



**Bases teóricas para la implementación del concreto autorreparable en laboratorios de enseñanza superior**

Gisseth Katherine Gómez Nova

Código: 11231712768

Laura Alejandra Medina Patiño

Código: 11231717487

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2021



**Bases teóricas para la implementación del concreto autorreparable en laboratorios  
de enseñanza superior**

Gisseth Katherine Gómez Nova  
Laura Alejandra Medina Patiño

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Director:  
Iván Alejandro Ávila León, Ph.D

Línea de investigación:  
Materiales autorreparables

**Universidad Antonio Nariño**  
Programa Ingeniería Ambiental  
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil  
Bogotá, Colombia

2021



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado Bases teóricas para la implementación del concreto autorreparable en laboratorios de enseñanza superior. Cumple con los requisitos para optar al título de Ingeniero Ambiental.

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Bogotá, noviembre 2021.



## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. GENERAL	3
2.2. ESPECÍFICOS	3
3. MARCO CONCEPTUAL	4
3.1. Autoreparación autógena	4
3.2. Autoreparación autónoma	8
3.2.1. Hidrólisis de Urea	9
3.2.2. Conversión metabólica de sales de calcio	11
3.3. Bacterias	12
3.4. Cultivos microbianos	14
3.5. Tipos de material de construcción	15
3.6. Aditivos del concreto	16
3.6.1. Urea	17
3.6.2. Extracto de levadura	17
3.6.3. Derivados del calcio	17
3.7. Métodos empleados en la implementación del concreto autorreparable	18
3.7.1. Encapsulación	18
3.7.1.1. Alginato de calcio (CaAlg).	19
3.7.1.2. Melamina.	19
3.7.1.3. Microcápsula de doble pared.	19
3.7.2. Método directo	20
3.7.3. Otros métodos	20
4. ESTADO DEL ARTE	22
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
5.1. Justificación	25
6. DESCRIPCIÓN DE LA FORMA COMO SE RESUELVE EL PROBLEMA	27
6.1. Metodología	27
6.1.1. Búsqueda general de artículos	28



6.1.2. Refinación de la búsqueda	29
6.1.3. Generación de una nueva ecuación	30
6.1.4. Revisión de la bibliografía de los artículos	30
6.1.5. Creación de la base de datos	31
6.1.6. Clasificación de la información	32
6.1.7. Desarrollo del documento	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
7.1. Bacterias empleadas en el concreto autorreparable	34
7.2. Influencia de la concentración bacteriana sobre el concreto y la autocuración	36
7.2.1. Afectación de la resistencia a la compresión	36
7.2.2. Afectación de la resistencia a la flexión	39
7.2.3. Resultados del uso de bacterias en las propiedades del material	41
7.2.4. Influencia de la concentración bacteriana sobre la amplitud de grieta sellada	42
7.3. Importancia del medio de cultivo empleado para el crecimiento de bacterias	44
7.3.1. Efecto del pH y la temperatura en el crecimiento de las bacterias	46
7.4. Influencia de los aditivos en las propiedades mecánicas del material y autoreparación	48
7.4.1. Extracto de levadura y Urea	48
7.4.2. Lactato de calcio	49
7.4.3. Otros aditivos	49
7.5. Métodos de incorporación de los agentes curativos a la mezcla del material	50
7.5.1. Encapsulación y composición de las cápsulas	51
7.5.1.1. Influencia de la composición de la cápsula en el material.	53
7.5.2. Otros métodos de incorporación de los agentes curativos	54
7.5.2.1. Método directo.	54
7.5.2.2. Método de impregnación e inyección.	55
7.6. Influencia de la arena en el proceso de autocuración	56
7.7. Importancia de las proporciones de agua a cemento en el material	56
7.8. Técnicas para medir otras propiedades del material	57
7.9. Limitaciones del concreto autorreparable	59
7.10. Recomendaciones de los autores	60



8. CONCLUSIONES	63
9. RECOMENDACIONES	65
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
11. ANEXOS	76

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Operadores Booleanos	27
<b>Tabla 2.</b> Términos claves empleados para realizar las ecuaciones de búsqueda	28
<b>Tabla 3.</b> Términos de exclusión empleados para realizar las ecuaciones de búsqueda	29
<b>Tabla 4.</b> Bacterias empleadas en menor frecuencia de los artículos revisados	35
<b>Tabla 5.</b> Aditivos y vías metabólicas para la precipitación de $\text{CaCO}_3$ por bacteria	45
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la variación de pH y temperatura en el crecimiento de bacterias	46
<b>Tabla 7.</b> Frecuencia en el uso de los métodos de incorporación de los agentes curativos	50
<b>Tabla 8.</b> Afectación de las propiedades mecánicas al agregar microcápsulas	52
<b>Tabla 9.</b> Proporciones y cantidades empleadas para la mezcla de mortero de cemento	55
<b>Tabla 10.</b> Mediciones realizadas en los concretos autorreparables	57

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diferentes causas que pueden conducir a la autoreparación autógena.	5
<b>Figura 2.</b> Reacciones químicas generadas en las grietas del concreto en presencia de agua.	6
<b>Figura 3.</b> Formación de cristales en la superficie de la microgrieta.	7
<b>Figura 4.</b> Mecanismo de curación autónoma por hidrólisis de urea.	10
<b>Figura 5.</b> Mecanismo de curación autónoma por conversión metabólica de sales de calcio.	12
<b>Figura 6.</b> Diferencias entre concreto, pasta de cemento y mortero de cemento.	16
<b>Figura 7.</b> Ítems establecidos para agrupar la información encontrada en los artículos revisados.	32
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de uso de las bacterias en los artículos encontrados.	35
<b>Figura 9.</b> Influencia de la concentración bacteriana sobre la fuerza de compresión.	37
<b>Figura 10.</b> Influencia de la concentración bacteriana sobre la fuerza de flexión.	39
<b>Figura 11.</b> Mayores incrementos de las fuerzas de compresión y flexión.	41
<b>Figura 12.</b> Influencia de la concentración bacteriana sobre la amplitud de sellado de las grietas.	43

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más implementados para la estructuración de distintas edificaciones como viviendas, colegios, centros comerciales, puentes, y la malla vial de las distintas ciudades y municipios. Esto implica un gran consumo de este material cementoso, en el caso de Colombia para el periodo establecido entre julio de 2020 y junio de 2021, se han producido 13454,9 miles de toneladas de cemento gris (DANE, 2021). Este material se caracteriza por su resistencia y durabilidad; sin embargo, pueden existir microgrietas en la matriz del cemento como resultado de la carga mecánica y carga ambiental; debido a su tamaño reducido no son visibles y le dan paso a la formación de grietas más grandes a causa de la conectividad de los poros. Estas grietas de mayor tamaño proporcionan un camino para las sustancias agresivas que provocan la corrosión, lo cual va acelerando el deterioro de las propiedades estructurales del material y es una grave amenaza para la seguridad, integridad y durabilidad del concreto (Gonzalez et al., 2018; Li, 2018). Por otra parte, la producción de cemento para los distintos tipos de material genera emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Por cada 1000 g de cemento se producen aproximadamente 900 g de  $\text{CO}_2$  (ENNOMOTIVE, 2020), este compuesto hace parte de los gases efecto invernadero, que aportan a la problemática ambiental conocida como cambio climático.

Con el propósito de solucionar el efecto de las microgrietas en los materiales cementosos, se han realizado diversas investigaciones que proponen nuevos materiales, una de las iniciativas se conoce como biomaterial o material autorreparable, el cual incorpora bacterias que realizan la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y con esto se van sellando parcial o totalmente las microgrietas, a causa de los cristales de  $\text{CaCO}_3$  formados que actúan como material de relleno.



Este trabajo aborda los conceptos necesarios para la investigación práctica de los materiales autorreparables, además, aporta información actualizada sobre el tipo de bacterias empleadas, los métodos de incorporación de los agentes curativos (bacterias y aditivos), las limitaciones y beneficios del mecanismo de autocuración autónoma, entre otros; con el propósito de recopilar las bases teóricas necesarias para la futura investigación, y aplicación práctica de la temática de materiales autorreparables en la Universidad Antonio Nariño.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GENERAL

- Caracterizar los parámetros para el estudio experimental del concreto autorreparable en la Facultad de ingeniería Ambiental y Civil de la Universidad Antonio Nariño.

### 2.2. ESPECÍFICOS

- Definir cuáles son las bacterias más empleadas en el estudio de la tecnología de concreto autorreparable.
- Determinar los parámetros de cultivo y condiciones del entorno para la supervivencia de las bacterias.
- Identificar los métodos de mezcla más empleados para la formación del concreto autorreparable.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo de la guía sobre el concreto autorreparable, se deben conocer los conceptos asociados a la implementación de esta tecnología con el propósito de comprender los diversos procesos requeridos, y como se ven afectados por factores que pueden influir directamente en la eficiencia de la aplicación de este nuevo material. Para comenzar se definen a continuación dos conceptos importantes a tener en cuenta en el ámbito de investigación sobre el concreto autorreparable.

Como su nombre lo indica este material es autorreparable, este último es la capacidad que posee el material para reparar de manera autónoma las microgrietas que puedan formarse por distintos factores externos. Por otro parte, un sinónimo de este término es la autocuración que según Wiktor y Jonkers (2011) “es la recuperación parcial o total de al menos una propiedad de un material” (p.768), existen dos mecanismos que permiten la autocuración del material estos son la autoreparación autógena y autónoma, que se definen a continuación:

#### 3.1. Autoreparación autógena

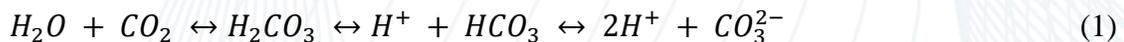
Es una propiedad de autocuración que se encuentra naturalmente en los materiales cementosos, se define como la capacidad de reparar (sellar o rellenar) las grietas y poros del concreto sin la intervención del ser humano (Parraguez Macaya, 2018). Para que ocurra esta autoreparación autógena es necesaria la presencia de agua, además este proceso puede producirse por causas físicas, químicas y mecánicas como se muestra en la figura 1.

**Figura 1.** *Diferentes causas que pueden conducir a la autoreparación autógena.*



*Nota.* Descripción de los desencadenantes físicos, químicos y mecánicos que activan el proceso de reparación autógena. Fuente: Elaboración propia con base en datos Li et al. (2020).

En la figura anterior, de las causas químicas presentadas se debe destacar la número 2, ya que mediante una serie de reacciones químicas se precipita el carbonato de calcio formando cristales que rellenan la superficie de la grieta; este mecanismo se produce cuando el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire se disuelve en el agua (H<sub>2</sub>O), la unión de estos dos forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que a su vez se disocia en un ion de bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y un ion de hidrógeno (H<sup>+</sup>), seguido de esto con una nueva disociación partiendo de la anterior se genera un ion de carbonato CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y dos iones de hidrógeno (ver ecuación 1), lo anterior sugiere que la formación de carbonato o bicarbonato está determinada por la cantidad de iones de hidrógeno que se encuentren en el sistema (Monrroy Rios, 2014).



La reacción anterior permite las siguientes dos reacciones que producen el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) estas se producen con los iones de calcio Ca<sup>2+</sup> contenidos en el cemento, en el primer caso la reacción entre el Ca<sup>2+</sup> con el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (proviene de la ecuación 1) que es un ion muy

reactivo esto lo hace reaccionar fácilmente, para formar un ion de  $\text{CaCO}_3$  y un ion de hidrógeno como se muestra en la siguiente reacción (Parraguez Macaya, 2018):

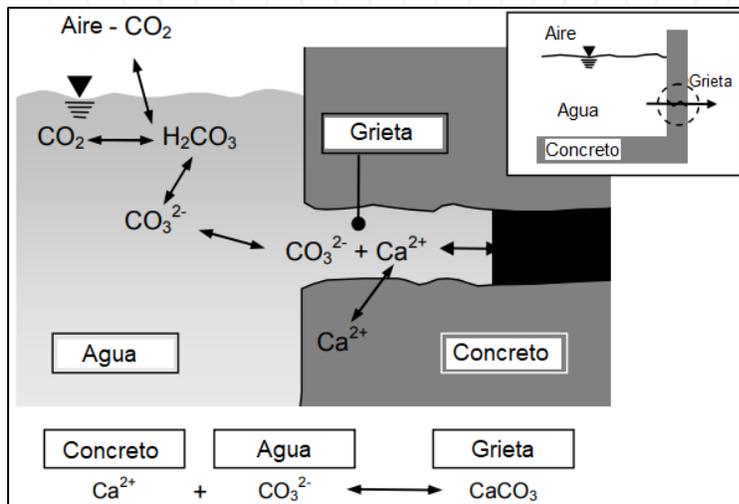


En el segundo caso la reacción que da lugar a la precipitación de carbonato de calcio comienza cuando reacciona un ion de  $\text{CO}_3^{2-}$  (proviene de la ecuación 1), que se encuentra inmerso en las grietas con el  $\text{Ca}^{2+}$  contenido en el cemento, esta unión produce un ion de  $\text{CaCO}_3$  como se muestra a continuación (Parraguez Macaya, 2018):



Este fenómeno se puede apreciar en la siguiente figura:

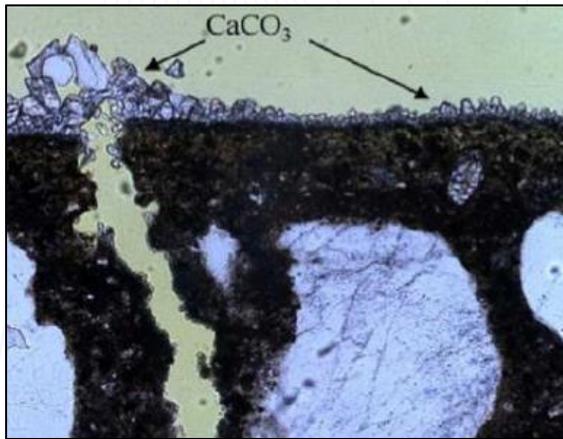
**Figura 2.** Reacciones químicas generadas en las grietas del concreto en presencia de agua.



*Nota.* La figura muestra el fenómeno de precipitación de carbonato de calcio, que ocurre en las grietas del concreto, cuando se encuentran en presencia de agua. Fuente: adaptado de Mihashi y Nishiwaki (2012).

Por otro lado, con la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  se forman cristales que rellenan la parte superior de las microgrietas como se muestra en la figura 3.

**Figura 3.** *Formación de cristales en la superficie de la microgrieta.*



*Nota.* La figura muestra los cristales formados por la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , ubicadas en la parte superior de la microgrieta. Fuente: Parraguez Macaya (2018).

Esta propiedad de autocuración es beneficiosa para el concreto, ya que no debe adicionarse ningún otro compuesto para lograr el sellado de grietas. Sin embargo, presenta dos limitaciones relevantes para la autocuración estas incluyen el ancho de la fisura que puede sellar, la cual debe ser inferior a los 0,2 mm, por otro lado, “solo en condiciones ideales de curado se pueden lograr mejores resultados de reparación, y lleva mucho tiempo” (Li et al., 2020, p.2), por tanto, deberá cumplir con requisitos fisicoquímicos como la temperatura, la humedad y la presencia de iones suplementarios en las soluciones de agua (Li, 2018).

Debido a las limitaciones mencionadas las investigaciones se han enfocado en nuevas tecnologías, que no solo rellenen las grietas sino que incrementen las propiedades mecánicas del concreto. Es así como en los últimos años se han realizado estudios que respaldan el uso de la autoreparación autónoma que emplea agentes curativos, definidos como compuestos que tienen la capacidad de rellenar las grietas. El proceso de autoreparación autónoma se explica a continuación.

### 3.2. Autoreparación autónoma

En este proceso se incorporan a la mezcla del material compuestos (agentes curativos) que tienen la capacidad de rellenar las microgrietas, estos pueden ser aditivos minerales, agentes adhesivos o agentes biológicos. Los primeros pueden ser de tipo expansivo o de cristalización. Los expansivos aumentan su volumen cuando entran en contacto con agua, en cuanto a los de tipo cristalización se componen de sílice y cristales estos reaccionan con los compuestos del material para formar nuevos cristales, esto permite el sellado de las microgrietas. Los agentes adhesivos pueden ser epoxi, silicio, metacrilato de metilo, entre otros, los cuales al ser encapsulados y adicionados a la mezcla una vez endurecida, actúan cuando son interceptados por la fisura formada endureciéndose en las grietas y de esta forma sellándolas (Li, 2018; Parraguez Macaya, 2018).

Por otro parte, los agentes biológicos emplean microorganismos para rellenar la microgrietas en específico bacterias, las cuales por medio de sus procesos metabólicos son capaces de inducir la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A esta capacidad se conoce como precipitación de carbonato de calcio inducida por bacterias (PCIB), y en sus siglas en inglés como BICP, también se encuentra por el término precipitación de  $\text{CaCO}_3$  inducido microbiológicamente (PCIM) en inglés como MICP (Parraguez Macaya, 2018).

La PCIM está influenciada por cuatro factores: (1) concentración de los iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , (2) cantidad de carbono inorgánico disuelto (CID) en inglés se conoce como DIC, (3) pH y (4) abundancia del sitio de nucleación (centro de cristalización) (Fahimizadeh et al., 2020). El primer factor es entregado a la bacteria por el entorno del material, ya que en él están contenidos los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ ; por otro lado, la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  se ve favorecida en ambientes alcalinos (alto pH y aumento de CID) este último se puede generar por medio de las actividades

fisiológicas de las bacterias. Además, el concreto por sí mismo es un alcalinizante que contribuye en el proceso de autoreparación. El cuarto factor es el papel de las bacterias como sitios para la formación de cristales, haciendo referencia a la capacidad de las bacterias para comenzar una separación entre las distintas fases cuando un sistema se encuentra sobresaturado, dando paso a la cristalización (Castanier et al., 1999; Parraguez Macaya, 2018). Por tanto, las distintas concentraciones de  $Ca^{2+}$ , CID, pH del entorno y la pared celular bacteriana cargada negativamente (posibles sitios de formación de cristales), crean el entorno para la precipitación de  $CaCO_3$  (Hammes y Verstraete, 2002; Schultze-Lam et al., 1996).

Tanto la PCIM como la PCIB pueden ocurrir a través de varias vías metabólicas, principalmente se han investigado la hidrólisis enzimática de urea y la conversión metabólica de sales de calcio. Estas vías metabólicas se describen a continuación:

### 3.2.1. Hidrólisis de Urea

El metabolismo microbiano de algunas bacterias produce la enzima ureasa que se encarga de catalizar la hidrólisis de urea como se muestra a continuación:



Cuando la urea ( $(NH_2)_2CO$ ) reacciona con una mol de agua ( $H_2O$ ) forma ácido carbámico ( $NH_2COOH$ ) y una mol de amoníaco ( $NH_3$ ). Por otro lado, si la urea reacciona con dos moles de agua produce dos moles de amonio y una mol de carbonato como se describe en la siguiente reacción:



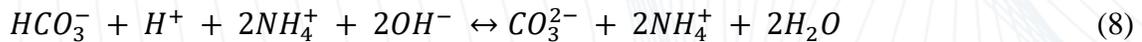
De la ecuación 4 el proceso continúa cuando el ácido carbámico reacciona nuevamente con una mol de agua (ver ecuación 6), para formar una mol de ácido carbónico y dos moles de amoníaco.



La mol de ácido carbónico puede disociarse en un ion de bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y un ion de hidrógeno ( $H^+$ ) como se muestra a continuación:



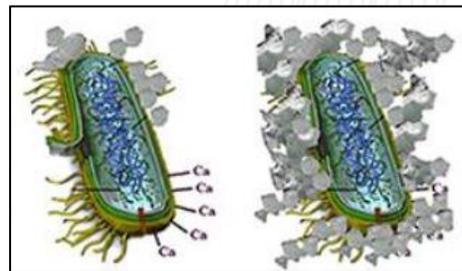
Los distintos productos generados en las ecuaciones 7,6 y 5, reaccionan para formar carbonato, agua y más amoniaco aumentando el pH.



Finalmente, en la pared celular bacteriana cargada negativamente (sitio de nucleación), son atraídos los iones de calcio  $Ca^{2+}$  del entorno circundante (ver ecuación 9) formando un conjunto célula- $Ca^{2+}$ , seguido de esto los iones de carbonato depositados de reacciones anteriores se integran secuencialmente con los iones de  $Ca^{2+}$  asociados a la célula y de esta reacción se precipita el  $CaCO_3$  formando cristales (rellenando las microgrietas), como lo describen las siguientes reacciones (Choi et al., 2021; Li et al., 2020):



La siguiente figura evidencia de manera esquemática como la bacteria forma el conjunto célula- $Ca^{2+}$ , permitiéndole precipitar el  $CaCO_3$  y con esto formar cristales que rodearan la bacteria.



**Figura 4.** Mecanismo de curación autónoma por hidrólisis de urea.

*Nota.* La figura muestra la asociación de los iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , con la pared celular bacteriana, permitiendo la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y la formación de cristales. Fuente: Li et al. (2020).

### 3.2.2. Conversión metabólica de sales de calcio

La autocuración de grietas usando esta vía se lleva a cabo cuando las bacterias permiten la oxidación de sales de calcio orgánico, estas puede ser nitrato de calcio, acetato de calcio o lactato de calcio; este proceso permite la formación de carbonato de calcio en condiciones ideales (Alazhari et al., 2018).

De esta manera, la bacteria utiliza la fuente de calcio como alimento, por ejemplo lactato de calcio y actúa como centro de nucleación para precipitar el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), como se describe en la siguiente reacción (Gonzalez et al., 2018):

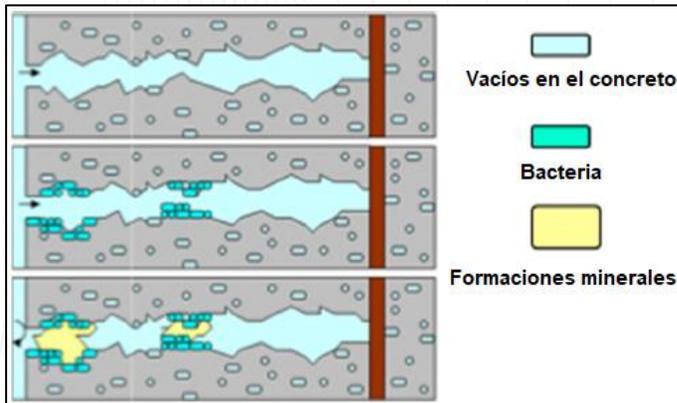


Por otra parte, es posible formar ácido carbónico débil cuando se tiene dióxido de carbono y agua, si esto ocurre es probable que inicie la carbonatación del hidróxido de calcio (ver ecuación 12). Esto conduce a una forma de curación autógena mejorada (Alazhari et al., 2018).



Las reacciones anteriores producen el  $\text{CaCO}_3$  que sellaría las microgrietas gracias a la bacteria quien permite el proceso, como se muestra a continuación:

**Figura 5.** Mecanismo de curación autónoma por conversión metabólica de sales de calcio.



*Nota.* La figura muestra el sellado de grietas por medio de la precipitación realizada por las bacterias. Fuente: adaptado de Gonzalez et al. (2018).

Con el uso de la autoreparación autónoma se han registrado amplitudes de sellado de microgrietas que están en un rango de 0,17 mm hasta 32 mm (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021). Este mecanismo disminuye el costo de mantenimiento y la explotación de recursos, favoreciendo la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Sonali Sri Durga et al., 2020). Por otra parte, las limitaciones que se han presentado se relacionan con la eficiencia del agente curativo a largo plazo.

Esta limitación está relacionada con el tipo de bacteria y sus condiciones de crecimiento que favorecerán el mecanismo de autoreparación o de lo contrario presentará inconvenientes, por esto a continuación se describen los tipos de bacterias empleadas, relacionadas con las dos vías metabólicas mencionadas anteriormente.

### 3.3. Bacterias

Los microorganismos con el material genético distribuido a lo largo del citoplasma, son aquellos que no tienen su núcleo celular separado por una membrana, estos se conocen como procariotas (Parraguez Macaya, 2018). Las bacterias suelen presentar tamaños pequeños, esto

dependerá de la cepa y como se ven influenciadas por las condiciones ambientales como temperatura, nutrientes, entre otras; principalmente su tamaño está determinado genéticamente, los tamaños se encuentran entre 0.5 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud; por otro lado, las bacterias presentan cuatro tipos forma el bacilo en forma de varilla, el coco esférico, el Spirillum en espiral y el Vibrium en forma de coma. Se debe destacar que estos microorganismos se encuentran en casi todas partes, y viven en condiciones extremas donde la supervivencia de cualquier otra especie es casi imposible (Jena et al., 2020; Morejón y Pardo Coba, 2008; Parraguez Macaya, 2018).

En el caso del concreto autorreparable se opta por el uso de bacterias precipitadoras de carbonato de calcio, los estudios realizados sobre el tema sugieren algunos tipos de bacterias, que son idóneas para emplearse en el proceso de autoreparación autónoma se describen a continuación:

- Bacterias ureolíticas: Se caracterizan por producir la enzima ureasa, la cual participa en la hidrólisis de urea que es una de las vías que permite la precipitación del carbonato de calcio (Choi et al., 2021; Fahimizadeh et al., 2020).
- Bacterias alcalofílicas: Son microorganismos que crecen a un pH cercano a 9 o mayor, presentan un crecimiento óptimo a pH de 10, y nulo o bajo crecimiento a pH neutro o cercano a neutro (Machin, s.f.).
- Bacterias anaerobias facultativas: Tienen la capacidad de crecer en un ambiente con oxígeno o sin él (Bush y Vazques-Pertejo, 2019).
- Esporas bacterianas: Son liberadas de la célula madre cuando se aproxima un largo periodo de escasez de nutrientes, esta espora es capaz de permanecer en un estado durmiente, además pueden dispersarse fácilmente por el aire hasta encontrarse en un

medio con los nutrientes necesarios para reiniciar la actividad metabólica y por ende su germinación (Morejón y Pardo Coba, 2008).

El uso de las bacterias como agentes curativos tendrá un efecto positivo a largo plazo en la autoreparación autónoma como en las propiedades del material, si se tienen presentes aspectos como el medio de cultivo y aditivos (empleados como nutrientes para las actividades metabólicas de cada bacteria), el primero debe ser seleccionado con base en el tipo de microorganismo, de manera que se obtenga un crecimiento óptimo y de esta forma obtener los mejores resultados respecto al crecimiento favoreciendo así a una mayor precipitación del carbonato de calcio. Por esto se definen a continuación los cultivos microbianos.

### **3.4. Cultivos microbianos**

Este concepto se puede encontrar en los distintos libros y bases de datos como cultivos microbianos, medios de cultivo y medios de crecimiento. Ahora bien, para poder realizar el aislamiento e identificación de los microorganismos presentes, se lleva a cabo un proceso de siembra y posterior incubación empleando cultivos microbianos artificiales que impulsan el crecimiento de algunos microorganismos. Actualmente se emplean distintos cultivos microbianos pueden ser líquidos o caldos y solidificados con agar (Margareta Mühlhauser y Lina Rivas, 2014).

Los cultivos microbianos así como las variantes del material de construcción que se pueden encontrar en el mercado, influyen el desarrollo de los mecanismos que permiten implementar el material autorreparable, mejorando o disminuyendo la eficiencia de la autoreparación autónoma, los componentes de cada material se describen a continuación.

### 3.5. Tipos de material de construcción

El concreto (hormigón) es una mezcla homogénea compuesta de cemento, áridos gruesos, áridos finos, aire y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones; generalmente el cemento conocido también como cementante o aglomerante, conforma del 10 al 15% del volumen del concreto este cumple la función de llenar los poros del árido dando impermeabilidad cuando el concreto se encuentra en estado seco, mientras que en estado fresco permite la unión entre el agua, aire y él mismo (Luis Díaz, 2016).

Los áridos granulares pueden ser finos o gruesos y se componen de arena y grava; juntos conforman del 60 al 80% del volumen del concreto y permiten dar forma a un tipo de esqueleto que aporta rigidez y estabilidad dimensional una vez se endurece el concreto. En cuanto al agua conforma del 15 al 20% del volumen del concreto. Ésta le da plasticidad al material en estado fresco. El aire, por su parte, representa del 1 al 2% del volumen del concreto (Luis Díaz, 2016).

Respecto a los aditivos pueden ser acelerantes, retardantes de fraguado, repelentes al agua, reductores de permeabilidad, entre otros (Rondón Quintana y Reyes Lizcano, 2016), estos pueden modificar las propiedades del concreto de manera física o química.

Como se mencionó anteriormente, la unión de distintos compuestos forman el concreto cuando existen variaciones en la mezcla se conocen como pasta de cemento (material aglutinador) y mortero de cemento. El primero es la unión del cemento, agua y aire (Rondón Quintana y Reyes Lizcano, 2016) y hace parte de la mezcla principal que resulta en la formación del concreto.

Por otro lado, el mortero de cemento es otro material de construcción que presenta variaciones respecto a los componentes empleados para fabricar el concreto en este caso se compone de cemento, áridos finos, agua, aire y adiciones o aditivos (Alconz Ingala, 2006).

A manera de síntesis de lo mencionado anteriormente, en la siguiente figura se encuentran los materiales definidos y su composición.

**Figura 6.** Diferencias entre concreto, pasta de cemento y mortero de cemento.

CONCRETO VS	PASTA DE CEMENTO VS	MORTERO DE CEMENTO
Mezcla de:	Mezcla de:	Mezcla de:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento</li> <li>• Árido grueso</li> <li>• Árido fino</li> <li>• Con o sin aditivos</li> <li>• Agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento</li> <li>• Agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento</li> <li>• Árido fino</li> <li>• Aditivos</li> <li>• Agua</li> </ul>

*Nota.* La figura muestra los ingredientes usados para cada una de las mezclas que componen el tipo de material. Fuente: Elaboración propia.

Los compuestos adicionados a la mezcla para cada tipo de material son de gran importancia debido a que influyen las propiedades mecánicas de éste, reduciendo o aumentando la durabilidad del mismo, es por esto que los estudios realizados sobre la temática planteada han determinado que el uso de ciertos aditivos mejora la eficiencia de la autoreparación autónoma, y además incrementan las propiedades mecánicas de los materiales.

### 3.6. Aditivos del concreto

La adición de ciertos aditivos en el proceso de reparación de grietas ha demostrado ser beneficioso y necesario en el uso de agentes curativos; éstos son seleccionados con base en la actividad metabólica de las bacterias aplicadas. Los más empleados son la urea, extracto de levadura y derivados del calcio (Schreiberová et al., 2019). A continuación se describen los aditivos con mayor frecuencia de uso en la autoreparación autónoma:

### 3.6.1. Urea

La urea (carbamida) es un compuesto orgánico blanco y cristalino se representa con la fórmula química  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (Redacción, 2021). La presencia de urea según Schreiberová et al., (2019) no afecta negativamente las propiedades de los materiales. Se emplea como compuesto nutricional para las bacterias ureolíticas.

### 3.6.2. Extracto de levadura

El extracto de levadura es de uso bacteriológico y para cultivos microbianos, además permite un alto crecimiento bacteriano (NEOGEN, s.f.). La incorporación de este aditivo tiene un efecto negativo sobre las propiedades mecánicas del material, afectando la resistencia a la tracción y a la compresión (Wang et al., 2014). Se ha informado de su uso en la germinación de esporas y el crecimiento de células (Alazhari et al., 2018).

### 3.6.3. Derivados del calcio

Se presentan diversos aditivos como el lactato de calcio ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$ ), formiato de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ ) y nitrato de calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Éstos se relacionan con el efecto positivo que su adición produce sobre la resistencia a la compresión (Schreiberová et al., 2019). El nitrato de calcio tiene un efecto positivo en el grado de hidratación del material, ya que acelera la hidratación (Wang et al., 2014). Por otro lado, el acetato de calcio presenta un efecto negativo sobre la resistencia a la compresión, y el cloruro de calcio “puede provocar degradación y corrosión del refuerzo” (Schreiberová et al, 2019, p.3).

Tanto los aditivos como los componentes que hacen al material influyen en la eficiencia del proceso de autoreparación autónoma. Otro aspecto importante es el método empleado para

incorporar las bacterias como agentes curativos, que permitirán la precipitación del carbonato de calcio.

### **3.7. Métodos empleados en la implementación del concreto autorreparable**

Existen diversos métodos que permiten la incorporación de bacterias al material, una de ellas es la encapsulación; con ésta se pretende proteger a la bacteria mediante cápsulas, debido al ambiente hostil que presenta el interior del concreto.

#### **3.7.1. Encapsulación**

Este método emplea microcápsulas. Éstas consisten en una estructura con una cara exterior y una cara interior, esta última es un recinto en donde se encapsula el líquido que contiene generalmente un microorganismo en estado vegetativo (WO 2010/142401, 2010).

En el interior se encuentra un núcleo líquido que contiene el microorganismo beneficioso el cual está rodeado por una capa polimérica delgada. Estos polímeros son un grupo de macromoléculas orgánicas, como resultado de la unión de monómeros por medio de enlaces covalentes (Máxima Uriarte, 2021), que comprenden varios reactivos que son capaces de polimerizar en condiciones ácidas, haciendo que la sustancia aumente su peso molecular, pero que no cambie su composición química.

Por otro lado, dentro de la literatura encontrada la eficiencia de la autocuración y la supervivencia de las bacterias pueden ser afectados por el tipo de compuesto con el que se realiza la microcápsula, a continuación se describen algunos de los materiales que se han implementado, y de los cuales se registran resultados óptimos en el sellado de microgrietas.

### **3.7.1.1. Alginato de calcio (CaAlg).**

Para la preparación de microcápsulas usando CaAlg se emplea alginato de sodio, con una composición monomérica de 37% de ácido manurónico (M) y 63% de gulurónico (G) (Fahimizadeh et al., 2020). El uso de este compuesto tiene ventajas en la aplicación de la reparación autónoma, mejorando la integridad estructural del hormigón y reduciendo la posibilidad de degradación por la entrada de corrosivos, además la microcápsula de CaAlg puede mantener activos, protegidos y retenidos los agentes biológicos (son las bacterias que se encuentran contenidas en la microcápsula), hasta por 56 días de incubación en seco y húmedo (Fahimizadeh et al., 2020).

### **3.7.1.2. Melamina.**

Se compone de tres moléculas de urea dando forma a un heterociclo aromático y puede ser un reactivo junto a el formaldehído, en la reacción que genera como producto la resina melamina-formaldehído (QUIMICA.ES, s.f.). Las microcápsulas que implementan melamina son resistentes al alto pH del hormigón, y sensibles a la humedad; esto quiere decir que las cápsulas pueden resistir el proceso de mezcla y se rompen fácilmente cuando aparecen grietas (Wang et al., 2014).

### **3.7.1.3. Microcápsula de doble pared.**

Se han implementado cápsulas de doble pared esto les permite sobrevivir en ambientes extremos para cumplir con estas condiciones se utilizan varios compuestos; uno de ellos es la urea puede emplearse para la elaboración de la capa superficial o exterior, y formaldehído para la capa interior. El desarrollo de estas microcápsulas proporciona una mayor durabilidad a altas temperaturas, en comparación con las cápsulas de pared simple y además, conservan la unión interfacial adecuada de las mismas (Mostavi et al., 2015).

Por otra parte, los agentes curativos de base biológica pueden adicionarse directamente a la mezcla del material por medio del método directo.

### **3.7.2. Método directo**

Cuando las bacterias se agregan directamente en forma de esporas o en forma líquida, con una fuente de calcio (puede ser lactato de calcio, acetato de calcio, entre otros) en la mezcla de concreto, se denomina método directo (Yatish Reddy et al., 2020). En este método las bacterias se encuentran en un estado inactivo (esporuladas), se activan con el ingreso de agua debido a las grietas formadas (Luo et al., 2015).

### **3.7.3. Otros métodos**

Para proteger al agente curativo de base biológica junto a los aditivos en el proceso de mezcla del material, se han implementado métodos que implican la impregnación de uno o más compuestos con la solución del agente curativo, este último queda cubierto por el compuesto como un tipo de encapsulado para luego ser incorporado en la mezcla. Se registran compuestos como la arcilla expandida, perlita expandida, agregado de peso ligero empleados para la impregnación (Gonzalez et al., 2018; González et al., 2020; Wiktor y Jonkers, 2011; Zhang et al., 2017).

Existe otro método no muy conocido, este es la inyección directamente en la grieta formada con la suspensión celular de la bacteria seleccionada junto a los aditivos, este proceso se realiza cada doce horas durante tres días mientras la muestra del material es incubada a 30 °C. Son pocos los estudios que emplean este método como se muestra en la sección 7.5 (Choi et al., 2021). Cabe resaltar que los cuatro métodos mencionados requieren de agua para que inicie la

autoreparación autónoma, o encontrarse en ambientes húmedos, sin ésta el proceso no ocurre (Gonzalez et al., 2018).

Por otra parte, tanto los métodos de incorporación de las bacterias como la amplitud de las microgrietas selladas, son medidas usadas para verificar la eficiencia de la autocuración autónoma en el material y con esto estimar su aplicabilidad en el futuro. Las mediciones se realizan con diversas técnicas que evidencian la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  en las grietas, para esto se usa microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX), con estas se identifica la morfología del cristal formado en la microgrieta. Existen otras mediciones que se enfocan en verificar el impacto negativo de los aditivos, bacterias y método de incorporación en las propiedades mecánicas del material, para esto se realizan pruebas de resistencia a la compresión, tracción y flexión antes y después de la autoreparación autónoma.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años el concreto autorreparable ha sido un tema de investigación de gran interés, provocando un incremento en los estudios que emplean bacterias con la capacidad de inducir la precipitación de carbonato de calcio, ya que el tipo de bacteria favorece la eficiencia de los sistemas de autoreparación autónoma. Como es el caso de la bacteria *Bacillus subtilis* (tiene la capacidad de producir la enzima ureasa que cataliza la reacción para la ruptura de la urea o hidrólisis de urea) ha demostrado ser beneficiosa para las propiedades mecánicas del concreto, como sugieren Sonali Sri Durga et al. (2020) al incorporar  $10^8$  células/ml de agua a la mezcla de concreto que es adicionado en moldes con diversas formas y tamaños (sin aditivos) para evaluar la tasa de autocuración, se comprueba el aumento en la resistencia a la flexión, a la tracción dividida y a la compresión en 11%, 16% y 22% respectivamente, se atribuyó a la formación de cristales de calcita empleados como material de relleno en las fisuras del concreto, además se encontró una capa superficial compuesta de la cepa bacteriana demostrando así, después de 28 días la capacidad de la bacteria para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, y no ocasiona daño alguno durante el proceso de mezcla y endurecimiento del material.

Por otra parte, el uso de la bacteria *Bacillus pseudofirmus* predomina en variados estudios, debido a que incrementa las propiedades mecánicas del material una vez se realiza la autocuración autónoma como lo describen Lu et al. (2019) al realizar tres muestras de mortero de cemento, la primera con la incorporación por método directo de  $10^9$  UFC/ml de bacterias, la segunda con agregados ligeros y la tercera con bacterias en la misma concentración ya descrita, junto a la adición de una solución de urea y lactato de calcio. Las muestras se adicionaron en moldes cilíndricos se mantuvieron en un sistema de humidificación por 28 días, los ensayos de resistencia a la tracción por división demuestran una recuperación de 112% de la propiedad

mecánica después ser curada (bañada en agua durante 28 días). Para esta bacteria se han registrado amplitudes de sellado de las microgrietas de 0,3 mm (Gonzalez et al., 2018).

Con lo descrito anteriormente se puede decir que, el tipo de bacteria empleada en la autoreparación autónoma, tendrá un impacto positivo o negativo en dos aspectos, el primero las propiedades mecánicas, el segundo la eficiencia del sellado de microgrietas lo cual está relacionado con el tipo de vía metabólica que emplee la bacteria; el primer aspecto es de gran importancia, ya que si las bacterias pueden curar las microgrietas, no tiene relevancia práctica si las propiedades mecánicas del concreto se ven deterioradas (Schreiberová et al., 2019).

Existen diversos factores que afectan el sellado de las microgrietas en el concreto; se deben evaluar las diferentes características que tienen incidencia en la precipitación de carbonato de calcio, uno de estos factores es la adición de agentes curativos (en donde se encuentran las bacterias), ya que estos mejoran la capacidad de autocurado. Como lo demuestra el siguiente estudio en donde se realizan grietas de diferentes tamaños en la pasta de cemento y concreto, son sumergidas en agua de grifo en un envase plástico, el cual estuvo expuesto a la atmosfera en todo el periodo de autoreparación, haciendo que el oxígeno se incorpore de manera constante al agua. El efecto de la autocuración se mide por medio de la incubación con inmersión en agua, esto define el tamaño de las grietas selladas, los autores encontraron que las grietas entre más anchas son más difíciles de autoreparar, además logran determinar una limitación del agente curativo, consiste en su capacidad de sellado esta no es eficiente en grietas de tamaños superiores a 0,8 mm (Luo et al., 2015).

Cada vez son mayores los estudios que presentan la autoreparación autónoma para sellar grietas por medio de bacterias en conjunto con nuevos materiales, como el caso del estudio en donde se evaluó la autocuración de grietas agregando fibra de coco con distintos aditivos, como

cloruro de calcio y urea. Para que ocurriera la autoreparación en el hormigón se almacenaron en agua las muestras con dos diferentes especímenes bacterianos, uno de ellos contiene el hormigón con fibra de coco y el otro contiene las fibras de coco con las bacterias (*Bacillus megaterium*), éstas se curaron (sumergidas en agua) en un medio que contenía los aditivos mencionados anteriormente, se logra definir que las bacterias con capacidad ureolítica están precipitando el carbonato de calcio. Las fibras de coco disminuyeron la resistencia a la compresión y además se redujo la porosidad del concreto, está permite que no se infiltren sustancias corrosivas al material y tenga una mayor durabilidad. Se comprueba que las fibras no afectan significativamente la resistencia a la flexión, ya que las bacterias son las encargadas de que mejore está propiedad mecánica (Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019).

## 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia no hay un gran número de estudios que aborden el tema de materiales autorreparables. En el idioma inglés se encuentra casi toda la información sobre el tema, además este nuevo material se ha implementado en países europeos con escenarios ambientales variados pero no en países de Latinoamérica, por esto existen grandes incógnitas sobre su implementación en esta parte del mundo. Teniendo en cuenta lo descrito se plantea la siguiente pregunta:

- ¿Cómo plantear las bases teóricas para el estudio experimental del concreto autorreparable en la facultad de ingeniería Ambiental y Civil de la Universidad Antonio Nariño?

### 5.1. Justificación

En los últimos años las investigaciones se han enfocado en la lucha contra la contaminación ambiental en todas sus formas, por esto se han creado diversas soluciones para mitigar el impacto ambiental de las distintas actividades industriales, una problemática a destacar en la actualidad son las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que afectan gravemente la atmósfera, una de las causas es la producción en masa de materiales cementosos como el concreto, afortunadamente existen nuevas alternativas como el concreto autorreparable, que disminuyen las emisiones de  $\text{CO}_2$ , la mano de obra, y el consumo excesivo de recursos naturales. Este material es una innovación con bastante impacto, ya que consiste en el sellado de las microgrietas por medio de la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) inducida por bacterias. Esta precipitación forma cristales de  $\text{CaCO}_3$  que rellenan los poros, y de esta forma van sellando las microgrietas. Se cuenta con una gran cantidad de estudios que hablan del tema mencionado, a pesar de esto son pocos los estudios en español que cumplan la función de guía a

tener en cuenta para la implementación e investigación de este nuevo material, impidiendo que Universidades y empresas conozcan el funcionamiento de esta tecnología y sus beneficios. Por esta razón se propone diseñar un documento con las bases teóricas para el estudio experimental del concreto autorreparable, como guía para la Universidad Antonio Nariño e instituciones que deseen fabricar este tipo de biomaterial.

Esta propuesta es pionera en la Universidad Antonio Nariño y pretende aumentar el desarrollo por la investigación sobre biomateriales y sobre todo el concreto autorreparable, fomentando la creación de iniciativas y metodologías para los estudiantes que estén interesados en esta línea de investigación.

## 6. DESCRIPCIÓN DE LA FORMA COMO SE RESUELVE EL PROBLEMA

Para responder a la pregunta planteada, se propone realizar un documento con las bases teóricas sobre el concreto autorreparable que aborden los conceptos importantes y necesarios para su implementación; para lograrlo se da inicio con el desarrollo de una metodología (ver sección 6.1), la cual tiene el propósito de identificar la información que puede ayudar a solventar la pregunta planteada. Seguido de esto en la sección 7 (resultados y discusión), se exponen las ventajas, desventajas y factores a tener en cuenta en la autocuración autónoma; estas dos secciones pretenden darle una solución al problema establecido para el desarrollo del trabajo. A continuación se muestran los pasos para dar solución al problema planteado.

### 6.1. Metodología

Para el desarrollo de la base teórica, se partió de una revisión bibliográfica con las bases de datos conocidas tales como Scopus. Para esto se plantearon ecuaciones de búsqueda usando operadores booleanos (ver tabla 1), que permitieron revisar la literatura disponible y relacionada con el tema de interés, de esta forma se realiza la clasificación correspondiente enfocada a cada temática expuesta en el documento. Asimismo, se hizo la depuración de artículos no relevantes, descartando información que no se encontró necesaria para el planteamiento de las bases de investigación. Lo anterior definió los siguientes ítems a tener en cuenta: las bacterias más empleadas en los diversos estudios, los parámetros de cultivo y los métodos de incorporación del agente curativo a la mezcla de concreto.

**Tabla 1.** Operadores Booleanos

Nombre del operador	Descripción
---------------------	-------------

AND	Se utiliza para incluir las palabras claves que estarán en la búsqueda y solo mostrará los resultados que contengan estos términos.
OR	Permite agregar los sinónimos de las palabras claves ya empleadas en la búsqueda.
AND NOT	Con este se excluyen términos específicos, los cuales no se requieren en la búsqueda.

*Nota.* Elaboración propia con base en datos de Scopus (2021).

Empleando operadores booleanos y las opciones que brinda Scopus se establece la ecuación para artículos de acceso abierto, usando palabras en inglés con esta búsqueda se obtienen seis resultados, la ecuación empleada se presenta a continuación:

ALL ( ( ( bacteria OR microorganisms ) ANDNOT ( fungiconcrete OR hydrogel ) AND ( concrete OR pavement ) AND ( selfhealing OR microsealing ) AND ( sealingcracks OR filling ) AND ( precipitation AND of AND calcium AND carbonate OR calcium AND carbonate AND formation ) AND ( biological AND methods OR biotechnology ) ) AND ( LIMIT-TO ( OA , "all" )

### 6.1.1. Búsqueda general de artículos

Se da inicio con la lectura de algunos artículos sobre el tema en general del concreto autorreparable seleccionados de los resultados de la primera ecuación de búsqueda, por consiguiente se obtiene el conocimiento básico para realizar una selección de palabras claves en función de aspectos que se consideraron importantes para construir las ecuaciones de búsqueda.

En la siguiente tabla se muestran las palabras claves identificadas:

**Tabla 2.** *Términos claves empleados para realizar las ecuaciones de búsqueda*

Palabras claves	
Repairing concrete cracks	Microcracking

Carbonate Precipitation	Concrete self healing
Material regenerates itself	Bio sealant properties
Repairing inner cracks	Eco friendly
Autogenous healing	Repair of concrete cracks
Autonomous healing	Cement

*Nota.* Elaboración propia.

Usando las palabras anteriores y los filtros de Scopus para una búsqueda en títulos, resúmenes y palabras clave se desarrolla la siguiente ecuación y con esta se obtienen cuatro resultados:

TITLE-ABS-KEY-AUTH ( ( ( bacteria ) AND ( "concrete self healing" ) AND NOT ( fungi-concrete OR biomass OR antibiotic ) AND ( bacillus ) ) ) AND ( LIMIT-TO ( OA , "all" ) )

### 6.1.2. Refinación de la búsqueda

Con los resultados obtenidos se identificaron aún más palabras, haciendo que la ecuación de búsqueda fuera ajustada y se empezaron a usar palabras de exclusión (ver tabla 3), las cuales agrupan los términos que no se quieren incluir en la nueva búsqueda.

**Tabla 3.** *Términos de exclusión empleados para realizar las ecuaciones de búsqueda*

Palabras de exclusión	
Biomass	Removal
Biogas	Anammox
Antibiotic	Microbial reductive dehalogenation
Virus	Bioremediation
Biodegradable	Fungi concrete

Genes	Flue gases
-------	------------

*Nota.* Elaboración propia.

Usando palabras claves y de exclusión se estableció la siguiente ecuación:

TITLE-ABS-KEY-AUTH ( ( ( bacteria ) AND ( "repairing concrete cracks" ) AND NOT ( fungi-concrete OR biomass OR antibiotic ) AND ( virus OR genes ) ) )

La anterior ecuación tuvo como resultados 16 artículos, se logró identificar que el uso de palabras de exclusión obtenía mayores resultados.

### 6.1.3. Generación de una nueva ecuación

Se generó una nueva búsqueda más refinada y con mayores resultados. Con esto se seleccionaron nuevos artículos, con la lectura de estos se establecen nuevas palabras claves y de exclusión, adecuando la ecuación de búsqueda enfocada en las características de las bacterias y los métodos de incorporación de los agentes a la mezcla.

Se identifican algunos de los métodos de incorporación de los agentes curativos (bacterias y aditivos), esto permitió establecer la siguiente ecuación:

TITLE-ABS-KEY-AUTH ( ( ( bacteria ) AND ( microcracking ) AND NOT ( fungi-concrete OR biomass OR antibiotic ) AND ( encapsulation OR encapsulated ) ) )

De esta manera se obtuvieron 59 resultados, esto demostró que el uso de ecuaciones cortas y enfocadas en características específicas como los métodos, obtienen una mayor cantidad de resultados.

### 6.1.4. Revisión de la bibliografía de los artículos

Con los resultados obtenidos de la nueva ecuación, se seleccionan algunos artículos los cuales cuentan con información específica relacionada con las características o ítems establecidos

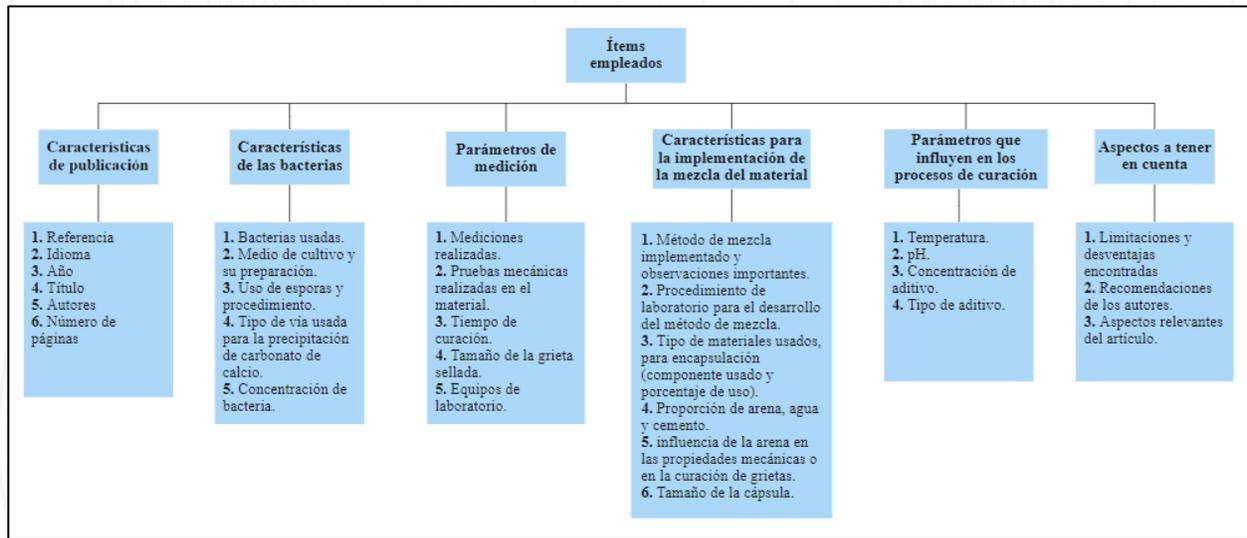
anteriormente en los títulos 6.1 y 6.1.3, se realizó la lectura de 21 estudios y con esto se logró identificar de manera detallada la información permitiendo establecer nuevos ítems.

Para obtener más información para los nuevos ítems se prosiguió con la lectura de artículos y de manera alterna se revisó la bibliografía de los mismos, ya que estos incluyen más estudios relacionados con el tema de interés encontrando así 16 artículos. La revisión realizada permitió clasificar los estudios como útiles para la redacción del documento.

#### **6.1.5. Creación de la base de datos**

Se elaboró una planilla en Excel compartida por medio de drive, en la cual se incluyen los artículos seleccionados en las búsquedas, y se establecen características a tener en cuenta para la construcción de la estructura del documento, de manera que se clasifique la información de una forma relevante y no relevante, permitiendo el fácil acceso a la investigación recolectada, mejorando el rendimiento y dando claridad sobre la información que se quería plasmar en el documento. Se establecen características a tener en cuenta para el desarrollo del trabajo, luego se agrupan con base en las relaciones que existen entre ellos como se muestra a continuación:

**Figura 7.** Ítems establecidos para agrupar la información encontrada en los artículos revisados.



*Nota.* En la figura se observa la clasificación realizada de la información encontrada en diversos artículos leídos. Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.6. Clasificación de la información

Se continuó con la lectura de artículos para identificar aún más datos relevantes a tener en cuenta en la redacción del documento, mientras más artículos se incorporaban a la base de datos, más factores que afectan las propiedades mecánicas del material y el proceso de autoreparación autónoma fueron identificados, de esta forma se agrupa el contenido por su similitud. Esto permitió establecer relaciones entre los distintos estudios y con esto comprender las razones del porqué se ve afectado el material.

Con cada artículo leído se completaban las filas y columnas de la plantilla creada. De este procedimiento se encontraron relaciones entre las concentraciones celulares, con la afectación a las propiedades mecánicas y la precipitación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). También se tuvieron en cuenta las afectaciones al material y a la autoreparación, a causa de los diferentes métodos de incorporación a la mezcla de los agentes curativos de base biológica. Además, se fueron agrupando las limitaciones y recomendaciones dadas en cada uno de los artículos.

### **6.1.7. Desarrollo del documento**

Se realizó un análisis de los datos contenidos en la plantilla ya mencionada, estableciendo las ideas importantes y conceptos a incluir en el documento, de esta forma y usando los ítems establecidos en la figura 7, se seleccionan los conceptos necesarios para el desarrollo del marco conceptual. Por consiguiente se identificaron los títulos que conformaran los resultados y discusión. Para esto se evidenciaron la cantidad de datos recolectados y las relaciones establecidas, con la identificación de estos aspectos se plantean títulos como la influencia de la concentración bacteriana sobre el concreto y la autocuración, las bacterias empleadas en el concreto autorreparable, los métodos para la incorporación de los agentes curativos, la influencia de la arena en el proceso de autocuración, la importancia de las proporciones agua a cemento en el material, entre otras. La información analizada se presenta empleando una variedad de tablas y gráficas, mostrando la información de manera ordenada y coherente.

Finalmente, para los últimos títulos como conclusiones y recomendaciones, se emplearon las sugerencias dadas por los autores, y con el título resultados y discusión se establecieron las conclusiones. Otros títulos como introducción, planteamiento del problema, y justificación, fueron redactados a medida que se escribían los resultados y discusión.

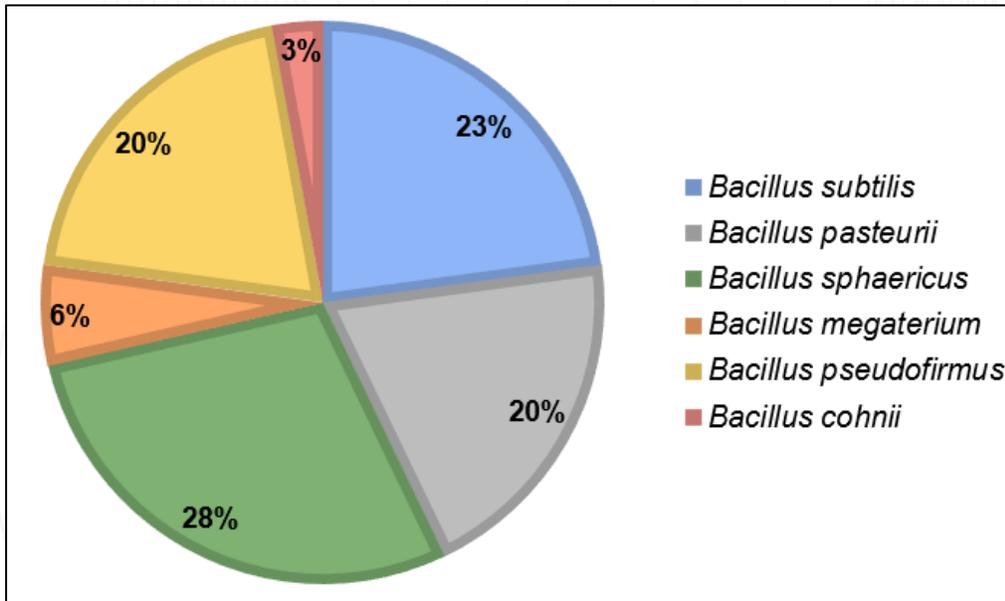
## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la actualidad los estudios sobre la implementación del concreto autorreparable, sugieren que existen variables a considerar para la aplicación práctica de este nuevo material como las concentraciones celulares de la bacteria seleccionada, los aditivos añadidos a la mezcla del material, los métodos de incorporación de los agentes curativos, la influencia de la composición de los cultivos microbianos, el pH y la temperatura en el crecimiento de las bacterias y el efecto del uso de arena en el proceso de autocuración. Estos aspectos afectan tanto las propiedades mecánicas del material como la eficiencia de la autoreparación autónoma, a continuación se presentan cada una de las variables mencionadas.

### 7.1. Bacterias empleadas en el concreto autorreparable

Las investigaciones realizadas que implementan agentes curativos de base biológica para el sellado de microgrietas, demuestran que las bacterias del género *Bacillus* son las más eficientes en la autoreparación, debido a su capacidad para precipitar el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) usando alguna de las vías metabólicas descritas en la sección 3.2. En la figura 8 se presentan las bacterias que fueron empleadas en 35 artículos y se muestra en porcentaje cuáles son los tipos de bacteria que se adicionaron con mayor frecuencia.

**Figura 8.** Porcentaje de uso de las bacterias en los artículos encontrados.



*Nota.* La figura presenta las bacterias que son mayormente empleadas en el concreto autorreparable de la revisión de 35 artículos. Fuente: Elaboración propia.

Con la información anterior se puede decir que las bacterias *B.pseudofirmus*, *B. pasteurii* (*Sporosarcina pasteurii*), *B. subtilis* y *B. sphaericus* son empleadas siete, siete, ocho y diez veces respectivamente en los artículos investigados sobre la autoreparación autónoma.

Por otro lado, de los 35 artículos mencionados 5 de ellos emplean otros tipos de bacterias. Algunos del género *Bacillus* solo se encuentran una vez y no se repiten de los artículos revisados en la base de datos como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.** Bacterias empleadas en menor frecuencia de los artículos revisados

Bacteria	Referencia
<i>Bacillus methylotrophicus</i>	(Basha et al., 2018)
<i>Bacillus licheniformis</i>	(Basha et al., 2018)
<i>Brevibacillus sp.</i>	(Basha et al., 2018)
<i>Estenotrofomona maltofila</i>	(Basha et al., 2018)

<i>Paenibacillus dendritiformis</i>	(Basha et al., 2018)
<i>Rhodococcus erythreus</i> (S26)	(Choi et al., 2021)
<i>Bacillus halodurans</i>	(Jena et al., 2020)
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	(Wiktor y Jonkers, 2011)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	(Mondal y Ghosh, 2021)

Nota. Elaboración propia.

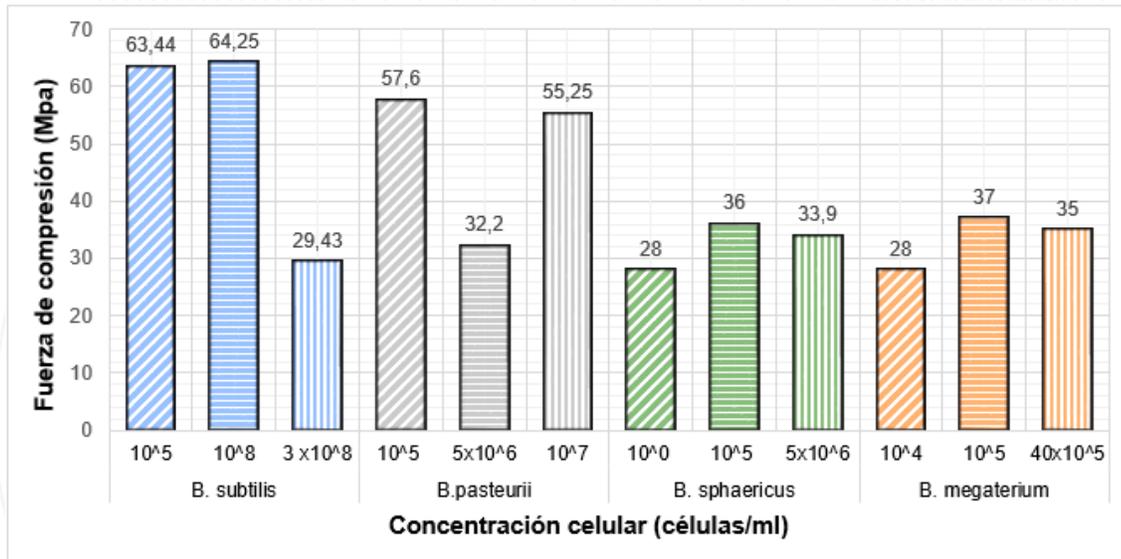
## 7.2. Influencia de la concentración bacteriana sobre el concreto y la autocuración

La concentración de bacterias adicionadas a la mezcla del material puede afectar las propiedades mecánicas del mismo, de manera positiva (incrementando) o negativa (disminuyendo) (Rong et al., 2020); para evidenciar este fenómeno se seleccionaron cuatro de las bacterias de la figura 8: *B. subtilis*, *B. pasteurii*, *B. megaterium* y *B. sphaericus* se realizaron dos gráficas que permitieron evidenciar el efecto de la variación en la concentración (células/ ml), sobre dos propiedades mecánicas: resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

### 7.2.1. Afectación de la resistencia a la compresión

Las concentraciones presentadas en las siguientes figuras se recopilaron de varios artículos, por tanto se observa una variación en el número de estas dependiendo del tipo de bacteria usada, de esta forma se muestra una figura con tres concentraciones y otra con dos. Esto se debe a la disponibilidad de información contenida en cada uno de los estudios revisados, ya que como se demostró en la figura 8 se cuenta con una gran número de artículos que emplean las cuatro bacterias, sin embargo no todas presentan una relación entre la concentración y el impacto a las propiedades mecánicas del material.

**Figura 9.** Influencia de la concentración bacteriana sobre la fuerza de compresión.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Bayati y Saadabadi, 2021; Osman et al., 2021; Rong et al., 2020; Sonali Sri Durga et al., 2020; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020).

La figura 9 presenta tres concentraciones por bacteria y como estas influyen en el incremento de la resistencia a la compresión del material, para entender esta relación se debe recordar que el agente curativo de base biológica se compone de bacterias (células o esporas bacterianas) y aditivos (para la germinación y precipitación), de manera que ambos son necesarios para que ocurra la autoreparación autónoma. Una disminución o insuficiente concentración de aditivo para las bacterias causará una disminución en la precipitación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), ya que tanto la urea como las fuentes de calcio son necesarias en las reacciones descritas en la sección 3.2.

Ahora bien, con la precipitación llevada a cabo por las bacterias la calcita (cristal de CaCO<sub>3</sub>) formada, se asienta como material de relleno en la parte interna de las microgrietas llenando los poros y densificando la mezcla del material. Esto se relaciona con lo sugerido en

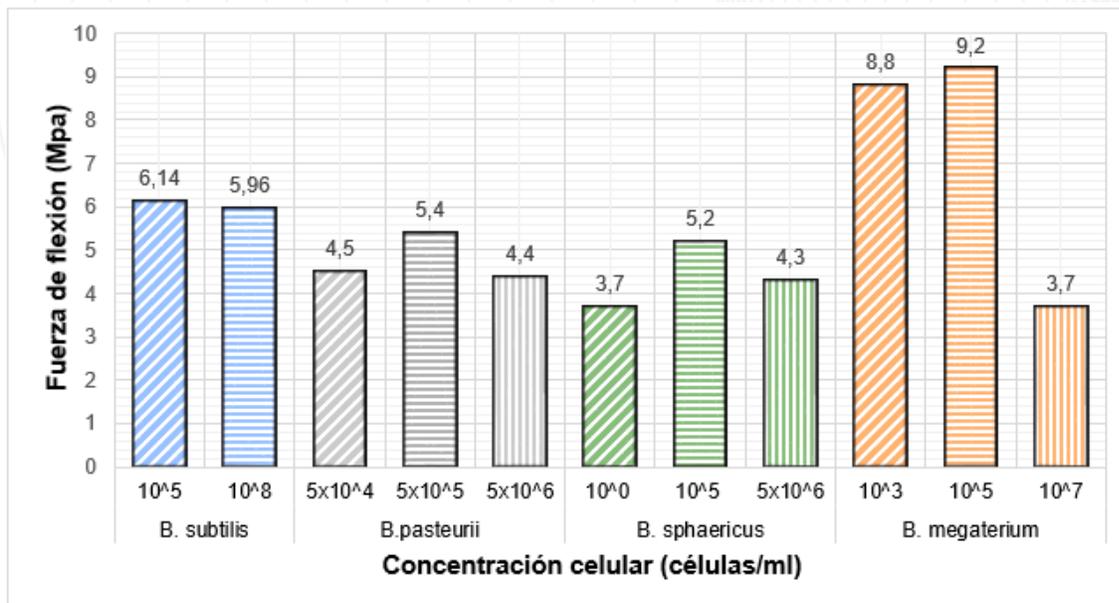
algunos estudios que han demostrado que el carbonato de calcio es el material de relleno más adecuado para el concreto, debido a su compatibilidad con las composiciones cementosas (Basha et al., 2018; Bayati y Saadabadi, 2021; Sonali Sri Durga et al., 2020). De esta forma, los agentes curativos (bacterias más aditivos) disminuirán el tamaño de los poros del material como lo demostró Lu et al. (2019) en su estudio, en el cual la medida inicial del poro fue de  $0,1 \mu\text{m}$  y después de la autoreparación autónoma pasa a ser  $0,05 \mu\text{m}$  permitiendo así mejorar la resistencia del concreto. Esto demuestra como ocurre el incremento de la resistencia debido al trabajo de las bacterias en conjunto con los aditivos.

En la figura 9 se observa una disminución de la resistencia (fuerza) a medida que la concentración aumenta. Algunos autores como Basha et al. (2018) sugieren que un pequeño incremento de la concentración celular, provocará una disminución en el incremento de la resistencia; por lo tanto, se puede inferir que existe un exceso de células que agotan los aditivos adicionados y de esta forma la formación de carbonato de calcio disminuye y asimismo aumenta la resistencia (Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020). Cabe resaltar que, la bacteria *B. subtilis* en la concentración de  $10^8$  células/ml presento un incremento en la resistencia significativamente mayor comparado con  $10^5$  células/ml. La razón que explica esta pequeña variación está relacionada con las mediciones de fuerza tomadas en dos periodos de tiempo diferentes. Las muestras que emplearon  $10^8$  células/ml en el estudio de Sonali Sri Durga et al. (2020) se midieron a los 28 días, mientras que las muestras con la adición de  $10^5$  células/ml del estudio de Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi (2020) fueron medidas a los 90 días, con el aumento del tiempo los incrementos en la resistencia a la compresión disminuyen.

### 7.2.2. Afectación de la resistencia a la flexión

En la siguiente figura se muestran resultados para diferentes concentraciones de las bacterias *B. subtilis*, *B. pasteurii*, *B. sphaericus* y *B. megaterium*. Esta información se obtiene de diversos estudios, en donde el aumento a la resistencia a la flexión es causada por la concentración bacteriana agregada.

**Figura 10.** Influencia de la concentración bacteriana sobre la fuerza de flexión.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Bayati y Saadabadi, 2021; Osman et al., 2021; Sonali Sri Durga et al., 2020; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020; Yatish Reddy et al., 2020).

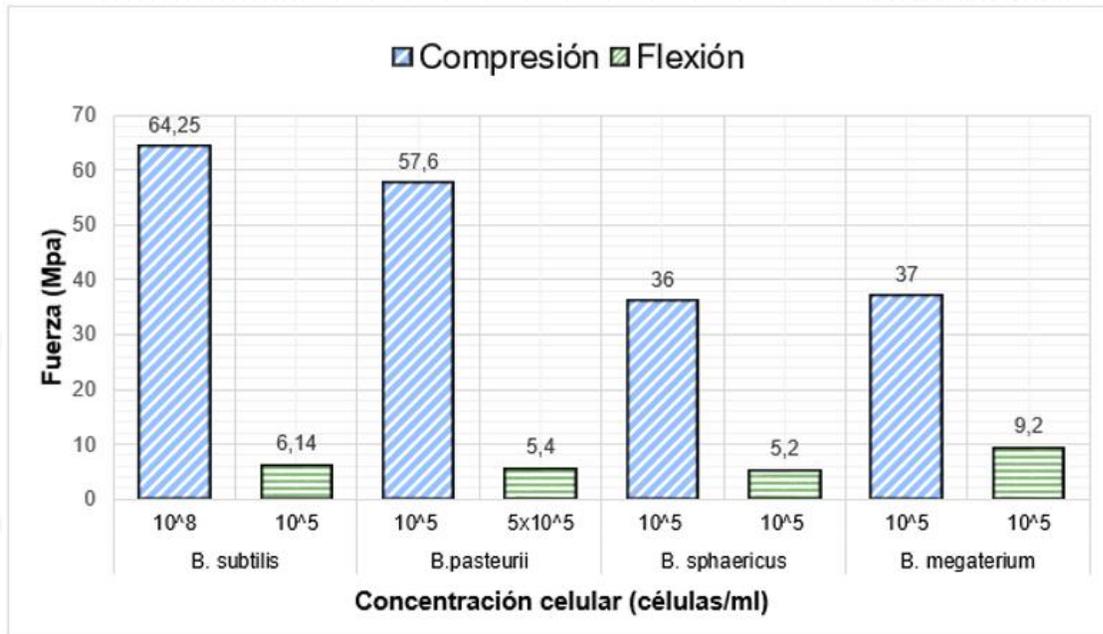
En la figura 10 se cuentan con variadas concentraciones de cada bacteria que incrementan la resistencia a la flexión, se debe destacar la concentración de  $10^0$  células/ml de la bacteria *B. sphaericus*, ya que no cuenta con células bacterianas significativas para que se lleve a cabo la autoreparación autónoma. En este caso, el incremento se debe a la autoreparación autógena como sugieren Gonzalez et al. (2018) al evidenciar una amplitud de sellado de grieta de 0,15 mm, en

muestras sin bacterias debido al efecto de la autoreparación autógena a diferencia de las muestras con bacterias que sellaron grietas de 0,3 mm. Además, se sabe que las grietas menores de 0,2 mm se sellan por sí mismas (Jena et al., 2020).

Por otro lado, las cuatro bacterias empleadas en la figura tienen la capacidad de producir la enzima ureasa y con esto, podrán hidrolizar urea (ruptura de la urea) generando los precipitados de  $\text{CaCO}_3$  (cristales) (De Muynck et al., 2008; Espitia-Nery et al., 2019; Osman et al., 2021). Los incrementos en la resistencia son el resultado de la alineación de las bacterias incorporadas con los cristales formados, creando una capa que actúa como material de relleno (taponando los poros) en el concreto (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021). Asimismo, con un incremento en la resistencia a la flexión, la impermeabilidad del concreto aumenta (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021), junto a la absorción de agua (Sonali Sri Durga et al., 2020) y habrá una reducción en la penetración de cloruros. Esto último favorece la corrosión en los materiales con refuerzos de acero, debido a que los iones de cloruro reaccionan con el acero destruyéndolo por dentro y creando un vacío, generando grandes fallas en las infraestructuras (Jena et al., 2020).

Teniendo en cuenta las figuras 9 y 10 y lo mencionado anteriormente, las concentraciones bacterianas que presentan los incrementos más altos en la resistencia a la compresión y flexión, de cada una de las bacterias se muestran a continuación en la figura 11:

**Figura 11. Mayores incrementos de las fuerzas de compresión y flexión.**



Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Osman et al., 2021; Sonali Sri Durga et al., 2020; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020; Yatish Reddy et al., 2020).

De la figura anterior se destaca la concentración de 10<sup>5</sup> células/ ml, por ser la que permite obtener los mayores incrementos en las resistencias. Ésto también fue comprobado en diversos estudios Bayati y Saadabadi, (2021) sugieren que una alta concentración celular no se relaciona con un aumento en la resistencia. Además comparando con otros estudios se determina que la concentración bacteriana óptima es 10<sup>5</sup> células/ ml, con la cual se obtendrá una alta eficiencia en la autoreparación e incrementos en las resistencias (Osman et al., 2021; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020).

### 7.2.3. Resultados del uso de bacterias en las propiedades del material

*B. subtilis* es considerada como la bacteria más apropiada para mejorar la resistencia a la compresión, como lo afirman Basha et al. (2018) debido a que la bacteria es capaz de producir

rápidamente cristales con una unión fuerte entre los mismos. Ésto se comprobó en el presente trabajo con los ocho artículos revisados (Espitia-Nery et al., 2019; Sonali Sri Durga et al., 2020; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020; Yatish Reddy et al., 2020). Además, con el uso de *B. subtilis* se obtienen los valores más bajos en pruebas de impermeabilidad al agua y permeabilidad al cloruro (Basha et al., 2018; Mondal y Ghosh, 2021; Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020).

Asimismo, el uso de *B. pasteurii* según Jena et al. (2020) ha demostrado que a una concentración de  $10^5$  células/ ml presenta una resistencia óptima a la penetración de cloruros. Además, otros estudios demuestran que el uso de la bacteria reduce la porosidad y permeabilidad del concreto (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021). En cuanto a la bacteria *B. sphaericus* además de incrementar las resistencias a la flexión y compresión, también registra incrementos en la resistencia a la tracción en un 18,35% (Jena et al., 2020).

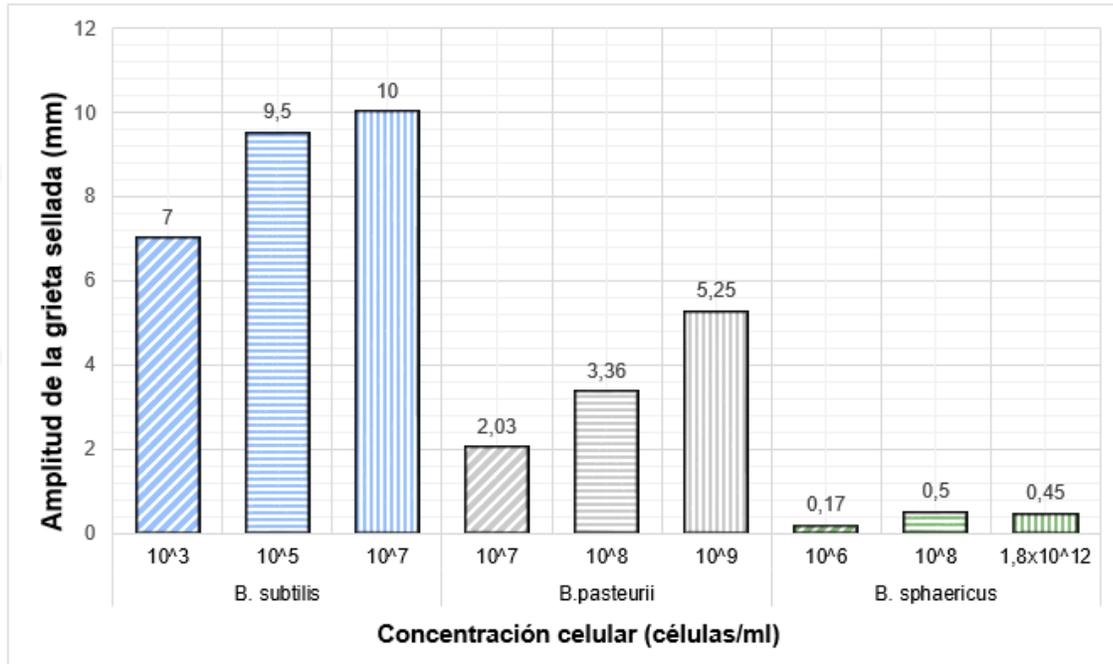
Finalmente, esto demuestra que el uso de este género y en específico de estas cuatro bacterias es beneficioso para la autocuración del material. Además debido al consumo de oxígeno de parte de las bacterias contenidas en el concreto, estas actúan como barrera de difusión de oxígeno protegiendo el refuerzo del acero contra la corrosión (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021; Wiktor y Jonkers, 2011).

#### **7.2.4. Influencia de la concentración bacteriana sobre la amplitud de grieta sellada**

Por otra parte, el uso de ciertas concentraciones favorece el rendimiento de la autoreparación. Ésto se debe a la participación de las células en el proceso, ya que para producir la precipitación de carbonato de calcio es necesaria una concentración mínima de células que garantice el sellado de microgrietas (Alazhari et al., 2018). De esta forma la concentración de la

bacteria empleada influenciará el tamaño de sellado de la microgrieta como lo muestra la siguiente figura:

**Figura 12.** *Influencia de la concentración bacteriana sobre la amplitud de sellado de las grietas.*



Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Intarasoontron et al., 2021; Jongvivatsakul et al., 2019; Mondal y Ghosh, 2021; Rong et al., 2020; Wang et al., 2014).

La figura presenta tres bacterias con tres distintas concentraciones obtenidas de cuatro artículos. Se puede observar como a medida que aumenta la concentración celular disminuye la amplitud de la grieta sellada. Ésto está relacionado con lo descrito por Rong et al. (2020) quienes observaron que a medida que aumentaba el tamaño de la grieta, era insuficiente la concentración bacteriana para la precipitación del CaCO<sub>3</sub>. Esta disminución provocó una reducción en la autoreparación.

Por otra parte, el uso de *B. subtilis* selló mayores tamaños de grieta y puede mejorarse si se adicionan los nutrientes necesarios para la precipitación de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).

También se obtendrán buenos resultados de sellado de microgrietas usando *B. pasteurii* y *B. sphaericus*, aunque en menor medida comparado con *B. subtilis*. Esto sugiere que el efecto reparador de las microgrietas en el concreto depende de la bacteria empleada. Asimismo el tipo de morfología de los cristales formados se debe a los distintos géneros bacterianos (Choi et al., 2021).

### 7.3. Importancia del medio de cultivo empleado para el crecimiento de bacterias

El medio de cultivo influye en el crecimiento óptimo de la bacteria seleccionada, como lo demuestran Alazhari et al. (2018) mediante el uso de tres medios de crecimiento. Cada uno incluía distintos aditivos, el primer medio (GM1) contenía acetato de calcio, citrato de sodio, extracto de levadura, glutamato de sodio, alanina, inosina,  $MgCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $MnSO_4$ , y  $KH_2PO_4$ ; el segundo medio (GM2) contenía acetato de calcio, extracto de levadura y dextrosa; y el tercer medio (GM3) constaba con los mismos tres componentes que GM2 pero en proporciones mucho más altas. Los resultados mostraron que con el medio GM3 se obtuvo un mayor crecimiento de bacterias respecto a GM2 y GM1. Ésto se atribuyó a que el medio contenía una mayor cantidad de acetato de calcio y de fuentes de energía como lo son el extracto de levadura y glucosa.

Con lo mencionado anteriormente, se demuestra el importante papel de los nutrientes o aditivos en el crecimiento de la bacteria así como en la precipitación de carbonato de calcio, debido a que el aditivo empleado permitirá la formación del precipitado como se demostró en las secciones 3.2.1 y 3.2.2. La selección del aditivo dependerá de la bacteria y la vía metabólica que esta emplee (ver tabla 5). Además, independientemente del método de incorporación de los agentes curativos implementados, el aditivo al adicionarse (sea dentro de una microcápsula o en solución junto a las bacterias en la mezcla del material) permitirá la activación de las células

vegetativas o esporas bacterianas (en estado inactivo). Una vez se forman las microgrietas, se estimula la germinación de éstas y por ende la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ . Del mismo modo parámetros como el pH y la temperatura influirán en el crecimiento de las bacterias como se describe a continuación.

**Tabla 5.** Aditivos y vías metabólicas para la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  por bacteria

Bacteria	Vías para la PCIB	Aditivos para la precipitación de $\text{CaCO}_3$	Referencias
<i>Bacillus subtilis</i>	Conversión metabólica de sales de calcio Hidrólisis de urea	Extracto de levadura lactato de calcio, urea y cloruro de calcio	(Khaliq y Ehsan, 2016) (Hamza et al., 2020) (Chetty et al., 2021)
<i>Bacillus pasteurii</i>	Hidrólisis de urea	Lactato de calcio, urea y cloruro de calcio	(Gat et al., 2012) (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021) (Bayati y Saadabadi, 2021)
<i>Bacillus sphaericus</i>	Hidrólisis de urea	Urea, nitrato de calcio, acetato de calcio, cloruro de calcio y extracto de levadura	(Mondal y (Dey) Ghosh, 2019) (Wang et al., 2014) (De Muynck et al., 2008)
<i>Bacillus megaterium</i>	Hidrólisis de urea	Urea y cloruro de calcio	(Chetty et al., 2021) (Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019)
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Conversión metabólica de sales de calcio	Acetato de calcio, lactato de calcio y extracto de levadura	(Stuckrath et al., 2014) (Alazhari et al., 2018)
<i>Bacillus conhii</i>	Conversión metabólica de sales de calcio	Lactato de calcio, glutamato de calcio, cloruro de calcio y extracto de levadura	(Xu et al., 2014) (Zhang et al., 2017) (Chetty et al., 2021)

Nota. Elaboración propia.

### 7.3.1. Efecto del pH y la temperatura en el crecimiento de las bacterias

Según Basha et al. (2018) en un estudio realizado para evaluar el crecimiento en los cultivos microbianos de seis bacterias a diversas temperaturas y varios pH, se demuestra como los diferentes valores empleados afectan el crecimiento de la bacteria. Los resultados obtenidos de cuatro de las bacterias se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6.** Resultados de la variación de pH y temperatura en el crecimiento de bacterias

Nombre de la bacteria	Valor de pH en el cultivo microbiano	Efecto del valor de pH en el crecimiento de la bacteria	Valor de temperatura en el cultivo microbiano	Efecto del valor de temperatura en el crecimiento de la bacteria
<i>Bacillus Licheniformis</i>	7	Crecimiento alto	44 °C	El mayor crecimiento
	10	Crecimiento muy bajo		
	11-12	El mayor crecimiento		
<i>Bacillus subtilis sub sp.</i>	7	Crecimiento bajo	25 °C	El mayor crecimiento
	11-12	El mayor crecimiento	44 °C	Crecimiento bajo
<i>Bacillus Methylophilicus</i>	9	Crecimiento bajo	10 °C	El mayor crecimiento
			37 °C	Crecimiento bajo
<i>Estenotrofomona maltofila</i>	9	Crecimiento alto	55 °C	El mayor crecimiento

*Nota.* Elaboración propia con base en datos de Basha et al. (2018).

La anterior tabla demuestra que las bacterias tienen condiciones de crecimiento específicas que favorecen a su mayor germinación dentro del concreto. Se puede inferir que a un pH alcalino se encuentran los mayores crecimientos de las bacterias, como se ha evidenciado con

la bacteria *B. pseudofirmus* la cual crece con un valor de pH igual a 7,5 o mayor a 11,5 (Fahimizadeh et al., 2020). Su crecimiento óptimo se ha registrado con un pH de 9,5 a 9,7 (Alazhari et al., 2018; Lu et al., 2019). Por otro lado, existen bacterias que crecen en un pH variado como es el caso de *Rhodococcus erythreus*, las cuales pueden crecer a un amplio rango de pH de 4 a 10,5 y presenta su mayor crecimiento a un valor de pH de 4 a 7 y de 8 a 10 (Choi et al., 2021). El pH alcalino del concreto entre 8 y 10 favorece el crecimiento de estas bacterias; además, un pH alto favorece el proceso de precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Chen et al., 2021; Choi et al., 2021; Gao et al., 2020; Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021; Wang et al., 2014).

Por otra parte, los estudios que evalúan el efecto de la temperatura sobre el crecimiento de la bacteria en concretos autorreparables son escasos. Las investigaciones existentes han demostrado que la temperatura es un factor fundamental para la autoreparación, como sugieren Gonzalez et al. (2018) en un estudio en donde se fabrican probetas de concreto con bacterias (B), sin ellas (C) y bacterias con lactato de calcio (L); las tres muestras fueron sumergidas en agua durante dos meses a temperaturas de 23 °C y 35 °C. Los resultados mostraron que a una temperatura de 35 °C ocurre un sellado de microgrietas en L, C y B, debido a la acción de la autoreparación autógena, y a los 23 °C se observan sellados de microgrietas en L y B, en este caso es evidente el efecto de las bacterias que permiten la autoreparación autónoma. Así se concluye que a una temperatura de 23 °C se ve favorecida la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) realizada por las bacterias.

Estos resultados sugieren que al seleccionar el tipo de bacteria se debe tener en cuenta las condiciones del medio para que esta pueda crecer de manera óptima. Esto favorecerá los procesos de autoreparación, al contar con la cantidad de células vegetativas o esporas bacterianas

necesarias para realizar la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), y además se debe tener en cuenta la temperatura para lograr una alta capacidad de autoreparación en el concreto.

#### **7.4. Influencia de los aditivos en las propiedades mecánicas del material y autoreparación**

La adición de algunos aditivos a la mezcla del material favorece los procesos de autoreparación como se mencionó anteriormente en las secciones 7.2.1 y 7.2.2, sin embargo pueden generar un impacto negativo en las propiedades mecánicas, como se explica a continuación:

##### **7.4.1. Extracto de levadura y Urea**

El extracto de levadura favorece la germinación de esporas y el crecimiento de células, además los estudios sugieren que el uso de éste junto a la urea es inevitable dependiendo del modo de la vía metabólica de las bacterias seleccionadas (Alazhari et al., 2018; Espitia-Nery et al., 2019; Gonzalez et al., 2018; Intarasontron et al., 2021). Sin estos compuestos las bacterias no podrían crecer, por ejemplo en ausencia de urea la vía metabólica hidrólisis de urea no ocurriría. Sin embargo, el uso de extracto de levadura disminuye la resistencia a la tracción del material, al adicionarse 0,85% en relación al peso del cemento además provoca una caída drástica en la resistencia a la compresión, y reduce el grado de hidratación de cemento; este último es un factor importante para las propiedades mecánicas del material, ya que cuando es mayor la hidratación más espacio de poros ocupara la fase sólida, por lo que se obtendrá una menor porosidad y una mayor resistencia (Schreiberová et al., 2019; Wang et al., 2014).

En el caso de la urea una dosis de 2,5% del peso del cemento tiene un impacto positivo en la resistencia a la compresión (Osman et al., 2021; Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019;

Schreiberová et al., 2019). También tiene un efecto positivo en la disminución de la absorción de agua (De Muynck et al., 2008; Lu et al., 2019; Wang et al., 2014).

#### **7.4.2. Lactato de calcio**

El lactato de calcio como aditivo ha demostrado ser beneficioso para la resistencia a la compresión al ser incorporado a la mezcla en concentraciones de 1%, 2% y 3% (en relación al peso del cemento) junto al polvo de esporas (Fahimizadeh et al., 2020). Además, mejora la resistencia a la flexión en un 15% (Schreiberová et al., 2019). Por otro lado, retrasa la hidratación del cemento, esto aumenta el tiempo de fraguado final (Luo y Qian, 2016). Cabe resaltar que, este aditivo es una fuente de calcio necesaria para realizar la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por la vía de conversión metabólica de sales de calcio, además ha demostrado ser el aditivo con la mayor capacidad de autocuración comparado con nitrato de calcio, el acetato de calcio y el gluconato de calcio, ya que permite una mayor precipitación de  $\text{CaCO}_3$  (Choi et al., 2021; Gonzalez et al., 2018; Wiktor y Jonkers, 2011).

#### **7.4.3. Otros aditivos**

El formiato de calcio en concentraciones de 1%, 2% y 3% (en relación al peso del cemento), al ser adicionado a la mezcla por el método directo el incremento en su concentración causa una disminución en la resistencia a la compresión (Luo y Qian, 2016), por otro lado, mejora la resistencia a la flexión en un 15% (Schreiberová et al., 2019). En cuanto al nitrato de calcio aumenta la porosidad del material y disminuye en gran medida la resistencia a la compresión con las tres concentraciones mencionadas. Además, con el uso de este aditivo se acelera la hidratación del cemento (Luo y Qian, 2016; Wang et al., 2014). Se debe destacar al aditivo cloruro de calcio el cual presenta grandes desventajas al emplearse como fuente de calcio,

ya que los iones de cloro afectan negativamente la integridad del concreto. A pesar de esto, existen hallazgos que comprueban que el uso de cloruro de calcio tiene la capacidad de acelerar la hidratación del cemento y mejorara la resistencia a la flexión y a la compresión cuando se adiciona con la urea (Fahimizadeh et al., 2020; Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019).

Con lo descrito anteriormente, se puede confirmar que para que se produzca la autocuración autónoma es necesario que haya suficiente aditivo disponible. Para generar suficiente carbonato de calcio, los autores han sugerido que la cantidad de aditivo depende del volumen de la grieta formada, además se requiere de una concentración mínima de células bacterianas o esporas, ya que a medida que aumenta la cantidad de aditivo en el sistema se debe disponer de suficientes células bacterianas para que ocurra la precipitación de carbonato de calcio. En el caso del aditivo acetato de calcio se requiere una concentración de  $5 \times 10^{11}$  células/ml por cada gramo de acetato de calcio (Alazhari et al., 2018).

### 7.5. Métodos de incorporación de los agentes curativos a la mezcla del material

Los estudios revisados emplean cuatro métodos que permiten agregar a la mezcla del material los agentes curativos de base biológica. En la siguiente tabla se evidencia la cantidad de veces que estos cuatro métodos han sido implementados en los 37 artículos que fueron revisados.

**Tabla 7.** Frecuencia en el uso de los métodos de incorporación de los agentes curativos

Nombre del método de incorporación de los agentes curativos a la mezcla del material	Referencias que implementan el método
Encapsulación	(Fahimizadeh et al., 2020), (Li, 2018), (Alazhari et al., 2018), (Wang et al., 2014), (Mostavi et al., 2015), (Intarasoontron et al., 2021), (Gao et al., 2020), (Snoeck et al., 2014)

Método directo (incorporación a la mezcla)	(Sonali Sri Durga et al., 2020), (Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019), (Schreiberová et al., 2019), (Basha et al., 2018), (Lu et al., 2019), (Luo y Qian, 2016), (Luo et al., 2015), (De Muynck et al., 2008), (Osman et al., 2021), (Basa et al., 2020), (Bayati y Saadabadi, 2021), (Chen et al., 2021), (Venkata Siva Rama Prasad y Vara Lakshmi, 2020), (Mondal y Ghosh, 2021), (Jongvivatsakul et al., 2019), (Reddy y Revathi, 2019)
Impregnación de las bacterias	(Gonzalez et al., 2018), (Wiktor y Jonkers, 2011), (Zhang et al., 2017), (González et al., 2020)
Inyección de las bacterias directamente en las grietas	(Choi et al., 2021)

*Nota.* Elaboración propia.

El uso de agentes curativos de base biológica tendrá un efecto positivo o negativo en las propiedades mecánicas del material como se ha demostrado, ya sea por la concentración de bacterias empleada, el tipo de bacteria o el aditivo seleccionado. Además, existe otro factor que puede afectar las propiedades mecánicas y la autoreparación autónoma, como los métodos de incorporación del agente curativo a la mezcla.

### 7.5.1. Encapsulación y composición de las cápsulas

En la sección 3.7.1 se define la encapsulación y algunos compuestos empleados para realizar las microcápsulas. Este método de incorporación de las bacterias y aditivos a la mezcla ha demostrado su eficiencia en la protección de los agentes curativos del entorno del concreto, no obstante existen aspectos que pueden perjudicar el proceso de autoreparación autónoma, las propiedades mecánicas y la estructura de la microcápsula:

1. La adición a una sola microcápsula de aditivos y esporas bacterianas puede ser problemática, e impide la germinación de las esporas dentro de la cápsula y, por ende fuera de ella, impidiendo el desarrollo de las actividades metabólicas de las

bacterias que permiten la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) el cual rellena las microgrietas (Alazhari et al., 2018).

2. Algunos estudios afirman que el tipo de microcápsula empleada afectará el tamaño del poro del material así como la permeabilidad al agua y la hidratación del mismo. De la misma forma, dependiendo del compuesto con el que se fabriquen las microcápsulas, generará un impacto en las propiedades mecánicas del material así como en el rendimiento de la autoreparación (Wang et al., 2014).
3. El método aplicado para fabricar las microcápsulas influye en el grosor y diámetro de la cápsula, favoreciendo al material y sus propiedades o de lo contrario afectándolo negativamente. De la misma forma la temperatura y el pH en la preparación de las cápsulas definirán la consolidación de las mismas al igual que la densidad de los poros. Se debe tener en cuenta que el pH dependerá del compuesto con el cual se encapsule, de esta forma permitirá las reacciones que dan forma a la cubierta de la cápsula de lo contrario ocasionara grietas en las capas de la cápsula y disminución del grosor de la misma (Mostavi et al., 2015).

Para evidenciar el efecto de las microcapsulas sobre las propiedades mecánicas del material mencionado en el numeral 2, el estudio realizado por Wang et al. (2014) evalúa el impacto generado con los porcentajes adicionados de microcapsulas de melamina, en la resistencia a la compresión y tracción. A continuación se presenta la tabla con los resultados obtenidos:

**Tabla 8.** *Afectación de las propiedades mecánicas al agregar microcápsulas*

Propiedad mecánica	Porcentaje de microcápsulas (en relación al peso del cemento)	Porcentaje de disminución de la propiedad mecánica
--------------------	---	--

Resistencia a la tracción	>3%	5%
Resistencia a la compresión	1%	15%
Resistencia a la compresión	5%	34%

*Nota.* Elaboración propia con base en datos de Wang et al. (2014).

También se presentó una disminución en la hidratación del cemento, al adicionar microcápsulas en proporciones de 3% y 5% afectando la resistencia del material; del estudio los autores sugieren restringir la adición de microcápsulas al 3% como máximo (Wang et al., 2014).

#### ***7.5.1.1. Influencia de la composición de la cápsula en el material.***

En el caso de las cápsulas porosas de alginato de calcio cuando entran en contacto con agua, se presenta un aumento en la absorción de agua debido a una mayor concentración de células, lo que conduce a un aumento en la capacidad de absorción de agua de las cápsulas. Este incremento de porosidad conlleva a una disminución de la resistencia a la flexión (Fahimizadeh et al., 2020). Sin embargo, el uso de este compuesto no requiere la rotura de la cápsula para que las bacterias germinen, ya que la superficie de la microcápsula actúa como sitio de nucleación para la formación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), por tanto la encapsulación con alginato de calcio no afecta la supervivencia de las esporas bacterianas siendo beneficiosa para la autoreparación autónoma (Gao et al., 2020; Intarasontron et al., 2021).

Otros compuestos para encapsular pueden formar una doble capa compuesta por dos sustancias distintas, como lo muestra el estudio realizado por Mostavi et al. (2015). En éste se emplea poliuretano (PU) para formar una primera capa de la cápsula, que luego es recubierta con urea y formaldehído. Esta cápsula demostró ser resistente a altas temperaturas en comparación a las cápsulas de una sola pared. En la preparación de la capa exterior es importante el pH, ya que a

valores altos presentarán grietas y disminuye el grosor de la misma. Por otra parte, al adicionarse 2,5% y 5% (en peso en el cemento) de microcápsulas, este último porcentaje presento la mayor eficiencia en la curación de microgrietas, en este caso con un mayor porcentaje de microcápsulas adicionada a la mezcla del concreto la autoreparación será mayor (Mostavi et al., 2015).

### **7.5.2. Otros métodos de incorporación de los agentes curativos**

Se presentan otros tres métodos para agregar los agentes curativos de base biológica a la mezcla, estos son el método directo (incorporación a la mezcla), impregnación de compuestos sobre los agentes curativos, e inyección del agente curativo directamente a las microgrietas.

#### ***7.5.2.1. Método directo.***

El método directo ha presentado diversos inconvenientes en la práctica, debido a las variables que influyen en la precipitación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como el pH, disponibilidad de los iones de calcio, el contenido de carbono inorgánico y la aparición de sitios de nucleación. Éstos se ven afectados por el clima severo, de manera que se tendrá un efecto positivo a corto plazo en cuanto al sellado y debido a la actividad ureolítica de las bacterias. Sin embargo a causa del clima el efecto de la autoreparación disminuye con el tiempo además, el entorno del concreto reduce gravemente la supervivencia de las células y esporas bacterianas, debido a la alta alcalinidad y el aplastamiento que ocurre a causa de la preparación de este tipo de material. Asimismo se verá afectada la funcionalidad del sistema de autoreparación autónoma y la resistencia a la compresión (Fahimizadeh et al., 2020; Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021; Lu et al., 2019).

Por otra parte, si son adicionadas las proporciones específicas de agentes curativos a la mezcla del concreto, esto podría mejorar la resistencia a la compresión como lo demuestran Basha et al. (2018) en un estudio realizado para evidenciar el efecto de distintos valores de temperatura y

pH en el crecimiento de bacterias. Para esto se fabrican cubos de mortero de cemento de grado M20. Las proporciones y cantidades empleadas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 9.** *Proporciones y cantidades empleadas para la mezcla de mortero de cemento*

Proporciones o relaciones	Cantidad de cemento empleado (Kg)	Cantidad de arena empleada (Kg)
Proporción de agua a microorganismos de 0,47	320	960
Proporción de líquido (agua + microorganismos) a cemento de 0,5		
Proporción de cemento a arena de 1:3		

*Nota.* Elaboración propia con base en datos de Basha et al. (2018).

Los resultados obtenidos con la fabricación de los cubos de mortero de cemento evidencian un aumento de 28,6% en la resistencia a la compresión, además se sugiere el uso de las proporciones descritas en la tabla anterior para futuros estudios que aborden el tema de materiales autorreparables (Basha et al., 2018).

#### **7.5.2.2. Método de impregnación e inyección.**

De los estudios revisados que implementan el método de impregnación (ver tabla 3), dos artículos emplean arcilla expandida para cubrir las bacterias y aditivos, permitiendo así la supervivencia del agente curativo en el proceso de mezcla cuando se prepara el material. El uso de este compuesto como sugieren Gonzalez et al. (2018) no presento inconvenientes para las bacterias o las propiedades del material, las bacterias se activaron usando el aditivo adicionado y sobrevivieron, permitiendo la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y con esto una amplitud de sellado de grieta de 0,26 mm. Igualmente, en el estudio de Wiktor y Jonkers (2011) empleando arcilla expandida para la impregnación, se logró garantizar la supervivencia del agente curativo y además se obtiene una amplitud de sellado de la microgrieta de 0,46 mm.

Por otra parte, la inyección de los agentes curativos directamente a las grietas formadas, según Choi et al. (2021) al realizar grietas artificiales de 0,4 a 0,6 mm en el concreto, e inyectar una suspensión con bacterias junto al medio urea-lactato de calcio a las grietas formadas, se observa una autoreparación gradual después de seis días y se logra un sellado de 0,2 mm.

### **7.6. Influencia de la arena en el proceso de autocuración**

La arena ha demostrado ser un compuesto que influye en la resistencia a la flexión del material, como sugieren Fahimizadeh et al. (2020) al adicionar 41,47% de arena en relación al peso del cemento para fabricar muestras de mortero de cemento, los resultados mostraron un aumento en la resistencia a la flexión de 32,12%, debido a una propagación más lenta de grietas en las muestras. Además, se comprueba que la arena proporciona mejores sitios de nucleación para el crecimiento de los cristales de carbonato de calcio, favoreciendo el aumento en la resistencia y a una mayor precipitación.

### **7.7. Importancia de las proporciones de agua a cemento en el material**

Las proporciones mencionadas en la tabla 8 específicamente la relación agua a cemento en peso, son gran importancia para las propiedades mecánicas del material, ya que entre mayor sea esta relación menor será la resistencia al concreto (Rondón Quintana y Reyes Lizcano, 2015). Esto está relacionado con la porosidad del material: al ser mayor se tendrá una amplia conectividad entre los poros dejando espacios vacíos que disminuyen la resistencia; esto fue comprobado por De Muynck et al. (2008) al realizar muestras de mortero de cemento con tres distintas relaciones de agua a cemento ( $a/c$ ). Estas fueron 0.5, 0.6 y 0.7 y los resultados mostraron una mayor cantidad de poros con el aumento en la relación  $a/c$  y un consiguiente aumento en la absorción de bacterias que taponan los poros con los cristales formados, mejorando la resistencia

del material. Los autores sugieren para una máxima absorción de las células bacterianas que los poros deben ser entre 2 a 5 veces mayores que las células. Por otro lado, existe otro factor que influye en la porosidad, este es la hidratación del material. Cuando ésta es mayor se tendrá una menor porosidad y por ende una mayor resistencia (Wang et al., 2014).

### 7.8. Técnicas para medir otras propiedades del material

Propiedades como la permeabilidad al agua, la porosidad, la absorción de agua, la permeabilidad a los gases, entre otras, son mediciones que permiten identificar como los agentes curativos y aditivos están cambiando al material a un nivel macroscópico y microscópico. De este último se pueden realizar mediciones para identificar la morfología del cristal formado en la microgrieta por medio de pruebas y técnicas como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 10.** Mediciones realizadas en los concretos autorreparables

Nombre de la medición	Función	Equipos necesarios	Referencias que usan las mediciones
Prueba de absorción de agua	Medir la capacidad de penetración del agua	Horno	(Sonali Sri Durga et al., 2020), (Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019), (Lu et al., 2019), (Wang et al., 2014)
Medición cuantitativa de supervivencia de las esporas encapsuladas	Determinar el número de esporas después de la encapsulación	Incubadora	(Fahimizadeh et al., 2020)
Prueba rápida de penetración del cloruro (RCPT)	Medir la capacidad del concreto para permitir el paso del cloruro a través de su matriz	Celda de voltaje externa	(Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019), (Basha et al., 2018)
Difracción de rayos X (DRX)	Determinar la composición química	Difractómetro	(Prabhath Ranjan Kumar, et al., 2019),

	de las muestras, identifica los cristales		(Gonzalez et al., 2018), (Choi et al., 2021)
Microscopia electrónica de barrido (SEM)	Identificar la formación o presencia del carbonato de calcio en las muestras	Microscopio electrónico de barrido	(Basha et al., 2018), (Lu et al., 2019), (Wiktor y Jonkers, 2011)
Microscopia electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM)	Identificar la morfología de los cristales de carbonato de calcio	Microscopio electrónico de barrido por emisión de campo	(Choi et al., 2021)
Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX)	Identifica la composición de los cristales formados	Sistema de análisis de elementos de rayos X de dispersión de energía	(Choi et al., 2021), (Lu et al., 2019), (Wiktor y Jonkers, 2011)
Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	Evaluar cuantitativamente la estructura de los poros en la parte superficial de la muestra	Equipo de intrusión	(Lu et al., 2019), (Wang et al., 2014), (Luo y Qian, 2016)
Densidad óptica a 600 nm	Determinar la germinación de las esporas bacterianas en los medios de crecimiento	Espectrofotómetro	(Alazhari et al., 2018)

*Nota.* Elaboración propia.

La aplicabilidad del concreto autorreparable debe considerar las limitaciones que diversos estudios han presentado respecto al uso del material a largo plazo, ya que algunas variables como la disponibilidad del aditivo, por ejemplo, pueden disminuir la eficiencia de la autoreparación autónoma.

## 7.9. Limitaciones del concreto autorreparable

Para la implementación del material autorreparable se deben tener en cuenta los estudios actualizados en el tema, y además las limitaciones que un gran número de artículos han encontrado al aplicar la autoreparación autónoma, ya que existen diversas variables importantes a considerar para lograr una alta capacidad de autoreparación y que no impacte negativamente en las propiedades mecánicas del material. Las limitaciones encontradas en los artículos revisados fueron agrupadas y se explican a continuación:

- 1. Agotamiento de nutrientes a largo plazo:** Las reacciones que permiten la precipitación de carbonato de calcio dependen de la vía metabólica que use la bacteria, siendo necesarios nutrientes específicos para tal objetivo. Por esto es de gran importancia la disponibilidad de los nutrientes. Sin embargo pueden verse afectados por el clima severo del entorno en el que se encuentra el concreto, generando una escasez de nutrientes a largo plazo (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021).
- 2. Condiciones ambientales del entorno para lograr la precipitación:** Para una rápida precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la microgrieta debe contar con la presencia de agua durante un tiempo prolongado o un entorno seco - húmedo (Li, 2018). En la práctica esta condición no es viable debido a la disponibilidad de agua. Además, la precipitación se vería afectada frente a los diversos escenarios que podrían ser adversos para las bacterias (Gonzalez et al., 2018).
- 3. Supervivencia de las bacterias:** La tasa de supervivencia de las esporas y células bacterianas es una dificultad técnica de la autoreparación autónoma, ya que la

formación de cristales en la pared celular gradualmente permitiría un bloqueo en los poros y grietas acortando el suministro de oxígeno, agua y otros nutrientes, siendo desfavorable para el crecimiento de las bacterias (Jena et al., 2020; Li et al., 2020). Además, debido al ambiente hostil dentro del concreto las bacterias morirían con el tiempo, a pesar de estar encapsuladas o inmovilizadas en un soporte protector (Luo et al., 2015).

- 4. Dificultad para el sellado de grietas de mayor tamaño:** Debido a la profundidad de la microgrieta formada, las bacterias fluyen hacia abajo sin adherirse a la superficie interna de la grieta. De esta forma no proporcionan el sitio de nucleación requerido para la formación de los cristales de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Choi et al., 2021) y por lo tanto, la precipitación se produce principalmente en la superficie exterior del material a causa de la penetración limitada de las bacterias al interior de la grieta (De Muynck et al., 2008).

Las limitaciones presentadas motivaron a los distintos autores a plantear recomendaciones, para disminuir los problemas asociados a la aplicación de este nuevo material, de manera que en próximos estudios sean tenidas en cuenta.

#### **7.10. Recomendaciones de los autores**

Con la información recopilada de los 37 artículos, se obtienen una serie de recomendaciones dadas por varios autores, la mayoría de sugerencias se enfocan en los próximos estudios a realizar sobre el tema de concreto autorreparable, ya que como se describió en la sección 7.9, aún existen grandes incógnitas sobre el funcionamiento de la autoreparación autónoma a continuación se describen:

- Implementar un método sistemático para calcular la eficiencia de la autocuración (Kumar Jogi y Vara Lakshmi, 2021). Debido a que cada artículo implementa un método diferente para medir el rendimiento de la autoreparación.
- Deben diseñarse métodos precisos y concisos para estudiar la retención de nutrientes en el entorno del cemento (Fahimizadeh et al., 2020).
- Para encapsulación, las investigaciones futuras deben enfocarse en métodos para evaluar la supervivencia de las esporas después de la incorporación a materiales cementosos, y optimizar la cantidad y el tamaño de las cápsulas para lograr la autocuración deseada sin una significativa reducción de la resistencia física (Fahimizadeh et al., 2020).
- La selección del agente curativo y el método de incorporación a la mezcla debe tener en cuenta, las condiciones de aplicación y la situación ambiental (Li, 2018). Asimismo, se debe investigar la compatibilidad de los agentes curativos de base biológica y los materiales cementosos (Luo y Qian, 2016).
- Es necesario evaluar si la técnica de autocuración autónoma es aplicable a condiciones ambientales de distintos países (Gonzalez et al., 2018).
- Para mejorar la eficacia de la autoreparación se deben combinar múltiples mecanismos de sellado de grietas, además el mecanismo disparador de la autocuración es la clave para lograr la inteligencia en el sellado de las grietas (Li et al., 2020).
- Es fundamental realizar una investigación a profundidad sobre la diversidad microbiana para cubrir las lagunas en el rendimiento de la autocuración (Basha et al., 2018). Además, la selección de la fuente de calcio es importante y depende

del microorganismo a emplear, para obtener los mejores resultados en la formación de los cristales de carbonato de calcio (Choi et al., 2021).

- Se necesitan más investigaciones para establecer una relación entre el ancho de la grieta y la eficiencia de la autoreparación autónoma (Lu et al., 2019).
- Antes de considerar su aplicación práctica se debe tener en cuenta la durabilidad a largo plazo del mecanismo de autoreparación autónoma, y la rentabilidad de este nuevo tipo de material (Wiktor y Jonkers, 2011).

## 8. CONCLUSIONES

- Se comprueba que las bacterias del género *Bacillus* son empleadas con mayor frecuencia en la implementación del concreto autorreparable, además la bacteria *Bacillus subtilis* se destaca por su alta capacidad de autoreparación, y presenta los mejores incrementos en la resistencia a la compresión.
- Los resultados presentados en base a la revisión de artículos evidencian que en la actualidad son empleados cuatro métodos de incorporación de los agentes curativos, para la fabricación de los tres tipos de materiales cementosos; sin embargo, ninguno logra una alta eficiencia en el mecanismo de autoreparación autónoma, tampoco se garantiza la supervivencia a largo plazo de las bacterias, por esta razón se concluye que ninguno de los métodos es de aplicación universal.
- Con la recopilación de datos se evidenció que el aditivo adicionado a la mezcla influye en el rendimiento de la autocuración y afecta las propiedades mecánicas del material, se encontró que el uso de lactato de calcio garantiza una eficiente autoreparación, sin afectar las resistencias a la compresión y flexión; además, para obtener una alta precipitación de carbonato de calcio, se debe contar con una concentración bacteriana mínima por gramo de aditivo.
- Se establecieron los conceptos necesarios para comprender el mecanismo de autoreparación autógena y autónoma, así como los parámetros que afectan el crecimiento de las bacterias y la precipitación de carbonato de calcio, como el pH, la temperatura, concentración y disponibilidad del aditivo, composición del cultivo microbiano, tipo de compuesto para realizar las microcápsulas, y entorno del concreto (en presencia de agua o en un ciclo húmedo-seco).

- Para terminar, los estudios demuestran la importancia de la arena y las proporciones de agua a cemento en la mezcla del material, ya que la primera al adicionarse aporta mayores sitios para la formación de cristales en la precipitación de carbonato de calcio, y la segunda se relaciona con la porosidad del material y la resistencia del mismo. Por otra parte, se establecen mediciones actualizadas para determinar la precipitación de carbonato de calcio, la morfología de los cristales formados, la composición química de los cristales, entre otros.

## 9. RECOMENDACIONES

Con base en la metodología empleada en este trabajo se sugiere para los próximos estudios que se realicen sobre el tema de concreto autorreparable, hacer uso de una mayor cantidad de bases de datos como Science Direct, Scielo, Elsevier entre otras. Para obtener un gran número de información que enriquezca con nuevo conocimiento el tema de investigación.

Por otra parte, se recomienda ampliar el número de palabras claves y de exclusión a la hora de crear las ecuaciones de búsqueda, en base a los términos empleados y descritos en los títulos marco conceptual y resultados y discusión. De preferencia establecer las características que se desean encontrar en los artículos con anterioridad y empleando las palabras claves y de exclusión mencionadas.

Se sugiere ampliar la información respecto a los métodos para fabricar las microcápsulas y las relaciones de agua a cemento, ya que los estudios encontrados en el trabajo no fueron suficientes y son factores de gran influencia en el mecanismo de autoreparación autónoma, asimismo se recomienda realizar una búsqueda de artículos que evalúe cada uno de los aditivos mencionados en el trabajo, y su influencia sobre las propiedades mecánicas del material y la autoreparación. Del mismo modo, se recomienda realizar una clasificación de artículos en base al tipo de bacteria empleado, de manera que el análisis de información permita una rápida y eficiente comparación entre las distintas bacterias, y de esta forma una mejor redacción de resultados con su correspondiente discusión.

Para terminar en futuros estudios experimentales en la Universidad Antonio Nariño sobre el tema de materiales autorreparables y con base en los resultados mostrados en el trabajo, el uso de lactato de calcio y *Bacillus subtilis* como agente curativo sería una excelente opción en la implementación del material, teniendo en cuenta la concentración bacteriana mínima por gramo

de aditivo, además el uso de arena para preparar la mezcla favorecería notoriamente la eficiencia de la autocuración. Cabe resaltar que la relación de agua a cemento es fundamental para obtener una alta resistencia del material y para la absorción de las bacterias.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alazhari, M., Sharma, T., Heath, A., Cooper, R., & Paine, K. (2018). Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 160, 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.086>
- Alconz Ingala, W. P. (2006). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción (Guía de las practicas de campo y normas de calidad)*. Universidad Mayor de San Simón. Retrieved septiembre 27, 2021, from <https://topodata.com/wp-content/uploads/2019/09/001MaterialesConstruccion.pdf>
- Basa, B., Panda, K. C., Sahoo, N. K., & Jena, S. (2020). Impact of Bacillus subtilis bacterium on the properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 651-656. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.129>
- Basha, S., Lingamgunta, L. K., Kannali, J., Gajula, S. K., Bandikari, R., Dasari, S., Dalavai, V., Chinthala, P., Gundala, P. B., Kutagolla, P., & Balaji, V. K. (2018). Subsurface Endospore-Forming Bacteria Possess Bio-Sealant Properties. *Scientific Reports*, 8(1), 6448. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24730-3>
- Bayati, M., & Saadabadi, L. A. (2021). Efficiency of bacteria based self-healing method in alkali-activated slag (AAS) mortars. *Journal of Building Engineering*, 42, 102492. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102492>

Bush, L., & Vazques-Pertejo, M. T. (2019). *Generalidades sobre las bacterias anaerobias— Enfermedades infecciosas*. Manual MSD versión para profesionales.

<https://www.msmanuals.com/es/professional/enfermedades-infecciosas/bacterias-anaerobias/generalidades-sobre-las-bacterias-anaerobias>

Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., & Perthuisot, J.-P. (1999). Ca-carbonates precipitation and limestone genesis—The microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology*, 126(1), 9-23. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00028-7)

Chen, B., Sun, W., Sun, X., Cui, C., Lai, J., Wang, Y., & Feng, J. (2021). Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent. *Process Biochemistry*, 107, 100-111.

<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.001>

Chetty, K., Xie, S., Song, Y., McCarthy, T., Garbe, U., Li, X., & Jiang, G. (2021). Self-healing bioconcrete based on non-axenic granules: A potential solution for concrete wastewater infrastructure. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102139.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102139>

Choi, S., Park, S., Park, M., Kim, Y., Lee, K. M., Lee, O.-M., & Son, H.-J. (2021).

Characterization of a Novel CaCO<sub>3</sub>-Forming Alkali-Tolerant *Rhodococcus erythreus* S26 as a Filling Agent for Repairing Concrete Cracks. *Molecules*, 26(10), 2967.

<https://doi.org/10.3390/molecules26102967>

DANE. (2021, Julio 30). *Boletín Técnico Estadísticas de Cemento Gris (ECG)*. DANE.

[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento\\_gris/Bol\\_cemen\\_gris\\_jun21.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/Bol_cemen_gris_jun21.pdf)

- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., & Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 1005-1014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>
- ENNOMOTIVE. (2020, febrero 12). *Producción de cemento: Cómo reducir las emisiones de CO2*. ENNOMOTIVE. Retrieved noviembre 03, 2021, from <https://www.ennomotive.com/es/produccion-de-cemento>
- Espitia-Nery, M. E., Corredor-Pulido, D. E., Castaño-Oliveros, P. A., Rodríguez-Medina, J. A., Ordoñez-Bello, Q. Y., & Pérez-Fuentes, M. S. (2019). Mechanisms of encapsulation of bacteria in self-healing concrete: Review. *DYNA*, 86(210), 17-22. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.75343>
- Fahimizadeh, M., Diane Abeyratne, A., Mae, L. S., Singh, R. K. R., & Pasbakhsh, P. (2020). Biological Self-Healing of Cement Paste and Mortar by Non-Ureolytic Bacteria Encapsulated in Alginate Hydrogel Capsules. *Materials*, 13(17), 3711. <https://doi.org/10.3390/ma13173711>
- Gao, M., Guo, J., Cao, H., Wang, H., Xiong, X., Krastev, R., Nie, K., Xu, H., & Liu, L. (2020). Immobilized bacteria with pH-response hydrogel for self-healing of concrete. *Journal of Environmental Management*, 261, 110225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110225>
- Gat, D., Tsesarsky, M., & Shamir, D. (2012). *Ureolytic Calcium Carbonate Precipitation in the Presence of Non-Ureolytic Competing Bacteria*. 3966-3974. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)405](https://doi.org/10.1061/41165(397)405)

Gonzalez, A., Parraguez Macaya, A., Corvalan, L., Correa, N., & Stuckrath, C. (2018).

*HORMIGÓN AUTORREPARABLE CON BACTERIAS PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL Autores.* 8.

González, Á., Parraguez, A., Corvalán, L., Correa, N., Castro, J., Stuckrath, C., & González, M. (2020). Evaluation of Portland and Pozzolanic cement on the self-healing of mortars with calcium lactate and bacteria. *Construction and Building Materials*, 257, 119558.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119558>

Hammes, F., & Verstraete\*, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1(1), 3-7.

<https://doi.org/10.1023/A:1015135629155>

Hamza, O., Esaker, M., Elliott, D., & Souid, A. (2020). The effect of soil incubation on bio self-healing of cementitious mortar. *Materials Today Communications*, 24, 100988.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100988>

Intarasoontron, J., Pungrasmi, W., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., & Likitlersuang, S. (2021). Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing. *Construction and Building Materials*, 302, 124227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124227>

Jena, S., Basa, B., & Chandra Panda, K. (2020). A Review on the Bacterial Concrete Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 970, 012004.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/970/1/012004>

Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W., & Likitlersuang, S. (2019). Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced

- calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Construction and Building Materials*, 212, 737-744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035>
- Khaliq, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>
- Kumar Jogi, P., & Vara Lakshmi, T. V. S. (2021). Self healing concrete based on different bacteria: A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1246-1252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.765>
- Li, X., Zhao, S., & Wang, S. (2020). Status-of-the-Art for Self-healing Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 1622, 9. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1622/1/012011>
- Li, Y. (2018). A Review: Novel Routes towards the Realization of Self-Healing Function in Cementitious Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394, 032002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/3/032002>
- Lu, S., Chen, M., Dang, Y., Cao, L., He, J., & Zhong, J. (2019). Bacterial self healing cement based materials: Mechanism at nanoscale. *AIP Advances*, 9(10), 105312. <https://doi.org/10.1063/1.5124315>
- Luis Díaz, F. L. (2016). *Evaluación de las propiedades reológicas de los hormigones con la combinación del CBQ-VTC y el superplastificante comercial SX32*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Retrieved 09 27, 2021, from <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7407>
- Luo, M., & Qian, C. (2016). Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 121, 659-663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.075>

- Luo, M., Qian, C., & Li, R. (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 87, 1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117>
- Machin, V. (s.f.). *Caracterización taxonómica de nuevas bacterias alcalófilas* [Tesina de grado, Universidad de la República Uruguay]. Archivo digital.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/21387/1/uy24-19160.pdf>
- Margareta Mühlhauser, P., & Lina Rivas, J. (2014). Laboratorio de microbiología: Conocimientos básicos para un clínico. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 25(3), 569-579. [https://doi.org/10.1016/S0716-8640\(14\)70072-0](https://doi.org/10.1016/S0716-8640(14)70072-0)
- Máxima Uriarte, J. (2021, agosto 31). *Polímeros*. Características. Retrieved septiembre 13, 2021, from <https://www.caracteristicas.co/polimeros/>
- Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2012). Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(5), 170-184. <https://doi.org/10.3151/jact.10.170>
- Mondal, S., & (Dey) Ghosh, A. (2019). Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.122>
- Mondal, S., & Ghosh, A. (Dey). (2021). Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of concrete structures: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 266, 121122.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121122>

Monrroy Rios, E. (2014). *Sistema de carbonatos*. Karst Geochemistry and Hydrogeology.

Retrieved 2021, from <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/entradas-en-espanol/sistema-carbonatos/>

Morejón, L., & Pardo Coba, E. (2008). *TEXTO DE MICROBIOLOGIA I*. 107.

Mostavi, E., Asadi, S., ASCE, M., Hassan, M. M., & Alansari, M. (2015, Diciembre). Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 8.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001314)

NEOGEN. (s.f.). *Extracto de levadura*. <https://www.neogen.com>.

[https://www.neogen.com/es/categories/microbiology/yeast-extract/?utm\\_medium=SocialShare](https://www.neogen.com/es/categories/microbiology/yeast-extract/?utm_medium=SocialShare)

Osman, K. M., Taher, F. M., Abd EL-Tawab, A., & Faried, A. S. (2021). Role of different microorganisms on the mechanical characteristics, self-healing efficiency, and corrosion protection of concrete under different curing conditions. *Journal of Building Engineering*, 41, 102414. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102414>

Parraguez Macaya, A. C. (2018). *Estudio sobre el rendimiento de bacterias como agente de auto-reparación en el hormigón bajo diferentes condiciones de temperatura y tipo de cemento* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnica Federico Santa Maria]. Archivo digital.

<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/43497/3560900257477UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Prabhath Ranjan Kumar, S., Vighnesh, R., Karthikeyan, G., & Maiyuri, S. (2019). Self Healing of Microcracks in linings of Irrigation Canal Using Coir Fibre Reinforced Bio-Concrete.

*International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11), 3275-3280. <https://doi.org/10.35940/ijitee.K2534.0981119>

QUIMICA.ES. (s.f.). *Melamina*. QUIMICA.ES. Retrieved septiembre 21, 2021, from <https://www.quimica.es/enciclopedia/Melamina.html>

Redacción. (2021). Urea. *ConceptoDefinición*. <https://conceptodefinition.de/urea/>

Reddy, B. M. S., & Revathi, D. (2019). An experimental study on effect of Bacillus sphaericus bacteria in crack filling and strength enhancement of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 19, 803-809. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.135>

Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Ecoe Ediciones. <https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/ereader/bibliouan/70435?page=568>

Rong, H., Wei, G., Ma, G., Zhang, Y., Zheng, X., Zhang, L., & Xu, R. (2020). Influence of bacterial concentration on crack self-healing of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 244, 118372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118372>

Schreiberová, H., Bílý, P., Fládr, J., Šeps, K., Chylík, R., & Trtík, T. (2019). Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00250.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00250>

Schultze-Lam, S., Fortin, D., Davis, B. S., & Beveridge, T. J. (1996). Mineralization of bacterial surfaces. *Chemical Geology*, 132(1), 171-181. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00053-8)

Scopus. (2021). *Busqueda*. Scopus. Retrieved Septiembre 07, 2021, from <https://www.scopus.com/search/form.uri?sort=plf->

[f&src=s&nlo=&nlr=&nls=&sid=ff220c310d296352c85bf40f0239f600&sot=a&sdt=cl&cluster=scofreetoread%2c%22all%22%2ct&sl=170&s=%28%28bacteria+OR+microorganisms%29+AND+%28%22material+regenerates+itself%22+OR+%22autog](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018)

Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., De Belie, N., & Wang, J. Y. (2014). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 110-119.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018>

Sonali Sri Durga, C., Ruben, N., Sri Rama Chand, M., & Venkatesh, C. (2020). Performance studies on rate of self healing in bio concrete. *Materials Today: Proceedings*, 27, 158-162. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.151>

Stuckrath, C., Serpell, R., Valenzuela, L. M., & Lopez, M. (2014). Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 50, 10-15.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.005>

Venkata Siva Rama Prasad, C., & Vara Lakshmi, T. V. S. (2020). Experimental investigation on bacterial concrete strength with *Bacillus subtilis* and crushed stone dust aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1111-1117.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.478>

Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139-152.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>

Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), 763-770.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>

WO 2010/142401. (2010, diciembre 16). *Microcapsules containing microorganisms*. Google Patents. Retrieved septiembre 13, 2021, from

<https://patents.google.com/patent/WO2010142401A1/en>

Xu, J., Yao, W., & Jiang, Z. (2014). Non-Ureolytic Bacterial Carbonate Precipitation as a Surface Treatment Strategy on Cementitious Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 983-991. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000906](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000906)

Yatish Reddy, P. V., Ramesh, B., & Prem Kumar, L. (2020). Influence of bacteria in self healing of concrete—A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4212-4218.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.233>

Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., & Li, Z. (2017). Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 610-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.021>



## 11. ANEXOS

### Anexo A. 2021\_GissethGomezLauraMedina\_Anexos