           | 0           | 5           | 2           | 10           |
| <b>Total</b>          | 5           | 2           | 10          | 18          | 21          | 56           |

Yan y otros (2024), investigaron los efectos de la precipitación de carbonatos inducida por microbios (MICP) en la autocuración de las grietas del concreto. Los microbios utilizaron perlita expandida como portador. El artículo se dirige a mejorar la resistencia del hormigón durante los ciclos de congelación y descongelación. En la investigación, se evaluaron sistemáticamente las propiedades mecánicas de diferentes grados de resistencia luego de varios ciclos de congelación-descongelación. Los resultados demostraron que la técnica de biogemación (microbios dentro de perlita expandida) preserva la actividad microbiana de la *Sporosarcina Pasteurii* durante estos ciclos, logrando una actividad de germinación secundaria del 92,3 % y una tasa de conversión de esporas del 96,1 %. La incorporación de estos agentes mejoró significativamente la resistencia del hormigón a los ciclos de congelación-descongelación, alcanzando hasta 700 ciclos en concreto de grado C60, en comparación con solo 150 en el control. Sin embargo, se observó una disminución en la tasa de curación de grietas con el aumento de los ciclos de congelación-descongelación. En conclusión, para maximizar la resistencia al congelamiento y las propiedades de autocuración sin afectar negativamente las propiedades mecánicas, es esencial utilizar concreto de alta resistencia y ajustar adecuadamente la dosis de agentes microbianos de autocuración.

Oh, Kim, Maeng, Oh, & Chung (2024), estudiaron el concreto bacteriano, conocido por su capacidad auto-reparable mediante la precipitación de carbonato de calcio por bacterias como *Sporosarcina pasteurii* en condiciones alcalinas, fue estudiado para evaluar su uso en la reparación de concreto. Se prepararon muestras de mortero con y sin bacterias, curadas en diferentes soluciones (medio de cultivo, urea y agua) para

investigar las propiedades mecánicas y microestructurales. Se encontró que el carbonato de calcio precipitado mejoró la durabilidad y resistencia del mortero, llenando grietas y poros microscópicos. Aunque las muestras con bacterias mostraron menor resistencia inicial, las curadas con urea presentaron una mejora significativa. Este estudio destaca la influencia de las bacterias en la microestructura y propiedades mecánicas del concreto, sugiriendo aplicaciones potenciales para la reparación y mejora de materiales cementosos.

Igbokwe, Ibekwe, Mensah, Agu, & Li (2024), introdujeron una metodología innovadora para sanar grietas macroscópicas en el concreto utilizando la bacteria *Lysinibacillus Sphaericus* (LSB) encapsuladas en fibras de celulosa. Esto hace uso de la habilidad de biocalcificación de LSB para lograr una notable mejora en las propiedades mecánicas del concreto. Como resultados se observó que la adición de bacterias encapsuladas en fibras de celulosa en el concreto aumentó en un 25 % la resistencia a la tracción en comparación con muestras de control. Además, el concreto auto curable mostró una capacidad convincente para cerrar grietas de hasta 2.5 mm en entornos completamente húmedos y de 1.5 mm en condiciones de humedad-sequedad en un plazo de 30 días. Estos resultados fueron corroborados con pruebas de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, donde el concreto con bacterias encapsuladas (FBCxx) alcanzó 23 MPa y 39 MPa respectivamente, superando significativamente las muestras de control, que alcanzaron los 16 MPa y 28 MPa a los 7 y 28 días, respectivamente. Los hallazgos validan la viabilidad del uso de bacterias transportadas por fibras de celulosa como una nueva alternativa para la construcción de concretos sostenibles y duraderos, ofreciendo una solución prometedora para la sanación autónoma de grietas en estructuras de concreto.

Luo, Ji, Li, & Yang (2024), utilizó agregado reciclado (AR) modificado como portador bacteriano (*Sporosarcina pasteurii*), logrando una significativa mejora en la calidad del AR mediante el relleno de poros superficiales y microgrietas con carbonato de calcio biológico. Este tratamiento aumentó la densidad aparente del AR en un 1.9% y disminuyó la absorción de agua y el índice de trituración en un 13.9% y 15.3%, respectivamente. El concreto reciclado con AR modificado mostró una notable capacidad de autorreparación de grietas, con una relación de reparación de grietas de hasta el 94.5% para grietas de aproximadamente 0.4 mm de ancho después de

56 días de curación, superando en un 61.0% al concreto reciclado ordinario. Además, se observó un aumento del 16.6% en la resistencia a la compresión a 28 días, una disminución del 37.5% en el coeficiente de absorción de agua capilar, y mejoras significativas en la trabajabilidad y la resistencia a la penetración de iones de cloruro. Estos resultados subrayan la viabilidad de utilizar AR modificado como portador bacteriano para promover la autorreparación de grietas y mejorar el rendimiento global del concreto reciclado.

Su, Qu, Zhang, & Zhang (2024), investigó la mejora de agentes autorreparadores para estructuras de concreto expuestas a entornos complejos. El objetivo principal es desarrollar un sistema de autorreparación eficiente, basado en bacterias (*Bacillus mucilaginosus*), que responda a la presencia de iones de sulfato, utilizando microcápsulas de alginato de calcio-bario modificadas. Los resultados preliminares indican que las microcápsulas pueden ser efectivamente activadas por iones de sulfato, permitiendo la encapsulación exitosa de esporas microbianas y nutrientes esenciales. Además, se ha observado que la modificación del alginato y la reducción del tamaño de partícula pueden mejorar las propiedades mecánicas del sistema, lo que sugiere un potencial significativo para aplicaciones prácticas en entornos marinos y salinos. Este estudio se centrará en optimizar la producción y la capacidad de carga de las microcápsulas, así como en evaluar su efectividad a largo plazo en la reparación de grietas en estructuras de concreto.

Sidhu, Goyal, & Reddy (2024), exploró la eficiencia de bacterias fotoautótrofas y heterótrofas en la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y su impacto en las propiedades de resistencia y permeabilidad del hormigón. Las bacterias, a través de diferentes vías metabólicas, influyen en la estructura porosa del material cementoso. En un estudio comparativo entre las bacterias *Synechocystis pevalekii* y *Bacillus paramycoides*, no se observaron diferencias significativas en la resistencia a la compresión de las muestras tratadas después de 28 días (la muestra con *Bacillus paramycoides* obtuvo 44.5 MPa, la muestra con *Synechocystis pevalekii* obtuvo 43.5 MPa) en comparación a los 34.5 MPa obtenidos por la muestra patrón a los 28 días. Sin embargo, ambos tipos de bacterias lograron mejorar las propiedades del hormigón, reduciendo su permeabilidad. Las muestras tratadas con *S. pevalekii* y *B. paramycoides* exhibieron coeficientes de sorptividad de 0,007 y 0,005 respectivamente, tras el mismo período

de curado. Además, la carga que atravesó las muestras de concreto fue notablemente mayor en las tratadas con *S. pevalekii* (1901 coulombs) que en las de *B. paramycoides* (1440 coulombs), indicando una potencial diferencia en los mecanismos de mejora de propiedades. Esto indica que las bacterias fotoautótrofas son una alternativa viable a las ureolíticas, que además presenta una buena capacidad para reducir la emisión de amoníaco.

Solarte, Choque, Perez Yagama, & Urias Amaya (2024), tuvieron como objetivo investigar los efectos de la adición de ceniza de cáscara de arroz (RHA) y lactato de calcio en mezclas de concreto, junto con la bacteria *Bacillus subtilis*, en las propiedades mecánicas del concreto. Se busca evaluar cómo estas adiciones pueden mejorar la resistencia a la compresión y la capacidad de autorreparación del concreto, proporcionando una alternativa sostenible y efectiva para prolongar su vida útil. Los resultados muestran que la combinación de RHA, lactato de calcio y *Bacillus subtilis* resulta en un notable aumento de hasta un 25.83% en la resistencia a la compresión respecto al concreto convencional, y un incremento del 44.80% comparado con el concreto solo con RHA. Además, las muestras modificadas no presentaron porosidad y mantuvieron una buena trabajabilidad. El estudio también destaca la eficiencia del agente bacteriano *Bacillus subtilis* en mejorar las propiedades del concreto, lo que sugiere potenciales beneficios económicos a largo plazo al reducir los costos de mantenimiento y reparación.

Baby & Palanisamy (2024), evaluaron el rendimiento de un mortero autorreparable en áreas costeras utilizando *Halobacillus halophilus* MCC2188 encapsulado en perlita expandida. Se prepararon especímenes de mortero con una proporción de cemento: árido fino de 1:3, sustituyendo un 10% del árido fino por perlita expandida con esporas bacterianas y nutrientes, protegidas con silicato de sodio y cemento. Los especímenes fueron curados en agua marina, tanto sumergidos como parcialmente sumergidos, y se evaluaron sus propiedades mecánicas y potencial de autorreparación. Los resultados mostraron una notable capacidad de autorreparación, con grietas de hasta 0.84 mm curadas y una recuperación promedio de resistencia del 92.79% en 56 días. La precipitación mineral secundaria densificó la matriz del mortero, mejorando la resistencia mecánica y el cierre de grietas. La caracterización microestructural confirmó la presencia de polimorfos de carbonato de

calcio y brucita. Los resultados sugieren un gran potencial para el desarrollo de materiales autorreparables en ambientes marinos, recomendando estudios futuros con condiciones realistas de exposición y optimización de la dosificación de esporas y nutrientes.

Kumar Soda, y otros, (2024), exploraron el rendimiento del mortero de cemento autocurativo utilizando bacterias encapsuladas, específicamente *Bacillus megaterium*, encerradas en esferas de alginato recubiertas con cemento (CCAB). El objetivo fue mejorar la comprensión del cierre de grietas y la resistencia del mortero autocurativo, evaluando diferentes porcentajes de reemplazo del agregado fino con CCAB y la adición de nano-sílice para mantener la resistencia a la compresión. Como resultados referentes a la resistencia a la compresión, la combinación de 10% de CCAB y 5% de nano-sílice mostró la mayor resistencia a la compresión (19,99 MPa). Sin embargo, se debe mencionar que el reemplazo del 20% de agregado con CCAB y 5% de nano-sílice fue el óptimo resultado, ya que sus 11,64 MPa suplen las necesidades del concreto y maximizan la capacidad de curación de grietas. Referente a la curación de grietas, se encontró que el porcentaje máximo de curación es de 83,30% en una prueba de permeabilidad al agua de 56 días con un reemplazo del 20% del agregado. La prueba UPV reportó una tasa de curación del 89,65% en el mismo período. Referente a la explicación del fenómeno, los análisis de FESEM y EDX mostraron que las células bacterianas precipitan calcita alrededor de las paredes celulares, contribuyendo a la curación de las grietas.

Anbazhagan, Arunachalam, & Arunachalam (2024), tuvieron como objetivo investigar el uso de la precipitación de calcita inducida microbiológicamente junto con fibras de acero, ceniza de cascarilla de arroz (RHA) y agregado ligero (LWA) para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Como resultados, se obtuvo que la adición de bacterias al concreto con LWA inyectado (CC+BS) resultó en una mayor resistencia a la compresión en comparación con el concreto estándar (CC) en todos los días de curado con agua, para ambos tamaños de agregado (10 mm y 12.5 mm). El concreto con agregado de 10 mm obtuvo 10 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días, mientras que la mezcla CS+BS obtuvo 13 MPa a los 28 días. El concreto con agregado de 12.5 mm obtuvo 13 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días, mientras que la mezcla CS+BS obtuvo 15 MPa a los 28



días. La mezcla de bacterias y fibra de acero mostró una mejora significativa en la resistencia a la compresión debido a la precipitación de carbonato de calcio, lo que generó una matriz más compacta. En cuanto a la capacidad de recuperación, las muestras pre comprimidas de concreto con agregado de 10 mm y 12,5 mm recuperaron su resistencia a la compresión al 100%. El  $\text{CaCO}_3$  formado en las grietas no solo reforzó las fracturas, sino que también mejoró la recuperación de resistencia a la compresión.

Anand, Goyal, & Sudhakara Reddy (2022), investigaron la aplicación de la precipitación de carbonato de calcio microbiana inducida (MICCP) para restaurar la integridad del concreto agrietado, empleando la técnica de Impedancia Electromecánica (EMI) para monitorear el proceso de curación. Se desarrolló un medio inoculante basado en humo de sílice (SF) como portador bacteriano, capaz de mantener células viables hasta 180 días a temperaturas de 4 °C y 25 °C, en comparación con otros medios inoculantes como el polvo de horno de cemento (CKD) y ceniza de cáscara de arroz (RHA). Las grietas artificiales en especímenes de SF (SFA) reparados con MICCP mostraron un proceso gradual de curación. Después de 45 días de tratamiento, grietas de aproximadamente 0.5 mm fueron selladas con una capa de  $\text{CaCO}_3$  precipitado, caracterizado mediante FESEM-EDX, XRD y TGA, evidenciando cristales de carbonato de calcio. Esto desembocó en un aumento significativo (aproximadamente 33 %) en la resistencia a flexión de los especímenes SFA curados en comparación con el control. Esto demuestra la viabilidad del uso de MICCP con material portador basado en SF y la efectividad de la EMI para monitorear la curación de grietas en estructuras de concreto.

Sarkar, Maiti, Malik, & Xu (2022), tuvieron por objetivo investigar la capacidad de curación y la durabilidad de un composite basado en cenizas volantes activadas alcalinamente incorporando endosporas bacterianas, específicamente *Bacillus Cohnii*. Los resultados indican que las endosporas de *Bacillus Cohnii* promueven la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  dentro de la matriz del composite, facilitando la cicatrización de grietas artificiales de hasta 0.59 mm de ancho. Este proceso de biomineralización reduce significativamente la porosidad del material y mejora su resistencia a la penetración química, especialmente frente a iones sulfato. Además, se observó una recuperación del 12% de la resistencia mecánica en 28 días en los especímenes

cicatrizados, y una mayor velocidad de ondas de pulso ultrasónico en comparación con los especímenes agrietados.

Shukla, y otros (2022), tuvieron como objetivo investigar la mejora de la eficiencia del concreto mediante el uso de bacterias, específicamente *Pseudomonas*, que promueven el crecimiento de calcita para reparar y fortalecer estructuras. Se observó que el concreto bacteriano mostró resultados superiores en resistencia a la compresión en todas las etapas de curado, utilizando diferentes concentraciones de la solución bacteriana. A los 180 días, se observaron resistencias a la compresión de 46.25 MPa; 52.16 MPa; 54.26 MPa para las muestras patrón, con  $10^6$  cfu/mL y  $10^7$  cfu/mL, respectivamente. Cfu es una unidad formadora de colonias que contabiliza la cantidad de microorganismos. Comparado con el concreto convencional, el concreto bacteriano exhibió mejoras consistentes en sus características mecánicas a lo largo del tiempo. La inclusión de bacterias *Pseudomonas* en la mezcla mejoró la estructura hidratada del mortero de cemento, facilitando la cicatrización de fracturas mediante la formación de carbonato de calcio. Además, las pruebas de durabilidad demostraron que el concreto bacteriano experimentó una menor pérdida de peso y resistencia frente a la exposición a ácido sulfúrico y sulfato de magnesio al 5%, en comparación con el concreto convencional.

Benjamin, Zachariah, Sudhakumar, & Suchithra (2023), tuvieron por objetivo investigar el uso de la deposición microbiana inducida de  $\text{CaCO}_3$  para crear un material compuesto que repare microgrietas en el concreto. Se analizaron varias cepas bacterianas, incluyendo A2 - *Brevibacillus reuszeri* STV1702A2, A1 - *Bacillus* sp. STV1702A1, y C1 - *Bacillus thuringiensis* STV1702C1, junto con *Bacillus subtilis* (MTCC441) como control. Estas cepas fueron optimizadas en conjunto con una proporción de 1:1:0.5, lo cual generó un máximo de 405.45 mg de precipitación bacteriana. Los resultados demostraron que el mortero de cemento con la mezcla bacteriana presentó un aumento significativo del 40-45% en resistencia a la compresión, así como una disminución del 30-40% en absorción de agua y porosidad efectiva. Esto indica una mayor densidad y durabilidad del concreto reparado. Los estudios de durabilidad mostraron que el consorcio bacteriano superó en desempeño a *Bacillus subtilis* (MTCC441).

**Tabla 3:** Lista de artículos seleccionados por género de bacteria estudiada.

| Número | Artículo  | Bacteria                               | Géneros Bacterianos |
|--------|---|--|---------------------|
| 1      | Fahimizadeh, M., Pasbakhsh, P., Mae Lee, S., Lee Tan, J. B., Raman Singh, R., & Yuan, P. (2024)             | Bacillus pseudofirmus                  | Bacillus            |
| 2      | Gao, Y., P. R., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2020)  | subtilis                               | Bacillus            |
| 3      | Kumar Soda, P. R., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Kumar Shukla, S., & Mini, K. (2024) | Bacillus pseudofirmus                  | Bacillus            |
| 4      | Pan, Y., Deng, L., Li, S., Wang, J., & Zhang, F. (2022)   | subtilis                               | Bacillus            |
| 5      | Yan, Y., Tian, H., Liu, W., Jia, G., Li, Z., Gao, Y., Zhang, Y., & Ma, G. (2024).                           | subtilis                               | Bacillus            |
| 6      | Oh, S., Kim, J., Maeng, S. K., Oh, S., & Chung, S. (2024).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 7      | Igbokwe, E., Ibekwe, S., Mensah, P., Agu, O., & Li, G. (2024).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 8      | Luo, M., Ji, A., Li, X., & Yang, D. (2024)  | bacterial carrier                      | Bacillus            |
| 9      | Su, Y., Qu, F., Zhang, J., & Zhang, X. (2024).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 10     | Bakr, M. A., Hussain, A., Singh, P. K., Singh, B. K., & Prajakti, N. (2023).                                | Bacillus megaterium, Bacillus subtilis | Bacillus            |
| 11     | Philip, N., R, G. V., & Syriac, T. (2023).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 12     | Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 13     | Solarte, A., Choque, B., Yagama, C. P., & Amaya, S. U. (2024).  | subtilis                               | Bacillus            |
| 14     | Rajesh, A., & Sumathi, A. (2024)  | subtilis                               | Bacillus            |
| 15     | Lou, Y., Wang, H., Amin, M. N., Arifeen, S. U., Dodo, Y., Althoey, F., & Deifalla, A. F. (2024)             | subtilis                               | Bacillus            |
| 16     | Min, J., Son, Y., Jang, I., Yi, C., & Park, W. (2024)   | subtilis                               | Bacillus            |
| 17     | Baby, B., & Palanisamy, T. (2024).  | Halobacillus Halophilus                | Halobacillus        |
| 18     | Da Silva, D. J. F., Da Silva Brabes, K. C., & Falcão, E. A. (2024)  | Lysinibacillus sphaericus              | Lysinibacillus      |

| Número | Artículo  | Bacteria  | Géneros Bacterianos |
|--------|---|---|---------------------|
| 19     | Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024a).   | subtilis  | Bacillus            |
| 20     | Soda, P. R. K., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Shukla, S. K., & Mini, K. (2024).  | subtilis  | Bacillus            |
| 21     | Anbazhagan, R., Arunachalam, K., & Arunachalam, S. (2024).  | subtilis  | Bacillus            |
| 22     | Benjamin, B., Zachariah, S., Sudhakumar, J., & Suchithra, T. (2023).  | Bacillus thuringiensis, Bacillus subtilis             | Bacillus            |
| 23     | Liu, Z., Gan, L., & Rong, H. (2023).  | subtilis  | Bacillus            |
| 24     | Baradaran, M., & Sadeghpour, M. (2023)  | megaterium, subtilis                                  | Bacillus            |
| 25     | Yazici, Ş., Güller, C., Ayekin, B., Mardani, A., & Akkaya, A. (2023)  | subtilis  | Bacillus            |
| 26     | Shafiei-Pourkamali, M., & Mohammadyan-Yasouj, S. E. (2022).   | subtilis  | Bacillus            |
| 27     | Anand, K., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2022)   | Alkalihalobacillus clausii and Bacillus thuringiensis | Bacillus            |
| 28     | Sarkar, M., Maiti, M., Malik, M. A., & Xu, S. (2022)  | subtilis  | Bacillus            |
| 29     | Morales, Y. B., Vasquez, M. C., Beltran, G. S., & Abanto, S. E. S. (2023).  | Lysinibacillus sphaericus                             | Lysinibacillus      |
| 30     | Muller, V., Pacheco, F., Carvalho, C. M., Fernandes, F., Valiati, V. H., Modolo, R. C. E., Ehrenbring, H. Z., & Tutikian, B. F. (2022)                    | subtilis  | Bacillus            |
| 31     | Barbieri, J. C. Z., Veit, M., Balestra, C. E. T., Schneider, R., de Araujo, T. P., Bittencourt, P. R. S., Gonçalves, G., da Cunha, & Sandmann, A. (2024). | subtilis  | Bacillus            |
| 32     | Santos, A. P., do Nascimento, M., Rodrigues Pereira, Barboza, C. S., & Omido, A. R. (2023)  | subtilis  | Bacillus            |
| 33     | Alyaseen, A., Poddar, A., Kumar, N., Haydar, K., Khan, A., Sihag, P., Lee, D., Kumar, R., & Singh, T. (2023)  | subtilis  | Bacillus            |
| 34     | Amjad, U. B., Siddique, M. S., Shahid, T., Iftikhar, A., Alogla, S. M., & Ahmad, J. (2023)  | Sporosarcina aquimarina                               | Sporosarcina        |
| 35     | Bakr, M. A., & Singh, B. K. (2023).   | subtilis  | Bacillus            |
| 36     | Elmenshawy, Y., Elmahdy, M. A., Moawada, M., Elshami, A. A., Ahmad, S. S., & Nagai, K. (2024)   | subtilis  | Bacillus            |

| <b>Número</b> | <b>Artículo</b>  | <b>Bacteria</b>   | <b>Géneros Bacterianos</b> |
|---------------|--|-------------------|----------------------------|
| 37            | Huynh, N. N. T., Imamoto, K., & Kiyohara, C. (2022)  | subtilis          | Bacillus                   |
| 38            | Islam, M. M., Hoque, N., Islam, M., & Gias, I. I. (2022).                                      | coli              | Bacillus                   |
| 39            | Metwally, G. A. M., Mahdy, M., & El-Raheem, A. E. H. A. (2020).                                | Pasteurii         | Sporosarcina               |
| 40            | Orozco, C., & Urbino, I. J. A. (2022)  | Pasteurii         | Sporosarcina               |
| 41            | Özhan, H. B., Yildirim, M., Ögüt, H., & Öz, H. G. (2023)                                       | subtilis          | Bacillus                   |
| 42            | Rahaman, S., Srujan, D. S., Dutta, J. R., Kar, A., & Bandyopadhyay, M. (2023)                  | subtilis          | Bacillus                   |
| 43            | Rossi, E., Vermeer, C. M., Mors, R., Kleerebezem, R., Copuroglu, O., & Jonkers, H. M. (2021)   | subtilis          | Bacillus                   |
| 44            | Shukla, A., Gupta, N., Dixit, S., Vatin, N. I., Gupta, M., Saxena, K. K., & Prakash, C. (2022) | subtilis          | Bacillus                   |
| 45            | Yip, B. F., Haniffah, M. R. M., Kasiman, E. H., & Abidin, A. R. Z. (2022).                     | subtilis          | Bacillus                   |
| 46            | Zamani, M., Nikafshar, S., Mousa, A., & Behnia, A. (2020).                                     | subtilis          | Bacillus                   |
| 47            | Radhakumar, L., Murugan, S., & Sankaralingam, J. (2023)  | subtilis          | Bacillus                   |
| 48            | Nindhita, K. W., Zaki, A., & Zeyad, A. M. (2024)   | subtilis          | Bacillus                   |
| 49            | Ghoniema, A., Hassana, H., & Aboul-Noura, L. (2021)  | subtilis          | Bacillus                   |
| 50            | Hadhinata, C., Pratamaa, M. M. A., & Dewi, C. P. (2024)  | subtilis          | Bacillus                   |
| 51            | Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I. (2020).                                    | subtilis          | Bacillus                   |
| 52            | Han, Q., Xiao, Y., & Li, P. (2023)   | Pasteurii         | Sporosarcina               |
| 53            | Du, X., Si, Z., Qi, D., Li, Y., Huang, L., Zhang, Y., & Gao, Y. (2023)                         | Bacillus cohnii   | Bacillus                   |
| 54            | Shaheen, N., Khushnood, R. A., Memon, S. A., & Adnan, F. (2023)                                | subtilis          | Bacillus                   |
| 55            | Karimi, N., & Mostofinejad, D. (2020)  | subtilis          | Bacillus                   |
| 56            | Risdanareni, P., Wang, J., Boon, N., & De Belie, N. (2023)                                     | bacterial carrier | Bacillus                   |

**Tabla 4:** Artículos por género de bacteria estudiada.

| <b>Géneros Bacterianos</b> | <b>Número</b> |
|----------------------------|---------------|
| Bacillus                   | 49            |
| Sporosarcina               | 4             |
| Lysinibacillus             | 2             |
| Synechocystis              | 1             |
| <b>Total</b>               | <b>56</b>     |

#### **IV. CONCLUSIONES**

- El género de bacteria más estudiado es el Bacillus, con múltiples estudios centrados en especies como el Bacillus Cohnii, Bacillus subtilis y Bacillus megaterium. Esto debido a su capacidad para inducir la precipitación de carbonato de calcio y mejorar las propiedades mecánicas del concreto.
- El segundo género bacteriano más estudiado es el género Sporosarcina. Al compararlas con las bacterias de género Bacillus, se notan que ambos son eficaces en la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , mejorando las propiedades de durabilidad y resistencia del concreto. Sin embargo, en términos de capacidad de supervivencia y actividad microbiana, las Sporosarcina poseen una mayor capacidad de supervivencia y adaptación en diversos portadores y condiciones, incluyendo ciclos de congelación-descongelación y ambientes salinos; mientras que el comportamiento de las bacterias Bacillus varía según el tipo de portador y el entorno de curado.

## REFERENCIAS

- Alyaseen, A., Poddar, A., Kumar, N., Haydar, K., Khan, A., Sihag, P., Lee, D., Kumar, R., & Singh, T. (2023). Influence of silica fume and *Bacillus subtilis* combination on concrete made with recycled concrete aggregate: Experimental investigation, economic analysis, and machine learning modeling. *Case Studies In Construction Materials*, 19, e02638. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02638>
- Amjad, U. B., Siddique, M. S., Shahid, T., Iftikhar, A., Alogla, S. M., & Ahmad, J. (2023). A study on microbial self-healing concrete using expanded perlite. *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences. Technical Sciences*, 146475. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2023.146475>
- Anand, K., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2022). Long-term viable SF immobilized bacterial cells as sustainable solution for crack healing in concrete. *Structures*, 43, 1342-1355. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.056>
- Anbazhagan, R., Arunachalam, K., & Arunachalam, S. (2024). Self-healing evaluation of bacteria grouted light weight aggregate concrete containing rice husk ash and steel fibers. *Revista de la Construcción*, 23(1), 16-30. <https://doi.org/10.7764/rdlc.23.1.16>
- Baby, B., & Palanisamy, T. (2024). An experimental investigation on mitigating cracks and augmenting the endurance of concrete structures in marine environment by bio-mortar immobilised with halophilic bacteria. *Construction & Building Materials*, 414, 134834. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134834>
- Bakr, M. A., & Singh, B. K. (2023). Effect of biomineralized *Bacillus subtilis* on recycled aggregate concrete containing blended hydrated lime and brick powder. *Case Studies In Construction Materials*, 18, e02137. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02137>
- Bakr, M. A., Hussain, A., Singh, P. K., Singh, B. K., & Prajakti, N. (2023). Effects of bacterial consortium enhanced recycled coarse aggregates on self-healing

concrete immobilized with *Bacillus megaterium* MTCC 1684 and *Bacillus subtilis* NCIM 2193. *Structural Concrete*.  
<https://doi.org/10.1002/suco.202301018>

Baradaran, M., & Sadeghpour, M. (2023). Effect of bacteria on the self-healing ability of concrete containing zeolite. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(10).  
<https://doi.org/10.1007/s41062-023-01222-6>

Barbieri, J. C. Z., Veit, M., Balestra, C. E. T., Schneider, R., de Araujo, T. P., Bittencourt, P. R. S., Gonçalves, G., da Cunha, & Sandmann, A. (2024). THE INFLUENCE OF CHITOSAN ADDITION ON SULFURIC ACID-ATTACK AND CARBONATION OF CONCRETE. [A INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE QUITOSANA NO ATAQUE DE ÁCIDO SULFÚRICO E NA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO LA INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE QUITOSANO EN EL ATAQUE DEL ÁCIDO SULFÚRICO Y LA CARBONACIÓN DEL CONCRETO] *Revista De Gestão Social e Ambiental*, 18(7), 1-25.  
<https://doi.org/10.24857/rgsa.vl8n7-065>

Benjamin, B., Zachariah, S., Sudhakumar, J., & Suchithra, T. (2023). Bacterial consortium development and optimization for crack controlling cement mortar. *Journal Of Building Engineering*, 77, 107501.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107501>

Da Silva, D. J. F., Da Silva Brabes, K. C., & Falcão, E. A. (2024). Evaluation of the biotransformation of alkali-silica reaction products by *Alkalihalobacillus clausii* and *Bacillus thuringiensis*. *Cement & Concrete Composites*, 146, 105399.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105399>

Du, X., Si, Z., Qi, D., Li, Y., Huang, L., Zhang, Y., & Gao, Y. (2023). Optimization of spore production and activation conditions of concrete crack healing bacteria and research on crack repair effect. *Construction & Building Materials*, 394, N.PAG. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132140>

Elmenschawy, Y., Elmahdy, M. A., Moawada, M., Elshami, A. A., Ahmad, S. S., & Nagai, K. (2024). Investigating the bacterial sustainable self-healing



capabilities of cracks in structural concrete at different temperatures. *Case Studies In Construction Materials*, e03188. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03188>

Fahimizadeh, M., Pasbakhsh, P., Mae Lee, S., Lee Tan, J. B., Raman Singh, R., & Yuan, P. (2024). Sustainable biologically self-healing concrete by smart natural nanotube-hydrogel system. *Developments in the Built Environment*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165924000656>

Gao, Y., P. R., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2020). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709>

Ghoniema, A., Hassana, H., & Aboul-Noura, L. (2021). Behavior of Macro-Synthetic Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Beams Incorporating *Bacillus subtilis* Bacteria. *Latin American Journal of Solids & Structures*, 18(3), 1–14. <https://doi.org/10.1590/1679-78256378>

Hadhinata, C., Pratama, M. M. A., & Dewi, C. P. (2024). The use of *Bacillus subtilis* as a healing agent in structural concrete with recycled polyethylene terephthalate fibers. *AIP Conference Proceedings*, 2991(1), 1–9. <https://doi.org/10.1063/5.0198538>

Han, Q., Xiao, Y., & Li, P. (2023). Study on the effects of different polymicrobial environments on *B. Pasteurii* survivability, urease activity, and crack healing. *Construction & Building Materials*, 408, N.PAG. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133716>

Huynh, N. N. T., Imamoto, K., & Kiyohara, C. (2022). Biomineralization Analysis and Hydration Acceleration Effect in Self-healing Concrete using *Bacillus subtilis natto*. *Journal Of Advanced Concrete Technology*, 20(10), 609-623. <https://doi.org/10.3151/jact.20.609>

- Igbokwe, E., Ibekwe, S., Mensah, P., Agu, O., & Li, G. (2024). Self-healing of Macroscopic Cracks in Concrete by Cellulose Fiber Carried Microbes. *Journal Of Building Engineering*, 109383. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109383>
- Islam, M. M., Hoque, N., Islam, M., & Gias, I. I. (2022). An Experimental Study on the Strength and Crack Healing Performance of E. coli Bacteria-Induced Microbial Concrete. *Advances In Civil Engineering*, 2022, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/3060230>
- Karimi, N., & Mostofinejad, D. (2020). Bacillus subtilis bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability. *Construction & Building Materials*, 230, N.PAG. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117051>
- Kumar Soda, P. R., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Kumar Shukla, S., & Mini, K. (2024). Performance assessment of sustainable biocement mortar incorporated with bacteria-encapsulated cement-coated alginate beads. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134198>
- Liu, Z., Gan, L., & Rong, H. (2023). Durability of concrete exposed to laboratory-simulated marine microbe-induced corrosion. *Construction & Building Materials*, 400, 132563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132563>
- Lou, Y., Wang, H., Amin, M. N., Arifeen, S. U., Dodo, Y., Althoey, F., & Deifalla, A. F. (2024). Predicting the crack repair rate of self-healing concrete using soft-computing tools. *Materials Today Communications*, 38, 108043. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108043>
- Luo, M., Ji, A., Li, X., & Yang, D. (2024). Performance evaluation of self-healing recycled concrete using biomineralization modified recycled aggregate as bacterial carrier. *Journal Of Building Engineering*, 86, 109000. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109000>

- Metwally, G. A. M., Mahdy, M., & El-Raheem, A. E. H. A. (2020). Performance of Bio Concrete by Using Bacillus Pasteurii Bacteria. *Civil Engineering Journal*, 6(8), 1443-1456. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091559>
- Min, J., Son, Y., Jang, I., Yi, C., & Park, W. (2024). Managing two simultaneous issues in concrete repair: Healing microcracks and controlling pathogens. *Construction & Building Materials*, 416, 135125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135125>
- Morales, Y. B., Vasquez, M. C., Beltran, G. S., & Abanto, S. E. S. (2023). Contribución de Lysinibacillus sphaericus en la reparación de fisuras y resistencia a la compresión en hormigón durable. *Revista Ingeniería de Construcción*, 38(2). <https://doi.org/10.7764/ric.00064.21>
- Muller, V., Pacheco, F., Carvalho, C. M., Fernandes, F., Valiati, V. H., Modolo, R. C. E., Ehrenbring, H. Z., & Tutikian, B. F. (2022). Analysis of cementitious matrices self-healing with bacillus bacteria. *Revista IBRACON de Estruturas E Materiais*, 15(4). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952022000400004>
- Nindhita, K. W., Zaki, A., & Zeyad, A. M. (2024). Effect of Bacillus Subtilis Bacteria on the mechanical properties of corroded self-healing concrete. *Fracture & Structural Integrity / Frattura Ed Integrità Strutturale*, 68, 140–158. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.68.09>
- Oh, S., Kim, J., Maeng, S. K., Oh, S., & Chung, S. (2024). Influence of bacterial biomineralization conditions on the microstructural characteristics of cement mortar. *Journal Of Building Engineering*, 109455. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109455>
- Orozco, C., & Urbino, I. J. A. (2022). Self-Healing of Cracks in Concrete using Bacillus cibi with Different Encapsulation Techniques. *Journal Of Engineering And Technological Sciences*, 54(3), 220305. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.3.5>

- Özhan, H. B., Yildirim, M., Öğüt, H., & Öz, H. G. (2023). Repair of Cracks in Concrete with the Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) Method. *Slovak Journal Of Civil Engineering*, 31(4), 1-8. <https://doi.org/10.2478/sjce-2023-0021>
- Pan, Y., Deng, L., Li, S., Wang, J., & Zhang, F. (2022). A study using a combined method of scientometric and manual analysis to. *Construction and Building Materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127551>
- Philip, N., R, G. V., & Syriac, T. (2023). Effectiveness of Bacteria-Based Self-healing Concrete Under Corrosive Environment. *Iranian Journal Of Science And Technology. Transactions Of Civil Engineering/Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01248-x>
- Radhakumar, L., Murugan, S., & Sankaralingam, J. (2023). Comparative Study on the Strength Behavior of Self-Healing Concrete Using Silica Gel and Bacteria as Healing Agents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(12), 1–17. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15986>
- Rahaman, S., Srujan, D. S., Dutta, J. R., Kar, A., & Bandyopadhyay, M. (2023). Cell Viability Studies on Bacillus sp. under Different Storage Conditions for Usage in Improving Concrete Compressive Strength. *Buildings*, 13(9), 2392. <https://doi.org/10.3390/buildings13092392>
- Rajesh, A., & Sumathi, A. (2024). Improvement on Strength, Durability, and Crack Closure Behavior of Bacteria Concrete under Marine Soil Exposures. *Journal Of Testing And Evaluation*, 52(2), 20230403. <https://doi.org/10.1520/jte20230403>
- Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I. (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction & Building Materials*, 258, N.PAG. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578>
- Risdanareni, P., Wang, J., Boon, N., & De Belie, N. (2023). Alkali activated lightweight aggregate as bacterial carrier in manufacturing self-healing mortar.

Construction & Building Materials, 368, N.PAG.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130375>

Rossi, E., Vermeer, C. M., Mors, R., Kleerebezem, R., Copuroglu, O., & Jonkers, H. M. (2021). On the Applicability of a Precursor Derived from Organic Waste Streams for Bacteria-Based Self-Healing Concrete. *Frontiers In Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.632921>

Santos, A. P., do Nascimento, M., Rodrigues Pereira, Barboza, C. S., & Omido, A. R. (2023). BEHAVIOR OF CEMENT MORTAR WITH THE ADDITION OF COCONUT FIBERS. [COMPORTAMENTO DE ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE COCO] *Revista De Gestão Social e Ambiental*, 17(10), 1-19. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n10-049>

Sarkar, M., Maiti, M., Malik, M. A., & Xu, S. (2022). Evaluation of the crack-healing performance and durability of bacteria integrated alkali-activated fly ash composites. *Journal Of Building Engineering*, 54, 104642. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104642>

Shafiei-Pourkamali, M., & Mohammadyan-Yasouj, S. E. (2022). Concomitant Participation of Bacteria, Metakaolin, and Calcium Lactate to Improve Concrete Durability and Surface Crack Healing. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 34(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004444](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004444)

Shaheen, N., Khushnood, R. A., Memon, S. A., & Adnan, F. (2023). Feasibility assessment of newly isolated calcifying bacterial strains in self-healing concrete. *Construction & Building Materials*, 362, N.PAG. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129662>

Shukla, A., Gupta, N., Dixit, S., Vatin, N. I., Gupta, M., Saxena, K. K., & Prakash, C. (2022). Effects of Various Pseudomonas Bacteria Concentrations on the Strength and Durability Characteristics of Concrete. *Buildings*, 12(7), 993. <https://doi.org/10.3390/buildings12070993>

- Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024). Comparative study of heterotrophic and photoautotrophic bacteria on strength and permeability properties of concrete. *Journal Of Building Engineering*, 82, 108190. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108190>
- Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024a). Crack Bioremediation in Concrete by Photoautotrophic Cyanobacteria through Fly Ash–Based Cementitious Biogrout. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 36(2). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-16301>
- Soda, P. R. K., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Shukla, S. K., & Mini, K. (2024). Performance assessment of sustainable biocement mortar incorporated with bacteria-encapsulated cement-coated alginate beads. *Construction & Building Materials*, 411, 134198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134198>
- Solarte, A., Choque, B., Yagama, C. P., & Amaya, S. U. (2024). Structural performance of self-healing concrete by *Bacillus* bacteria with addition of rice husk ash. *Structures*, 61, 106111. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106111>
- Su, Y., Qu, F., Zhang, J., & Zhang, X. (2024). A new bacteria-based self-healing system triggered by sulfate ion for cementitious material. *Journal Of Building Engineering*, 86, 108886. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108886>
- Yan, Y., Tian, H., Liu, W., Jia, G., Li, Z., Gao, Y., Zhang, Y., & Ma, G. (2024). Study on frost resistance and life prediction of microbial self-healing concrete based on expanded perlite as carrier. *Journal Of Building Engineering*, 109693. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109693>
- Yazici, Ş., Güller, C., Ayekin, B., Mardani, A., & Akkaya, A. (2023). Usability of sustainable materials on bacteria-based self-healing in cementitious systems. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, 34(17), 1998-2019. <https://doi.org/10.1177/1045389x231157358>

Yip, B. F., Haniffah, M. R. M., Kasiman, E. H., & Abidin, A. R. Z. (2022). RESEARCH PROGRESS ON MICROBIAL SELF-HEALING CONCRETE. *Jurnal Teknologi/Jurnal Teknologi*, 84(3), 25-45. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17895>

Zamani, M., Nikafshar, S., Mousa, A., & Behnia, A. (2020). Bacteria encapsulation using synthesized polyurea for self-healing of cement paste. *Construction & Building Materials*, 249, 118556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118556>

## ANEXOS

### Anexo 1. Tablas de resultados

Tabla 5

| <b>Base de datos</b> | <b>Artículos escogidos</b> | <b>Variable 1 (bacteria en concreto)</b> |
|----------------------|----------------------------|--|
| ScienceDirect        | 4                          | 4  |
| Scielo               | 2                          | 2  |
| ProQuest             | 2                          | 2  |
| Web of Science       | 14                         | 14                                       |
| Scopus               | 24                         | 24                                       |
| EBSCOhost            | 10                         | 10                                       |
| <b>Total</b>         | <b>56</b>                  | <b>56</b>                                |

Tabla 6

| <b>Base de datos</b> | <b>Documentos analizados</b> | <b>Artículos escogidos</b> |
|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| ScienceDirect        | 116                          | 4                          |
| Scielo               | 6                            | 2                          |
| ProQuest             | 748                          | 2                          |
| Web of Science       | 382                          | 14                         |
| Scopus               | 997                          | 24                         |
| EBSCOhost            | 1908                         | 10                         |



**Tabla 7**

| <b>titulo</b>   | <b>autor y año</b>   | <b>año</b> | <b>repositorio</b> | <b>Género bacteriano</b> |
|---|--|------------|--------------------|--------------------------|
| Influence of silica fume and <i>Bacillus subtilis</i> combination on concrete made with recycled concrete aggregate: Experimental investigation, economic analysis, and machine learning modeling | Alyaseen, A., Poddar, A., Kumar, N., Haydar, K., Khan, A., Sihag, P., Lee, D., Kumar, R., & Singh, T. (2023) | 2023       | Web Of Science     | <i>Bacillus</i>          |
| A study on microbial self-healing concrete using expanded perlite   | Amjad, U. B., Siddique, M. S., Shahid, T., Iftikhar, A., Alogla, S. M., & Ahmad, J. (2023)                   | 2023       | Web Of Science     | <i>Sporosarcina</i>      |
| Long-term viable SF immobilized bacterial cells as sustainable solution for crack healing in concrete   | Anand, K., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2022)  | 2022       | Scopus             | <i>Bacillus</i>          |
| Self-healing evaluation of bacteria grouted light weight aggregate concrete containing rice husk ash and steel fibers   | Anbazhagan, R., Arunachalam, K., & Arunachalam, S. (2024).   | 2024       | Scopus             | <i>Bacillus</i>          |
| An experimental investigation on mitigating cracks and augmenting the endurance of concrete structures in marine environment by bio-mortar immobilised with halophilic bacteria                   | Baby, B., & Palanisamy, T. (2024).   | 2024       | Scopus             | <i>Halobacillus</i>      |
| Effect of biomineralized <i>Bacillus subtilis</i> on recycled aggregate concrete containing blended hydrated lime and brick powder  | Bakr, M. A., & Singh, B. K. (2023).  | 2023       | Web Of Science     | <i>Bacillus</i>          |
| Effects of bacterial consortium enhanced recycled coarse aggregates on self-healing concrete immobilized with <i>Bacillus megaterium</i> MTCC 1684 and <i>Bacillus subtilis</i> NCIM 2193         | Bakr, M. A., Hussain, A., Singh, P. K., Singh, B. K., & Prajakti, N. (2023).                                 | 2023       | Scopus             | <i>Bacillus</i>          |
| Effect of bacteria on the self-healing ability of   | Baradaran, M., & Sadeghpour, M. (2023)   | 2023       | Scopus             | <i>Bacillus</i>          |

|  |   |      |                |                |
|--|---|------|----------------|----------------|
| concrete containing zeolite  |   |      |                |                |
| THE INFLUENCE OF CHITOSAN ADDITION ON SULFURIC ACID-ATTACK AND CARBONATION OF CONCRETE   | Barbieri, J. C. Z., Veit, M., Balestra, C. E. T., Schneider, R., de Araujo, T. P., Bittencourt, P. R. S., Gonçalves, G., da Cunha, & Sandmann, A. (2024). | 2024 | ProQuest       | Bacillus       |
| Bacterial consortium development and optimization for crack controlling cement mortar  | Benjamin, B., Zachariah, S., Sudhakumar, J., & Suchithra, T. (2023).  | 2023 | Scopus         | Bacillus       |
| Evaluation of the biotransformation of alkali-silica reaction products by Alkalihalobacillus clausii and Bacillus thuringiensis    | Da Silva, D. J. F., Da Silva Brabes, K. C., & Falcão, E. A. (2024)  | 2024 | Scopus         | Lysinibacillus |
| Optimization of spore production and activation conditions of concrete crack healing bacteria and research on crack repair effect. | Du, X., Si, Z., Qi, D., Li, Y., Huang, L., Zhang, Y., & Gao, Y. (2023)  | 2023 | EBSCOhost      | Bacillus       |
| Investigating the bacterial sustainable self-healing capabilities of cracks in structural concrete at different temperatures       | Elmenschawy, Y., Elmahdy, M. A., Moawada, M., Elshami, A. A., Ahmad, S. S., & Nagai, K. (2024)  | 2024 | Web Of Science | Bacillus       |
| r  | Fahimizadeh, M., Pasbakhsh, P., Mae Lee, S., Lee Tan, J. B., Raman Singh, R., & Yuan, P. (2024)   | 2024 | ScienceDirect  | Bacillus       |
| r  | Gao, Y., P. R., Zhang, H., Huang, M., & Lai, F. (2020)  | 2020 | ScienceDirect  | Bacillus       |
| Behavior of Macro-Synthetic Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Beams Incorporating Bacillus subtilis Bacteria.                | Ghoniema, A., Hassana, H., & Aboul-Noura, L. (2021)   | 2021 | EBSCOhost      | Bacillus       |
| The use of Bacillus subtilis as a healing agent in structural concrete with recycled polyethylene terephthalate fibers.            | Hadhinata, C., Pratama, M. M. A., & Dewi, C. P. (2024)  | 2024 | EBSCOhost      | Bacillus       |
| Study on the effects of different polymicrobial environments on b.   | Han, Q., Xiao, Y., & Li, P. (2023)  | 2023 | EBSCOhost      | Sporosarcina   |

|   |   |      |                |              |
|---|---|------|----------------|--------------|
| Pasteurii survivability, urease activity, and crack healing.  |   |      |                |              |
| Biom mineralization Analysis and Hydration Acceleration Effect in Self-healing Concrete using Bacillus subtilis natto             | Huynh, N. N. T., Imamoto, K., & Kiyohara, C. (2022)   | 2022 | Web Of Science | Bacillus     |
| Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes  | Igbokwe, E., Ibekwe, S., Mensah, P., Agu, O., & Li, G. (2024).  | 2024 | Scopus         | Bacillus     |
| An Experimental Study on the Strength and Crack Healing Performance of E. coli Bacteria-Induced Microbial Concrete                | Islam, M. M., Hoque, N., Islam, M., & Gias, I. I. (2022).   | 2022 | Web Of Science | Bacillus     |
| Bacillus subtilis bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability.                         | Karimi, N., & Mostofinejad, D. (2020)   | 2020 | EBSCOhost      | Bacillus     |
| r   | Kumar Soda, P. R., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Kumar Shukla, S., & Mini, K. (2024) | 2024 | ScienceDirect  | Bacillus     |
| Durability of concrete exposed to laboratory-simulated marine microbe-induced corrosion   | Liu, Z., Gan, L., & Rong, H. (2023).  | 2023 | Scopus         | Bacillus     |
| Predicting the crack repair rate of self-healing concrete using soft-computing tools  | Lou, Y., Wang, H., Amin, M. N., Arifeen, S. U., Dodo, Y., Althoey, F., & Deifalla, A. F. (2024)             | 2024 | Scopus         | Bacillus     |
| Performance evaluation of self-healing recycled concrete using biomineralization modified recycled aggregate as bacterial carrier | Luo, M., Ji, A., Li, X., & Yang, D. (2024)  | 2024 | Scopus         | Bacillus     |
| Performance of Bio Concrete by Using Bacillus Pasteurii Bacteria  | Metwally, G. A. M., Mahdy, M., & El-Raheem, A. E. H. A. (2020).   | 2020 | Web Of Science | Sporosarcina |
| Managing two simultaneous issues in concrete repair: Healing microcracks and controlling pathogens                                | Min, J., Son, Y., Jang, I., Yi, C., & Park, W. (2024)   | 2024 | Scopus         | Bacillus     |

|  |  |      |                |                |
|--|--|------|----------------|----------------|
| Contribución de Lysinibacillus sphaericus en la reparación de fisuras y resistencia a la compresión en hormigón durable                          | Morales, Y. B., Vasquez, M. C., Beltran, G. S., & Abanto, S. E. S. (2023).   | 2023 | Scielo         | Lysinibacillus |
| Analysis of cementitious matrices self-healing with bacillus bacteria<br>Análise de matrizes cimentícias autocicatrizantes com bactéria Bacillus | Muller, V., Pacheco, F., Carvalho, C. M., Fernandes, F., Valiati, V. H., Modolo, R. C. E., Ehrenbring, H. Z., & Tutikian, B. F. (2022) | 2022 | Scielo         | Bacillus       |
| Effect of Bacillus Subtilis Bacteria on the mechanical properties of corroded self-healing concrete.   | Nindhita, K. W., Zaki, A., & Zeyad, A. M. (2024)   | 2024 | EBSCOhost      | Bacillus       |
| Influence of bacterial biomineralization conditions on the microstructural characteristics of cement mortar                                      | Oh, S., Kim, J., Maeng, S. K., Oh, S., & Chung, S. (2024).   | 2024 | Scopus         | Bacillus       |
| Self-Healing of Cracks in Concrete using Bacillus cibi with Different Encapsulation Techniques   | Orozco, C., & Urbino, I. J. A. (2022)  | 2022 | Web Of Science | Sporosarcina   |
| Repair of Cracks in Concrete with the Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) Method  | Özhan, H. B., Yildirim, M., Ögüt, H., & Öz, H. G. (2023)   | 2023 | Web Of Science | Bacillus       |
| r  | Pan, Y., Deng, L., Li, S., Wang, J., & Zhang, F. (2022)  | 2022 | ScienceDirect  | Bacillus       |
| Effectiveness of Bacteria-Based Self-healing Concrete Under Corrosive Environment  | Philip, N., R, G. V., & Syriac, T. (2023).   | 2023 | Scopus         | Bacillus       |
| Comparative Study on the Strength Behavior of Self-Healing Concrete Using Silica Gel and Bacteria as Healing Agents                              | Radhakumar, L., Murugan, S., & Sankaralingam, J. (2023)  | 2023 | EBSCOhost      | Bacillus       |
| Cell Viability Studies on Bacillus sp. under Different Storage Conditions for Usage in Improving Concrete Compressive Strength                   | Rahaman, S., Srujan, D. S., Dutta, J. R., Kar, A., & Bandyopadhyay, M. (2023)  | 2023 | Web Of Science | Bacillus       |
| Improvement on Strength, Durability, and Crack   | Rajesh, A., & Sumathi, A. (2024)   | 2024 | Scopus         | Bacillus       |

|   |  |      |                |          |
|---|--|------|----------------|----------|
| Closure Behavior of Bacteria Concrete under Marine Soil Exposures   |  |      |                |          |
| Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete.                       | Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I. (2020).                                    | 2020 | EBSCOhost      | Bacillus |
| Alkali activated lightweight aggregate as bacterial carrier in manufacturing self-healing mortar.                               | Risdanareni, P., Wang, J., Boon, N., & De Belie, N. (2023)                                     | 2023 | EBSCOhost      | Bacillus |
| On the Applicability of a Precursor Derived from Organic Waste Streams for Bacteria-Based Self-Healing Concrete                 | Rossi, E., Vermeer, C. M., Mors, R., Kleerebezem, R., Copuroglu, O., & Jonkers, H. M. (2021)   | 2021 | Web Of Science | Bacillus |
| BEHAVIOR OF CEMENT MORTAR WITH THE ADDITION OF COCONUT FIBERS   | Santos, A. P., do Nascimento, M., Rodrigues Pereira, Barboza, C. S., & Omido, A. R. (2023)     | 2023 | ProQuest       | Bacillus |
| Evaluation of the crack-healing performance and durability of bacteria integrated alkali-activated fly ash composites           | Sarkar, M., Maiti, M., Malik, M. A., & Xu, S. (2022)   | 2022 | Scopus         | Bacillus |
| Concomitant Participation of Bacteria, Metakaolin, and Calcium Lactate to Improve Concrete Durability and Surface Crack Healing | Shafiei-Pourkamali, M., & Mohammadyan-Yasouj, S. E. (2022).                                    | 2022 | Scopus         | Bacillus |
| Feasibility assessment of newly isolated calcifying bacterial strains in self-healing concrete.                                 | Shaheen, N., Khushnood, R. A., Memon, S. A., & Adnan, F. (2023)                                | 2023 | EBSCOhost      | Bacillus |
| Effects of Various Pseudomonas Bacteria Concentrations on the Strength and Durability Characteristics of Concrete               | Shukla, A., Gupta, N., Dixit, S., Vatin, N. I., Gupta, M., Saxena, K. K., & Prakash, C. (2022) | 2022 | Web Of Science | Bacillus |
| Comparative study of heterotrophic and photoautotrophic bacteria on strength and permeability properties of concrete            | Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024).   | 2024 | Scopus         | Bacillus |
| Crack Bioremediation in Concrete by Photoautotrophic Cyanobacteria through  | Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024a).  | 2024 | Scopus         | Bacillus |

|   |  |      |                |          |
|---|--|------|----------------|----------|
| Fly Ash-Based Cementitious Biogrout   |  |      |                |          |
| Performance assessment of sustainable biocement mortar incorporated with bacteria-encapsulated cement-coated alginate beads | Soda, P. R. K., Mogal, A., Chakravarthy, K., Thota, N., Bandaru, N., Shukla, S. K., & Mini, K. (2024). | 2024 | Scopus         | Bacillus |
| Structural performance of self-healing concrete by Bacillus bacteria with addition of rice husk ash                         | Solarte, A., Choque, B., Yagama, C. P., & Amaya, S. U. (2024).   | 2024 | Scopus         | Bacillus |
| A new bacteria-based self-healing system triggered by sulfate ion for cementitious material                                 | Su, Y., Qu, F., Zhang, J., & Zhang, X. (2024).   | 2024 | Scopus         | Bacillus |
| Study on frost resistance and life prediction of microbial self-healing concrete based on expanded perlite as carrier       | Yan, Y., Tian, H., Liu, W., Jia, G., Li, Z., Gao, Y., Zhang, Y., & Ma, G. (2024).                      | 2024 | Scopus         | Bacillus |
| Usability of sustainable materials on bacteria-based self-healing in cementitious systems                                   | Yazici, Ş., Güller, C., Ayekin, B., Mardani, A., & Akkaya, A. (2023)                                   | 2023 | Scopus         | Bacillus |
| RESEARCH PROGRESS ON MICROBIAL SELF-HEALING CONCRETE  | Yip, B. F., Haniffah, M. R. M., Kasiman, E. H., & Abidin, A. R. Z. (2022).                             | 2022 | Web Of Science | Bacillus |
| Bacteria encapsulation using synthesized polyurea for self-healing of cement paste  | Zamani, M., Nikafshar, S., Mousa, A., & Behnia, A. (2020).   | 2020 | Web Of Science | Bacillus |