

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**



**Efecto de la bacteria *Bacillus megaterium* en la capacidad autorreparable del concreto**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

**AUTOR**

**Jose Efreem Oblitas Benavides**

**ASESOR**

**Carlos Rafael Tafur Jimenez**

<https://orcid.org/0000-0003-0119-8234>

**Chiclayo, 2023**

## Artículo oblitado

### INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

19%

PUBLICACIONES

16%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://www.civilejournal.org">www.civilejournal.org</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="http://tapchi.humg.edu.vn">tapchi.humg.edu.vn</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://repositorio.uan.edu.co">repositorio.uan.edu.co</a> Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universiti Putra Malaysia Trabajo del estudiante	2%
5	"Proceedings of International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development (ICITCSD – 2021)", Springer Science and Business Media LLC, 2022 Publicación	1%
6	<a href="http://thescipub.com">thescipub.com</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://link.springer.com">link.springer.com</a> Fuente de Internet	1%

## Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>8</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>13</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>17</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>19</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>20</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>23</b>

## Resumen

Debido a que el concreto es susceptible a agrietarse, el agua y el hielo pueden filtrarse en su estructura, lo que reduce su vida útil, se ha propuesto el uso de bacterias *Bacillus megaterium* en concentraciones de  $1 \times 10^5$  cel/ml y  $1 \times 10^6$  cel/ml como una variable independiente en un estudio de concreto autorreparable. Se evaluaron diversas variables dependientes, incluyendo tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, permeabilidad, módulo de elasticidad y la autorreparación de fisura. Además, se realizaron controles de auto reparación semanalmente y se llevó a cabo un análisis del costo unitario por metro cúbico del concreto autorreparable. Con esto, se plantea demostrar si cumple un efecto de mejoramiento en la capacidad ya antes mencionada.

**Palabras clave:** *Bacillus megaterium*, inoculación, liofilizado.

### **Abstract**

Because concrete is susceptible to cracking, water and ice can seep into its structure, reducing its lifespan, the use of *Bacillus megaterium* bacteria at concentrations of  $1 \times 10^5$  cel/ml and  $1 \times 10^6$  cel/ml has been proposed as an independent variable in a self-healing concrete study. Several dependent variables were evaluated, including setting time, compressive strength, permeability, modulus of elasticity and crack self-repair. In addition, self-repair checks were carried out weekly and an analysis of the unit cost per cubic meter of self-healing concrete was carried out. With this, it is proposed to demonstrate if it fulfills an improvement effect on the aforementioned capacity.

**Keywords:** *Bacillus megaterium*, inoculation, lyophilized.

## Introducción

En la industria de la construcción, el concreto es uno de los materiales más empleados, siendo únicamente superado, en términos de uso, por el agua [1]. El concreto es utilizado en la construcción de diversas estructuras, que van desde puentes hasta estacionamientos subterráneos y edificios residenciales. En el año 2019, se registró un aumento en el uso del concreto a nivel mundial, pasando de 2.800 a 4.080 millones de toneladas [2]. Es importante mencionar que estas estructuras de concreto están expuestas a tensiones ambientales, y con ellos, es necesario protegerlas y preservarlas para garantizar su durabilidad. Aunque el concreto puede soportar fuerzas de compresión, es susceptible a la fractura bajo tensiones de tracción. Las grietas se desarrollan rápidamente y se profundizan con el tiempo, y cuando alcanzan el área de refuerzo, pueden provocar daños catastróficos [1]. Estas también afectan la durabilidad del concreto, ya que proporcionan una vía para la entrada de agua y contaminantes, como cloruros y sulfatos, en la matriz de concreto [3].

Para prevenir colapsos, es esencial minimizar las fisuras en el concreto y proporcionar un proceso de curado autógeno lo más temprano posible, junto con la recuperación de la estanqueidad [4].

El problema de las grietas en la industria de la construcción ha existido desde hace mucho tiempo, y se han utilizado varias técnicas para repararlas. La metodología de reparación tradicional se utiliza en la mayoría de los países y tiene múltiples limitaciones, ya que se basa en medios naturales y solo puede restaurar grietas de 0 a 100  $\mu\text{m}$  de ancho [5]. En la actualidad, se están probando varias tecnologías modernas para controlar y curar las grietas de manera más efectiva. La precipitación de calcita microbiana (MICCP), con y sin aditivos minerales como la zeolita natural 'clinoptilolita', es una metodología emergente útil para reparar las grietas de manera autógena y mejorar la durabilidad del concreto, incluso en grietas más grandes de más de 100  $\mu\text{m}$  [1].

El concreto autorreparable se ha diseñado para prolongar su vida útil y reparar las grietas iniciales utilizando la técnica de autorreparación autógena MICCP antes del inicio de la fractura. [6] observaron que la actividad metabólica microbiana en el concreto mejora su rendimiento de durabilidad. Otro estudio [7] utilizó la bacteria *Bacillus pasteurii* y descubrió que el carbonato de biocalcio llenaba los vacíos, lo que hacía que la textura de la superficie fuera más compacta y resistente a la penetración. Sin embargo, se encontró que la fuerza obtenida con *Bacillus pasteurii* era ligeramente menor que la obtenida con *Bacillus Sphaericus* [8]. [9] demostraron que la variación de temperatura en la cepa bacteriana utilizada podía sobrevivir desde  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $700^{\circ}\text{C}$ . El uso de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* en el concreto de áridos ligeros aumenta la resistencia a la penetración de los iones de cloruro [10]. Además, se descubrió que el aumento general de la fuerza era el resultado de una cantidad adecuada de materia orgánica en la matriz derivada de la biomasa de microorganismos a una concentración de  $1 \times 10^5$  célula/ml [11]. [14] demostró que la capacidad de absorción de agua en presencia de bacterias y nutrientes se evaluó mediante el coeficiente de Sorptividad, y se encontró que la recuperación después de la curación fue del

95%. [15] observaron la curación de grietas artificiales en presencia de una solución bacteriana bajo el curado de urea- $\text{CaCl}_2$ , lo que resultó en una muestra curada en un 85% y un aumento en la resistencia a la compresión.

En el Perú, en los últimos años es un hecho recurrente las quejas registradas por propietarios de edificaciones, esto entorno a estructuras de concreto con fisuras y grietas. Esto suele ser signo de alarma para la población, asociándolo con la inseguridad de que estas estructuras de concreto puedan estar a punto de colapsar [16]. Por ello, es importante que exista una investigación sobre la realización de un concreto que pueda ser autorreparable, evitando la aparición de grietas.

Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo utilizar a la bacteria *Bacillus megaterium* con concentraciones de  $1 \times 10^5$  cel/ml y  $1 \times 10^6$  cel/ml, para analizar su capacidad autorreparable dentro de un concreto de  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>. Con ello, se evaluaron diversas propiedades del concreto, incluyendo resistencia a la compresión, permeabilidad, módulo de elasticidad y el sellado de fisuras. Así, se pretende dar resultados positivos sobre la autorreparación de grietas realizadas al concreto de forma artificial y ver su mejoría.

## Metodología

### Fase 1. Reactivación e inoculación de la bacteria *Bacillus megaterium*

#### - Características de la bacteria *Bacillus megaterium*

La bacteria *Bacillus megaterium* ATCC 9885 se obtuvo por GenLab Perú, quien brindó el Estándar de Referencia Microbiológico Cualitativo KWIK-STIK™. El lugar de procedencia de la bacteria fue USA (Microbiologics, 2023).

El método de cultivo de la bacteria es mediante al TSA Agar (Agar de Soya Tríplica). La temperatura tiene que estar a 35°C. Es de tipo aerobio. El crecimiento de las bacterias es normalmente de 24 a 48 horas (Microbiologics, 2023).



**Fig. 1** Cepa bacteriana de *Bacillus megaterium*.

#### - Procedimiento de reactivación

El proceso de reactivación se realizó en el Laboratorio de la Universidad Pedro Ruiz Gallo. Para poder obtener la reactivación de esta bacteria, se tuvo que seguir un procedimiento guiado del Método de placa de rayas con KWIK-STIK™ y fue el siguiente:

1. Esterilización de equipos (placas Petri y tubos de ensayo) y desinfección del ambiente.
2. Reactivación de la cepa ATCC a través de un medio de cultivo TSA Agar.
3. Siembra de la cepa bacteriana, que contiene microorganismos liofilizado (pellet). Estas se pueden observar en la Figura 1.
4. Colocación de la siembra en la incubadora a 37°C por 48 horas.
5. Inoculación con concentraciones de  $1 \times 10^5$  cel/ml y  $1 \times 10^6$  cel/ml. Posterior a ello, se repite el paso 4.
6. Inóculos aptos para su adición a la mezcla de concreto.



**Fig. 1** Colonias bacterianas en placa Petri.

## **Fase 2. Realización del concreto con bacteria *Bacillus megaterium***

### - Materiales

#### **Cemento**

El tipo de cemento empleado fue Portland Tipo I, característicos por tener alta resistencia inicial y menores tiempo de fraguado. Las características de este tipo de cemento están establecidas en la NTP 334.009:2020.

#### **Agregado fino**

La clasificación del agregado fino según NTP 400.011 muestra que se encuentra en la zona I y es muy importante para mantener la demanda de agua, minimizando los vacíos en el concreto. Este tiene una densidad específica de 2.657, absorción de agua de 0.89%, módulo de finura de 2.884.

#### **Agregado grueso**

Se utilizó piedra triturada de granito azul para agregados de tamaño único de tamaños nominales de 19,05 mm o  $\frac{3}{4}$ " que confirman NTP 400.011 como agregados gruesos para esta investigación. La gravedad específica de 2,628, con absorción de agua de 1.01%.

#### **Agua**

Se usó agua potable de conformidad con los requerimiento de NTP 339.088 para la colada y el curado.

### **Bacteria**

Por cada probeta cilíndrica, se colocó 10 ml del líquido inoculado y se sustituyó por 10ml de agua. Por ende, en un metro cúbico de concreto se colocará 1.87 Lt de inóculo y se sustituirá al agua por la misma cantidad. Teniendo en cuenta que las dosificaciones de concreto pueden variar según la calidad de sus componentes convencionales, en este caso la cantidad de líquido inoculado no variará al sustituir el agua debido a que, el enfoque se centra en la concentración de células por mililitro verificando que sea la indicada.

### **Cal viva y urea**

Cal viva (óxido de calcio), agregando esta sustancia al agua se formará hidróxido de calcio, cabe mencionar que, la importancia del calcio presente es para la nutrición bacteriana y este a la vez aumenta la característica de hidratación del cemento.

Urea, la cual junto al hidróxido de calcio se agregaron como nutrientes ayudarán a la precipitación de carbonato de calcio inducida por las bacterias siendo una vía denominada hidrólisis de urea, esto se realizará en el proceso de curado de las muestras de bioconcreto.

La hidrólisis de urea se refiere al complejo enzimático o pool de enzimas que presenta en su citoplasma y que metabolizando transforman la urea (que contiene carbono, oxígeno y nitrógeno en su composición) y cloruro de calcio (que contiene calcio, carbono y oxígeno)

Así completan el CHON, como fuente de nutrientes para crecer, reproducirse y de esta manera aumentar en número.

$$CHON = \text{Carbono-Hidrógeno-Oxígeno-Nitrógeno} = \text{bioelementos primarios} \\ \text{Calcio - Fósforo} = \text{bioelementos secundarios} \quad (1)$$

Ambos grupos de elementos (primarios y secundarios) aseguran la nutrición para una población bacteriana.

#### *- Procedimiento*

El diseño de mezcla se realizó mediante el método de ACI-211. Las proporciones de la mezcla por 1m<sup>3</sup> de concreto de muestra patrón son las siguientes:

**Table 1** Mezcla de concreto para 1m<sup>3</sup> de muestra patrón.

<b>Cemento (kg)</b>	<b>Agregado fino (kg)</b>	<b>Agregado grueso (kg)</b>	<b>Agua (litros)</b>
355	815	985	196.30
<b>1</b>	<b>2.29</b>	<b>2.77</b>	<b>23.5 lt/bls</b>

Para los concretos con bacterias son las siguientes:

**Table 2** Mezcla de concreto para 1m<sup>3</sup> de muestra con concentraciones de bacterias.

	<b>Cemento (kg)</b>	<b>Agregado fino (kg)</b>	<b>Agregado grueso (kg)</b>	<b>Agua (litros)</b>	<b>Bacteria (litros)</b>
Concentración 1x10 <sup>5</sup> cel/ml	355	815	985	194.56	1.72
	<b>1</b>	<b>2.29</b>	<b>2.77</b>	<b>23.27 lt/bls</b>	
Concentración 1x10 <sup>6</sup> cel/ml	355	815	985	194.56	1.72
	<b>1</b>	<b>2.29</b>	<b>2.77</b>	<b>23.27 lt/bls</b>	

**Fase 3.** *Ensayo de concreto en estado fresco*

Se realizaron ensayos de laboratorio para conocer las propiedades físicas de las muestras del concreto en estado fresco. Estos se llevaron a cabo en la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo. Dentro de este, se determinó lo siguiente: asentamiento. Todo hallado según NTP 339.035.

**Fig. 2** Slump concreto patrón 4".**Fase 4.** *Ensayo de concreto en estado endurecido*

Para poder determinar las características del concreto en estado endurecido de las muestras patrón y con adición de bacteria, se planteó realizar ensayos de: resistencia a la compresión, permeabilidad y fisuración sin llegar a fractura. El procedimiento fue el siguiente:

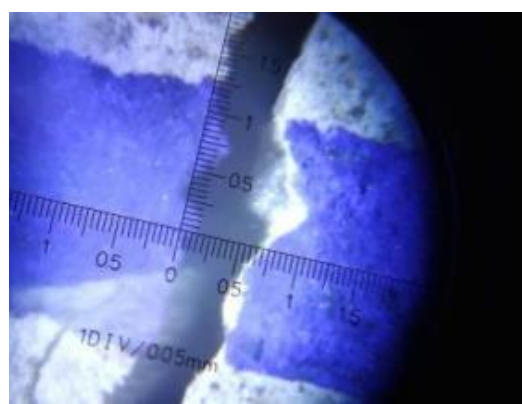
- A) Para la **resistencia a la compresión**, se tomó como referencia la NTP 339.034 y la NTP 339.033. Los especímenes de concreto patrón se curaron en agua normal, mientras que en el agua para curar el bioconcreto se añadió 50 g/l de Ca (OH)<sub>2</sub> + 20 g/l

de urea, con la finalidad de mejorar la precipitación de las bacterias. Se tuvieron testigos de distintas edades, como de 7, 14, 28, 56 y 84 días.

- B) Para la **permeabilidad**, se siguieron las pautas establecidas en la norma UNE 12390-8 para llevar a cabo la evaluación de la permeabilidad del concreto, específicamente en lo que se refiere a la medición de la profundidad de penetración del agua bajo presión. Se pulieron las caras del fondo para obtener una superficie adecuada. Luego, se preparó el equipo y se aplicó una presión de 500kPa durante 72 horas a las muestras colocadas en la máquina con anillos de goma para evitar filtraciones. Posteriormente, se realizó un ensayo brasileño para partir las muestras en dos partes y se midió la profundidad máxima de la fractura, promediando los resultados obtenidos.
- C) Para el **módulo de elasticidad**, esta se determinó mediante Método estándar para la determinación del módulo de elasticidad estático y de la relación de Poisson del concreto sometido a compresión). Con la norma ASTM C-469.
- D) Para la **fisuración sin llegar a la fractura**, se realizó como si se tratase del ensayo de flexión, pero sin llegar a la fractura, cuyas muestras tenían la edad de 28 días, con la finalidad de crear una fisura para luego observar el proceso de autosellado del bioconcreto, tomando controles semanales.



**Fig. 3** Viga fisurada y marcada.



**Fig. 4** Fisura control A-A, vista por Microscopio

## Resultados

### Ensayo concreto estado fresco

#### *Ensayo de asentamiento*

Se obtuvieron los resultados del asentamiento de las tres muestras: patrón, concreto con  $1 \times 10^5$  cel/ml y concreto con  $1 \times 10^6$  cel/ml. Se pueden observar en la Tabla 3.

**Table 3** Asentamiento de diferentes muestras

Muestras	Asentamiento (´´)
Concreto patrón	4
Concreto con $1 \times 10^5$ cel/ml	3
Concreto con $1 \times 10^6$ cel/ml	2.5

### Ensayo concreto estado endurecido

#### *Resistencia a la compresión*

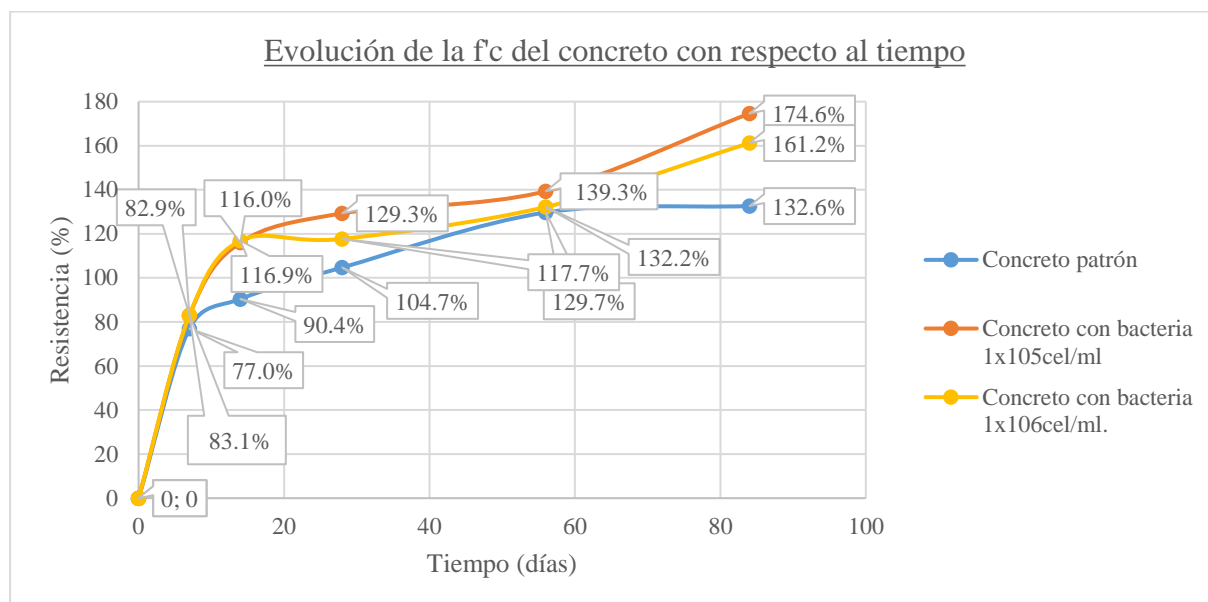
En la siguiente Tabla, se puede analizar los resultados de los ensayos de resistencia: patrón, bacteria  $1 \times 10^5$  cel/ml y con bacteria  $1 \times 10^6$  cel/ml. También se observan que estas están a diferentes edades. Cabe mencionar, que también se puede observar el porcentaje de diseño al que está a cada edad.

**Table 4** Resistencia a la compresión de todas las muestras a distintas edades.

Muestras	Tiempo (días)	Resistencia a la compresión f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje f'c de diseño (%)
Concreto patrón	7	162	77.0
	14	190	90.4
	28	220	104.7
	56	272	129.7
	84	279	132.6
Concreto con bacteria $1 \times 10^5$ cel/ml	7	174	82.9
	14	244	116.0
	28	272	129.3
	56	293	139.3
	84	367	174.6
Concreto con bacteria $1 \times 10^6$ cel/ml.	7	174	83.1
	14	246	116.9

28	247	117.7
56	278	132.2
84	339	161.2

Así bien, en la Figura 5, se puede ver cómo va evolucionando la resistencia  $f_c$  con respecto a las edades que pasa.



**Fig. 5** Evolución de la resistencia del concreto con respecto al tiempo.

### Permeabilidad

Se le realizó la prueba de profundidad de penetración de agua bajo presión, bajo la norma UNE-EN12390-8, después de 84 días. La presión aplicada fue de 500 kPa aplicada desde la base de la probeta. Los resultados dados en la Tabla 5.

**Table 5** Profundidad de penetración de agua bajo presión

Muestras	Edad	Cara	Penetración Máxima (mm)		
			Toma	Promedio	Clase de exposición
Concreto patrón	M-01	A	33.63	39.78	Cumple para elementos en masa o armados
		B	33.74		
	M-02	A	41.85		
		B	40.88		
	M-03	A	44.7		
		B	43.9		
Concreto con	M-01	A	33.39	32.88	Cumple para

bacteria 1x10 <sup>5</sup> cel/ml	M-02	B	32.83	36.07	elementos en masa o armados
		A	37.42		
		B	38.24		
	M-03	A	27.85		
		B	27.55		
		A	37.82		
Concreto con bacteria 1x10 <sup>6</sup> cel/ml.	M-01	B	36.11	Cumple para elementos en masa o armados	
		A	39.03		
	M-02	B	38.04		
		A	33.92		
	M-03	B	31.49		
		A	37.82		

### Módulo de elasticidad

Los módulos de elasticidad de las muestras de concreto, sea patrón y las de bacterias con diferentes concentraciones, se pueden observar en la Tabla 6.

**Table 6** Módulo de elasticidad de las muestras.

Muestras	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo S2 (40% $\sigma_u$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo S1 (0.000050) kg/cm <sup>2</sup>	$\epsilon$ unitaria $\epsilon_2^*(S_2)$	$E_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Promedio $E_c$ kg/cm <sup>2</sup>
Concreto patrón- F <sub>c</sub> =210 kg/cm <sup>2</sup>	275.62	110	17.00598	0.000411	258626	258616.33
	271.24	108	16.73789	0.000404	259253	
	281.28	113	17.35817	0.000419	257970	
Concreto de f <sub>c</sub> =210 kg/cm <sup>2</sup> con bacteria 1x10 <sup>5</sup> cel/ml	362.55	145	18.12317	0.000493	286142	284566.00
	363.73	145	18.18353	0.000502	281725	
Concreto de f <sub>c</sub> =210	369.02	148	18.4461	0.000502	285831	277683.67
	336.17	134	18.47249	0.000464	280433	
	332.78	133	18.33646	0.000469	274152	

kg/cm <sup>2</sup> con					
bacteria					
1x10 <sup>6</sup> cel/ml.	341.05	136	17.03747	0.000479	278466

*Fisuración sin llegar a la fractura*

La fisura inició con los tamaños que se pueden observar en la Tabla 7. Después, se llevaron controles de diferentes edades.

**Table 7** Progreso de reparación de fisuras.

Tipo	Secciones	Inicio	Control 14 días	Control 28 días	%Recuperación
Mezcla convencional	A-A	0.35 mm	0.35 mm	0.35 mm	0.00%
	B-B	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.00%
	C-C	0.60 mm	0.60 mm	0.60 mm	0.00%
Mezcla con una concentración celular de 1x10 <sup>5</sup> cel/ml	A-A	0.55 mm	0.55 mm	0.50 mm	9.09%
	B-B	0.20 mm	0.20 mm	0.16 mm	20.00%
	C-C	0.40 mm	0.40 mm	0.20 mm	50.00%
Mezcla con una concentración celular de 1x10 <sup>6</sup> cel/ml	A-A	1.10 mm	1.10 mm	1.00 mm	9.09%
	B-B	2.05 mm	2.05 mm	1.85 mm	9.76%
	C-C	1.80 mm	1.80 mm	1.65 mm	8.33%

## Discusión

En la Tabla 1, se puede observar, que la trabajabilidad del concreto disminuye de acuerdo a la incorporación de la bacteria al concreto. La muestra patrón presenta un slump de 4 pulg, a diferencia de las concentraciones de  $1 \times 10^5$  cel/ml y  $1 \times 10^6$  cel/ml, que bajan su valor a mayor concentración de bacterias, con slump de 3 y 2.5 pulgadas, respectivamente.

Ahora bien, para las propiedades del concreto en su estado endurecido, se puede analizar en la Tabla 4, que el crecimiento de la resistencia a la compresión de la muestra con  $1 \times 10^6$  cel/ml de concentración bacteriana para los 7 días y 14 días, con 83.1% y 116.9%, respectivamente, supera a las muestras anteriores. Sin embargo, a partir de los 28 días, el concreto con la concentración de  $1 \times 10^5$  cel/ml gana en cuanto % de  $f'_c$  a los anteriores, creciendo de manera rápida y a grandes porcentajes, [18], nos dice que esto puede darse que la mejora de la resistencia a la compresión del concreto que contiene bacterias se debe a la formación de colonias de bacterias y la precipitación de calcita en el concreto que podría haber rellenado los huecos mejorando así la densidad y la resistencia a la compresión. [19] afirma que la resistencia con concentraciones de  $10^4$ ,  $10^5$ , y  $10^6$  cel/ml de *Bacillus megaterium* a los 28 días, observa un crecimiento de 4.9%, 11.3% y 6.4% de la mezcla patrón. Para la presente investigación, estos resultados serían menores, debido a que el concreto con las bacterias en esta investigación aumentan en un 24.6% y 13%, superando a los resultados de [19].

En el efecto de absorción del agua que contienen las muestras, en la Tabla 5, se puede observar que, tras la realización del ensayo, que la muestra de concreto con  $1 \times 10^5$  cel/ml de concentración bacteriana tiene menor absorción del agua con 32.88 mm, siendo la mejor de las muestras. La deposición de una capa de cristales de calcita cerca de las células y la superficie del concreto bacteriano resultó en una menor absorción de agua en comparación con el concreto convencional [20], siendo esta la responsable de los resultados. Sin ser la concentración mayor, pretende a ser la concentración óptima. Los resultados de las pruebas revelaron que el agua la absorción del concreto controlado se ha reducido significativamente mediante el empleo de bacterias en la matriz del concreto [21].

Como se viene esperando, en cuando al Módulo de la Elasticidad de las muestras realizadas, el concreto con  $1 \times 10^5$  cel/ml de concentración bacteriana contiene un mayor resultado, con  $284566.00 \text{ kg/cm}^2$ . Esto se puede analizar en la Tabla 6. La comparación que se tiene con [19] es que el máximo módulo de elasticidad es de 29.5GPa, lo cual es un resultado alto comparado al de esta investigación con tan solo 27.91 GPa.

Por último, en cuanto a la propiedad autorreparable del concreto, se pueden determinar en la Tabla 7, el progreso que se obtuvo de las muestras, siendo la que mayor %de reparación a los 28 días tiene. La muestra de  $1 \times 10^5$  cel/ml muestra una mejoría a los 28 días, reparando hasta un 50 por ciento de la sección C-C de la viga de concreto.

## Conclusiones

Se realizaron investigaciones en este estudio para analizar cómo la solución bacteriana de *Bacillus megaterium* afecta las propiedades mecánicas y la capacidad de absorción de agua del concreto. A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio, se puede concluir lo siguiente con respecto a esta investigación:

La incorporación de la Bacteria *megaterium* disminuye la trabajabilidad mientras se le presente mayor concentración.

La resistencia a la compresión de la muestra de concreto con la bacteria, indica que es capaz de rellenar los poros haciendo que esta aumente a significativamente a partir de los 28 días, siendo la muestra de  $1 \times 10^5$  cel/ml la que mayor  $f^c$  presenta.

La absorción del agua de las mezclas con bacterias demuestra que son menores a comparación del concreto convencional, reducido debido al llenado de los huecos por las bacterias. La muestra con  $1 \times 10^5$  cel/ml presenta menor absorción dentro de las mezclas de concreto con bacterias.

El mayor módulo de elasticidad también lo presenta la mezcla de concreto con bacteria de  $1 \times 10^5$  cel/ml.

En cuanto a la reparación de las fisuras, a los 28 días, la mejor concentración de bacterias presenta resultados satisfactorios de hasta un 50% de su fisura original.

## Referencias

- [1] J. N. Akhtar, R. A. Khan, R. A. Khan, M. N. Akhtar y J. K. Nejem, "Influence of Natural Zeolite and Mineral additive on Bacterial Self-healing Concrete: A Review", *Civil Eng. J.*, vol. 8, n.º 5, pp. 1069–1085, mayo de 2022. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.28991/cej-2022-08-05-015>
- [2] E. Alemayehu y B. Lennartz, "Virgin volcanic rocks: Kinetics and equilibrium studies for the adsorption of cadmium from water", *J. Hazardous Mater.*, vol. 169, n.º 1-3, pp. 395–401, septiembre de 2009. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.109>
- [3] J. Xie, W. Chen, J. Wang, C. Fang, B. Zhang y F. Liu, "Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete", *Construction Building Mater.*, vol. 226, pp. 345–359, noviembre de 2019. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>
- [4] A. Arcoya, J. A. González, G. Llabre, X. L. Seoane y N. Travieso, "Role of the counteractions on the molecular sieve properties of a clinoptilolite", *Microporous Mater.*, vol. 7, n.º 1, pp. 1–13, agosto de 1996. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/0927-6513\(96\)00022-3](https://doi.org/10.1016/0927-6513(96)00022-3)
- [5] P. J. Leggo, B. Ledésert y G. Christie, "The role of clinoptilolite in organo-zeolitic-soil systems used for phytoremediation", *Sci. Total Environ.*, vol. 363, n.º 1-3, pp. 1–10, junio de 2006. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.055>
- [6] S. Saifee, D. Lad y J. Juremalani, "Critical appraisal on bacterial Concrete", *J. Mech. Civil Eng.*, vol. 1, pp. 10–14, 2015.
- [7] N. Mokhtar, M. A. Megat Johari, H. A. Tajarudin, A. A. Al-Gheethi y H. A. Algaifi, "A sustainable enhancement of bio-cement using immobilised *Bacillus sphaericus*: Optimization, microstructural properties, and techno-economic analysis for a cleaner production of bio-cementitious mortars", *J. Cleaner Prod.*, vol. 318, p. 128470, octubre de 2021. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128470>
- [8] T. H. Nguyen, E. Ghorbel, H. Fares y A. Cousture, "Bacterial self-healing of concrete and durability assessment", *Cement Concrete Composites*, vol. 104, p. 103340, noviembre de 2019. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340>

- [9] A. Manikandan y A. Padmavathi, "An experimental investigation on improvement of concrete serviceability by using bacterial mineral precipitation", *Int. J. Res. Scientific Innov.*, vol. 2, n.º 3, pp. 46–49, 2015.
- [10] N. Hosseini Balam, D. Mostofinejad y M. Eftekhari, "Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete", *Construction Building Mater.*, vol. 145, pp. 107–116, agosto de 2017. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.003>
- [11] R. A. Khushnood, Z. A. Qureshi, N. Shaheen y S. Ali, "Bio-mineralized self-healing recycled aggregate concrete for sustainable infrastructure", *Sci. Total Environ.*, vol. 703, p. 135007, febrero de 2020. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135007>
- [12] M. Gao *et al.*, "Immobilized bacteria with pH-response hydrogel for self-healing of concrete", *J. Environmental Manage.*, vol. 261, p. 110225, mayo de 2020. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110225>
- [13] X. Zhang, X. Fan, M. Li, A. Samia y X. ( Yu, "Study on the behaviors of fungi-concrete surface interactions and theoretical assessment of its potentials for durable concrete with fungal-mediated self-healing", *J. Cleaner Prod.*, vol. 292, p. 125870, abril de 2021. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125870>
- [14] J. Xu y X. Wang, "Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material", *Construction Building Mater.*, vol. 167, pp. 1–14, abril de 2018. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.020>
- [15] P. Jongvivatsakul, K. Janprasit, P. Nuaklong, W. Pungrasmi y S. Likitlersuang, "Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method", *Construction Building Mater.*, vol. 212, pp. 737–744, julio de 2019. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035>
- [16] C. Sotomayor, "Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto", 2020, <http://www.consultcreto.com/pdf/entendiendo.pdf>.
- [17] "Bacillus megaterium derivado de ATCC® 9885™\*". Microbiologics. <https://www.microbiologics.com/0116P> (accedido el 20 de mayo de 2023).
- [18] N. Chahal, R. Siddique y A. Rajor, "Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete", *Construction Building*

*Mater.*, vol. 28, n.º 1, pp. 351–356, marzo de 2012. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>

[19] M. P. Smitha, D. Suji, M. Shanthi y A. Adesina, "Application of bacterial biomass in biocementation process to enhance the mechanical and durability properties of concrete", *Cleaner Mater.*, vol. 3, p. 100050, marzo de 2022. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100050>

[20] S. A. Kadapure, G. S. Kulkarni y K. B. Prakash, "Study on properties of bacteria-embedded fly ash concrete", *Asian J. Civil Eng.*, vol. 20, n.º 5, pp. 627–636, mayo de 2019. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00127-z>

[21] A. K. Parashar, N. Gupta, K. Kishore y P. A. Nagar, "An experimental investigation on mechanical properties of calcined clay concrete embedded with bacillus subtilis", *Mater. Today: Proc.*, septiembre de 2020. Accedido el 20 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.031>

## Anexos

## Anexo 1: Ficha Técnica de Bacteria - Empresa de Laboratorios Gen Lab.



Jr. Cápac Yupanqui N° 2434 Lince – Lima 14 Perú  
 ☎ 203-7500 Telefax: (51-1) 203-7501  
 e-mail: [ventas@genlabperu.com](mailto:ventas@genlabperu.com)  
[www.genlabperu.com](http://www.genlabperu.com)



## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS



Estándar de Referencia Microbiológico Cualitativo KWIK-STIK™	
KWIK-STIK™ son estándares microbiológicos (cepas) cualitativas derivadas de la ATCC.	
<b>PRESENTACIÓN</b>	Tambor de 2 dispositivos: Cada dispositivo contiene: 1 pellet liofilizado + 1 hisopo inoculador + 1 ampolla con fluido hidratante.
<b>MARCA</b>	Microbiologics®
<b>PROCEDENCIA</b>	EE.UU.
CARACTERÍSTICAS	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño "todo en uno" reduce contaminación.</li> <li>• Microorganismo liofilizado (pellet) de disolución instantánea.</li> <li>• Microorganismo liofilizado de tercer pasaje.</li> <li>• Amplia variedad de microorganismos disponibles.</li> <li>• Etiqueta de identificación despegable en cada dispositivo.</li> <li>• Para aseguramiento de la calidad, validación de técnicas y control de calidad en investigación.</li> <li>• Almacenamiento en refrigeración (de 2-8°C).</li> <li>• Fecha de vencimiento no menor de 6 meses.</li> <li>• Fabricante en cumplimiento con:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ ISO 13485.</li> <li>○ ISO/IEC 17025.</li> <li>○ ISO 17034.</li> <li>○ FDA (Establecimiento Registrado).</li> <li>○ CE Mark.</li> </ul> </li> </ul>
APLICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para fines de cultivos.</li> <li>• Control de calidad de rutina.</li> <li>• Verificación y validación.</li> <li>• Control de calidad de sistemas de identificación y kits de ensayo.</li> <li>• Control de calidad a la prueba de sensibilidad a los antimicrobianos.</li> </ul>	
INCLUYE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instrucciones de uso ilustradas.</li> <li>• Certificado de análisis detallado:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Características microscópicas.</li> <li>○ Características macroscópicas.</li> <li>○ Identificación microbiana a nivel proteómica con la técnica MALDI-TOF.</li> </ul> </li> <li>• Hoja de datos de seguridad.</li> </ul>	

Fuente: GenLab

Anexo 2: Certificado de calidad del cemento Portland Tipo I.



Pacasmayo

**CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.**  
Calle La Colonia Nro. 150 Urb. El Vivero de Monterrico Santiago de Surco - Lima  
Carretera Panamericana Norte Km. 666 Pacasmayo - La Libertad  
Teléfono 317 - 6000



G-CC-F-04  
Versión 04

Planta: Pacasmayo

**Cemento Portland Tipo I**

12 de agosto de 2022

Periodo de despacho 01 de julio de 2022 - 31 de julio de 2022

**REQUISITOS NORMALIZADOS**

NTP 334.009 Tablas 1 y 3

**QUÍMICOS**

Requisitos	Especificación	Resultado de ensayos
MgO (%)	6.0 máx.	2.0
SO <sub>3</sub> (%)	3.0 máx.	2.8
Pérdida por ignición (%)	3.5 máx.	2.8
Residuo insoluble (%)	1.5 máx.	0.6

**FÍSICOS**

Requisitos	Especificación	Resultado de ensayos
Contenido de aire del mortero (volumen %)	12 máx.	8
Superficie específica (cm <sup>2</sup> /g)	2600 mín.	4030
Expansión en autoclave (%)	0.80 máx.	0.05
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	A	3.11
Resistencia a la compresión (MPa)		
1 día	A	15.8
3 días	12.0 mín.	28.1
7 días	19.0 mín.	34.7
28 días *	28.0 mín.	43.3
Tiempo de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	45 mín.	109
Final	375 máx.	230

A No específica

\* Requisito opcional

El (a) RC 28 días corresponde al mes de junio del 2022

Certificamos que el cemento descrito arriba, al tiempo de envío, cumple con los requisitos químicos y físicos de la NTP 334.009.2020.

*Ing. Dennis R. Rodas Lavado*

Superintendente de Control de Calidad

Solicitado por:

Distribuidora Norte Pacasmayo S. R. L.

*Fuente: Distribuidora de materiales.*

*Anexo 3: Características de Microscopio Para Medir Fisuras Del Concreto.*

### Microscopio Para Medir Fisuras Del Concreto



**Rango de aumento: 40**

**Uso: De bolsillo**

**Tipo de objetivo: Fisuras**

**Cabezal: Monocular**

**Número de objetivos: 1**

**Tipo de zoom: Manual**

- Visor provisto de regla milimetrada para mejor precisión
- Iluminación LED para lugares con poca visibilidad
- Funciona con baterías 2xAA

*Fuente: Pag. Web de compras mercado libre.*