

Aplicación de Bacillus Subtilis para modificar las propiedades del concreto

Application of Bacillus subtilis to modify the properties of concrete

RECIBIDO: NOVIEMBRE 3 DE 2025 | REVISADO: DICIEMBRE 3 DE 2025 | ACEPTADO: DICIEMBRE 23 DE 2025

MÁXIMO EDILBERTO HUAYANCA-HERNÁNDEZ ¹

ABSTRACT

This study evaluates the effect of adding unencapsulated Bacillus subtilis (BS) bacteria in various concentrations (0, 187, and 312 ml/m³) on the physical, mechanical, and self-repair properties of concrete. It is an applied, quantitative study with a quasi-experimental design. National Bacillus Subtilis (BSN) and Imported Bacillus Subtilis (BSI) were used, and the concrete was designed for a strength of 210 kg/cm². The results showed that incorporating BS significantly modifies the behavior of concrete. The dosage of 187 ml/m³ (milliliters per cubic meter of concrete) of BSI increased settlement by 66.67% compared to the control mixture. Compressive strength at 28 days improved by 25.60% with BSI and 14.42% with BSN, attributable to calcium carbonate precipitation induced by bacterial activity. Considering the self-repair of the mixture with 312 ml/m³ of BSN, whose initial average width and length were 0.45 mm and 6.47 cm, respectively, there was a reduction in length of 1.32 cm on average in five of sixty specimens produced. At 365 days, demonstrating the partial viability of using non-encapsulated BS to produce self-repairing concrete. The use of BS in a proportion of 187 ml/m³ is recommended to improve workability and mechanical strength, and concentrations higher than 312 ml/m³ should be explored to further investigate self-repairing capacity.

Keywords: Concrete, biotechnology, construction materials, civil engineering, materials technology.

RESUMEN

Este estudio evalúa el efecto de adicionar la bacteria Bacillus subtilis (BS) sin encapsular, en diversas concentraciones (0, 187 y 312 ml/m³), sobre las propiedades físicas, mecánicas y autorreparación del concreto. Es una investigación aplicada, cuantitativa con diseño cuasiexperimental. Se empleó Bacillus subtilis nacional (BSN) y Bacillus subtilis importado (BSI), el concreto fue diseñado para una resistencia de 210 kg/cm². Los resultados evidenciaron que incorporar BS modifica significativamente el comportamiento del concreto, la dosificación de 187 ml/m³ (mililitros por metro cúbico de concreto) de BSI incrementó el asentamiento en un 66.67% respecto a la mezcla control, la resistencia a la compresión a los 28 días mejoró en un 25.60% con BSI y un 14.42% con BSN, atribuible a la precipitación de carbonato de calcio inducida por la actividad bacteriana. Considerando la autorreparación de la mezcla con 312 ml/m³ de BSN, cuyo ancho y largo promedio inicial fue de 0.45 mm y 6.47 cm, respectivamente, evidenció una reducción en el largo 1.32 cm en promedio, en cinco de sesenta especímenes elaborados. A los 365 días, demostrando la viabilidad parcial de usar BS no encapsulados para elaborar concreto autorreparable. Se recomienda el uso de BS en una proporción de 187 ml/m³ para mejorar la trabajabilidad, resistencia mecánica y explorar concentraciones superiores a 312 ml/m³ para seguir explorando la capacidad de autorreparación.

Palabras clave: Hormigón, biotecnología, materiales de construcción, ingeniería civil, tecnología de materiales.

¹Filiación institucional: Universidad Nacional Federico Villarreal, Escuela Universitaria de Posgrado, Lima, Perú.

Correspondencia: maxhuay62@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0954-8243>

DOI: <https://doi.org/10.24039/rcv20251322032>

Introducción

Cuando la economía crece, se produce el incremento de servicios y bienes producidos (Erazo, 2022), durante décadas recientes el Perú ha venido experimentando un destacado crecimiento macroeconómico, siendo un referente en América Latina, por la implementación de políticas de desarrollo y una gestión económica para crecer y controlar sus gastos (Flores & Tolentino, 2023); en tal sentido el sector construcción viene impulsando la economía y el empleo, enfrentando retos ambientales por el impacto ecológico que ocasiona producir concreto utilizando cemento, además del problema generalizado de las fisuras, buscando una solución sostenible, el concreto autorreparable surge como alternativa innovadora empleando bacterias incorporadas que forman calcitas, permitiendo su autorreparación (Asgharpour et al., 2024).

Elaborar concreto genera emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y consume recursos naturales (Mohammadi & Ramezani pour, 2023). Asimismo, la frecuente fisuración reduce su vida útil y calidad con el incremento de costos por la reparación necesaria (Hadhinata et al., 2022). También la adición de BS produce un sellado significativo (Quintanilla Anyaipoma, 2025), lo que justifica investigar sus efectos.

El denominado “concreto verde”, constituye una alternativa sustentable fundamentada en la adición de componentes y tecnologías que reducen su huella ambiental (Jing et al., 2025). En particular el uso de bacterias del género *Bacillus*, como BS, ha demostrado ser eficaz en la precipitación de calcita de calcio permitiendo la reparación autónoma de microfisuras.

Ibrahim et al., (2025), en su artículo científico “Influencia de la adición de la bacteria BS en las propiedades mecánicas y químicas del mortero de cemento”, cuyo objetivo fue investigar cómo afecta las propiedades del mortero, para lo cual aisló 48 cepas bacterianas, las que fueron cultivadas, añadiéndose al concreto bacterias en 5% y 10% en peso, los resultados evidenciaron el incremento en la resistencia a la compresión después de 28 y 56 días en comparación con la mezcla control, respaldando el uso de bacterias en la elaboración de materiales de construcción respetuosos con el medio ambiente.

Sukumaran et al., (2025), en su artículo “Hormigón bacteriano: el futuro de las infraestructuras autocurativas y sostenibles”, cuyo objetivo fue investigar la mejora de la durabilidad en el concreto y propiedades mecánicas, incluyendo bacterias como *Bacillus Licheniformis*, *Bacillus Flexus*, *Pseudomonas stutzeri*, *Escherichia coli* y BS; específicamente evaluó la resistencia a la tracción, compresión, durabilidad y resistencia a agentes

ambientales; con buenos resultados, incluyó la prueba de asentamiento demostrando que las cepas bacterianas dan mayores valores de asentamientos mejorando su rendimiento en estado fresco, lo que contribuye a desarrollar una construcción con mayor sostenibilidad, otorgando significativa mejora en la durabilidad de las construcciones.

Akindahunsi et al., (2021), examina la aplicación de células de una bacteria ureólica para aumentar la compresión del concreto, comparando concretos adicionando bacterias con los fabricados convencionalmente, elaboró probetas cúbicas de concreto con 105, 107 y 109 células/ml de bacterias además del grupo control con cero o sin bacterias, encontrando que la calcita formada por BS, en un medio adecuado con una fuente de calcio aumenta en 27%, 26%, 14% y 13% la resistencia a la compresión del concreto para una concentración de 105 células/ml, ensayados a la edad de 7, 14, 28 y 56 días, revelando que la calcita bacteriana produce mejores resultados al ensayo a la compresión que el concreto convencional.

Zamba & Mohammed, (2023), abordaron la utilización de bacterias para incrementar la durabilidad y propiedades mecánicas del concreto, investigaron el BS como bacteria incorporándola en 108 células/ml de concentración, elaboraron 66 probetas, probándose sus propiedades mecánicas a los 7, 14, 28 y 56 días, además de observar especímenes agrietados usando un microscopio óptico 3D revelando la formación de considerable depósito cristalino blanco cerrando las fisuras. Mostraron como resultado que adicionando bacterias al concreto se encuentra una mejora significativa en sus propiedades mecánicas y durabilidad, debido a que la bacteria BS genera precipitación de calcita; asimismo, los resultados de esfuerzo de compresión aumentaron en 19.55% en comparación con el grupo control a los 28 días de curado.

Mahmood et al., (2022), en la investigación publicada “Biohormigón autocurable con BS encapsulado en nanopartículas de óxido de hierro” cuyo objetivo fue investigar si el BS repara eficazmente grietas a una nano y microescala; usaron como medio de inmovilización las nanopartículas de óxido de hierro, verificaron con varias técnicas entre ellas la compresión de las muestras a los 28 días, la carga para producir la fisuración se determinó como aquella equivalente al 80% de la compresión última, resultando que la bacteria usada contribuyó a mejorar la resistencia a la compresión acelerando la curación de las grietas. Demostró que el uso de nanopartículas de óxido de hierro mantuvo vivo el BS hasta la formación de las fracturas. La formación de calcita por la actividad de la bacteria en las nano o micro fisuras producidas se

verifico por estudios micrográficos y químicos.

Tan et al., (2023) , en su trabajo de investigación “Portadores de agentes curativos en hormigón biológico autorreparable” con el fin de revisar los actuales materiales portadores de agentes biológicos en concreto autocurativo, indica que el concreto se agrieta fácilmente aumentando su permeabilidad y acelerando la corrosión, las propiedades mecánicas del concreto se pueden mejorar curando las grietas, en este sentido la aplicación de carbonato de calcio inducido por microbios viene recibiendo bastante atención; sin embargo, este agente biológico difícilmente soporta el alto contenido de álcali y calcio en el concreto, por lo que requiere protección.

La curación del concreto llamado autóloga (perteneciente a uno mismo) es el resultado de la carbonatación del Ca(OH)_2 en el mismo que no ha participado hidratándose después de agrietarse, sellando las grietas, curando micro fisuras de 60 micras (0.06 mm) como máximo. Para la protección de los agentes biológicos se viene usando polímeros orgánicos, agregados porosos, microcápsulas entre otros. Finalmente, concluye indicando que los investigadores han optimizado y probado varios portadores de agentes biológicos curativos; sin embargo, se vienen usando microcápsulas de resina epóxica, gel de silicona, partículas de arcilla expandida, espuma de poliuretano; no obstante, estos portadores pueden ser mejorados para lograr mayor profundidad y velocidad de curación.

Quintanilla Anyaipoma, (2025), en su tesis para obtener el grado de doctor en ingeniería civil titulada “Influencia de la adición de bacterias BS en la autorreparación de grietas del concreto”, cuyo objetivo fue evaluar cómo influye el BS protegido y no protegido en el autocurado de grietas y el aumento de la resistencia a la carga de compresión del concreto, partiendo de un análisis documental de experimentos realizados; el método utilizado fue documental, preseleccionando 19 artículos de 250 encontrados; encontrando en promedio 0.378 mm, como sellado autónomo en bacterias aplicadas directamente y un incremento de 14.90% en la resistencia a la compresión para bacterias aplicadas directamente y de 0.65 mm como sellado autónomo y un 17.16% de mayor resistencia a la compresión para bacterias con protección, concluyendo que adicionar BS produce un significativo sellado autógeno.

En resumen, la presente investigación cuantitativa está orientada a encontrar la influencia en las propiedades del concreto tradicional aplicando BS .

Método

Se consideró apropiado realizar una investigación con enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con alcance explicativo buscando la relación causal entre las variables estudiadas. Se empleo un diseño cuasiexperimental. La finalidad fue determinar la modificación de las propiedades del concreto por la adición de BS sin encapsular,

Mediante este enfoque cuasiexperimental adecuado para evaluar los efectos de la intervención en los grupos de estudio sin asignación aleatoria de los participantes (Hernandez-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Se manipuló la variable independiente correspondiente a la cantidad y tipo de BS añadida a la mezcla para verificar su efecto en la variable dependiente identificada como las propiedades del concreto como la resistencia a la compresión, el asentamiento o slump, el contenido de vacíos y la capacidad de cierre de fisuras, la investigación se apoyó en mediciones numéricas derivadas de procedimientos normalizados y se estructuró con el objeto de generar resultados susceptibles de aplicación en el ámbito de la ingeniería civil.

La muestra fue igual a la población, estando conformada por las probetas y los especímenes elaborados, seleccionados a través de un muestreo por conveniencia considerando las limitaciones para realizar el muestreo aleatorio probabilístico, elaborándose 60 probetas cilíndricas de 6” x 12” ; 12 sin aplicación llamada grupo control o sin tratamiento, 12 con 187 ml/m³ de BSN (tratamiento 01), 12 con 312 ml/m³ de BSN (tratamiento 02), 12 con 187 ml/m³ de BSI (tratamiento 03) y 12 con 312 ml/m³ de BSI (tratamiento 04); se midieron las propiedades del concreto fresco como temperatura, porcentaje de vacíos y el asentamiento, se evaluó también la resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días de curado.

El BSN usado fue Biosafe empleado generalmente para combatir enfermedades fúngicas en la agricultura con una concentración de 2×10^4 UFC/ml (informe emitido por el laboratorio de ecología microbiana y biotecnología de la Universidad Nacional Agraria La Molina) y BSI adquirido al proveedor Gen Lab del Perú (ATCC*11774, presentación en tambor de 6 cepas liofilizadas, las mismas que fueron activadas en laboratorio para su utilización), con una concentración de 2×10^7 UFC/ml (informe emitido por el laboratorio de microbiología y parasitología de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica); además se fabricaron 60 especímenes cilíndricos pequeños (de 102 mm de diámetro por 33 mm de altura), divididos en los mismos grupos antes mencionados para verificar

la autorreparación, se generaron fisuras por medios físicos a las 24 horas de su elaboración, las cuales fueron observadas hasta los 365 días, considerando que a los 28 días no se evidenciaba cerramiento de fisuras; se utilizó el cono de Abrams, para medir el asentamiento; equipo medidor de contenido de aire tipo B (de presión), para medir el porcentaje de aire; la prensa hidráulica, para medir la resistencia a la compresión, además de un estereomicroscopio, para el control de fisuras.

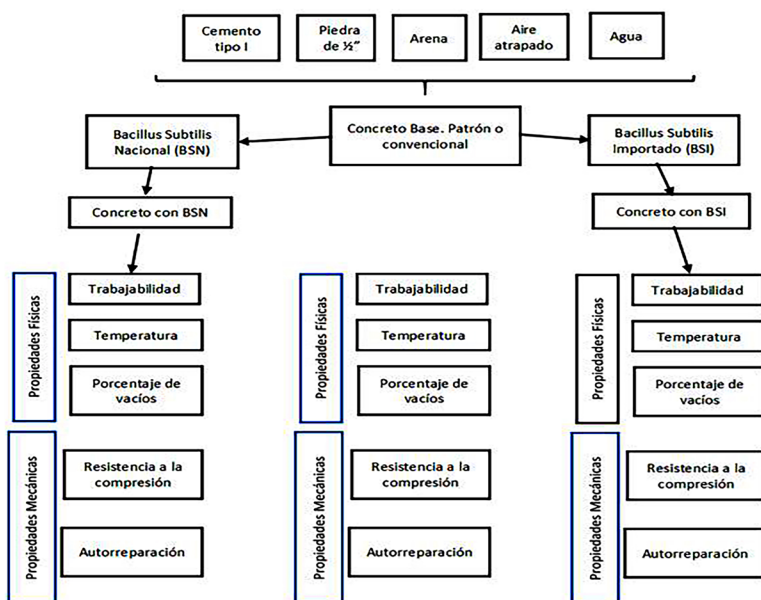
El estudio se dividió en las siguientes etapas, elaboración de probetas, medición de las propiedades físicas del concreto, ensayo de probetas, control de la evolución de fisuras y análisis de datos. En la primera etapa se elaboraron las probetas de concreto utilizando agregados de la provincia de Ica, cemento tipo I, agua

potable con las respectivas dosis de BS. Posteriormente en la segunda etapa se midieron las propiedades del concreto fresco como el asentamiento, contenido de vacíos; en la tercera etapa, se ensayaron probetas a diferentes edades para determinar la evolución de la resistencia a la compresión hasta los 28 días de curado. En la cuarta y última etapa se procedió a medir el comportamiento de las fisuras a los 365 días, finalmente se realizó el análisis estadístico elaborándose gráficos y cuadros comparativos.

El procedimiento para desarrollar la investigación se detalla en la figura 1, resumen las principales etapas y secuencia lógica de las actividades realizadas durante la investigación.

En la presente investigación se integró el uso de Chat GPT, un modelo de lenguaje de IA desarrollado

Figura 1
Procedimiento desarrollado en la investigación cuasiexperimental



por OpenAI, para generar ideas, consulta y apoyo con la finalidad de mejorar la redacción y el lenguaje, esta integración coincide por lo señalado por Toledo-Espinoza (2024), quien destaca el potencial de dicha herramienta como apoyo en la elaboración de textos académicos.

Resultados

Con el propósito de evaluar la influencia de BS sobre la trabajabilidad del concreto fresco se analizaron los valores de asentamiento presentados en las figuras 2 y 3, ambas ilustran que el asentamiento de la mezcla en estado fresco sin aplicar BS fue de 1.50 pulgadas, para

las mezclas con aplicación de BSN y BSI se observó un incremento en el asentamiento con aplicación de 187 ml/m³, en sentido contrario se pudo observar un descenso con la aplicación de 312 ml/m³. Considerando la prueba estadística no paramétrica H de Kruskal Wallis resultó que incorporar BS en las proporciones indicadas influye sobre el asentamiento de la mezcla de concreto.

Para verificar la influencia de incorporar BS al concreto sobre el porcentaje de vacíos del concreto tradicional con resistencia a la compresión de 210 kg/m², se presentan las figuras 4 y 5, estas figuras muestran que el porcentaje de vacíos disminuye para las proporciones de 187 ml/m³ tanto de BSN como para el BSI, la misma prueba mencionada en el párrafo anterior

mostró evidencia estadística significativa que respalda la hipótesis de igualdad de promedios de los porcentajes de vacíos obtenidos para las mezclas con o sin adicionar BS.

Para analizar como varía la resistencia a la compresión del concreto al aplicar BS en los mismos grupos de estudio, se presenta la figura 6, evidenciándose que a los 28 días el promedio de resistencia obtenida con 187 ml/m³ de BSN fue de 12.74% mayor que el de la mezcla control, el análisis de varianza (ANOVA) determinó que las medias de los grupos no son iguales para los valores hallados de resistencia a la compresión en el concreto, aplicando la prueba Post Hoc de Tukey podemos

afirmar que los resultados obtenidos para el promedio de resistencia a la compresión indican diferencias estadísticamente significativas entre aplicar BSN o BSI con el grupo control, de otra manera no sucede lo mismo cuando comparamos los grupos con aplicación de BSN y BSI.

Para explicar la influencia que tiene la dosificación de concreto con BS en las proporciones antes indicadas sobre la capacidad de autorreparación, encontramos que la aplicación de 312 ml/m³ de BSN presentó una autorreparación en cinco de los sesenta especímenes elaborados.

Figura 2
Gráfico para Slump o asentamiento con BS

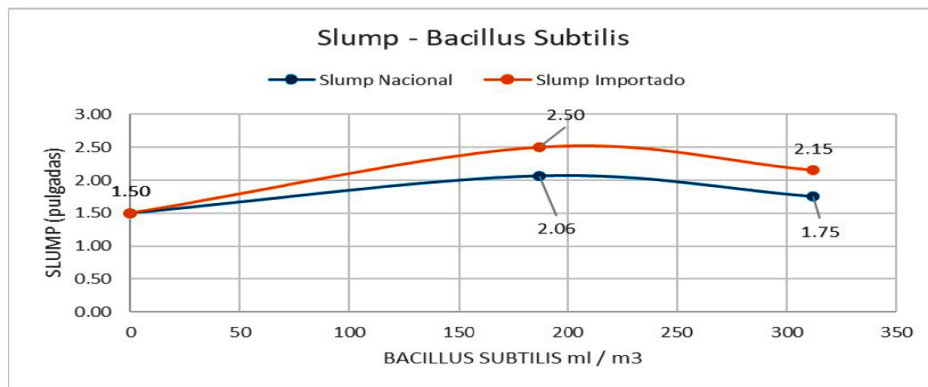


Figura 3
Gráfico para muestras independientes de Slump con BS./

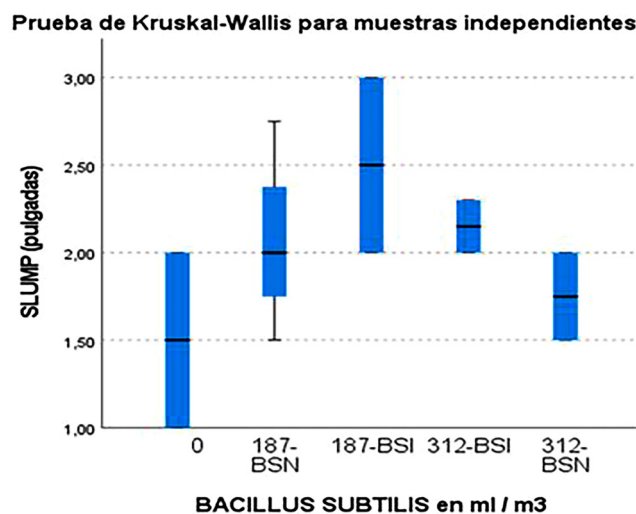


Figura 4
Gráfico para porcentajes de vacios con BS

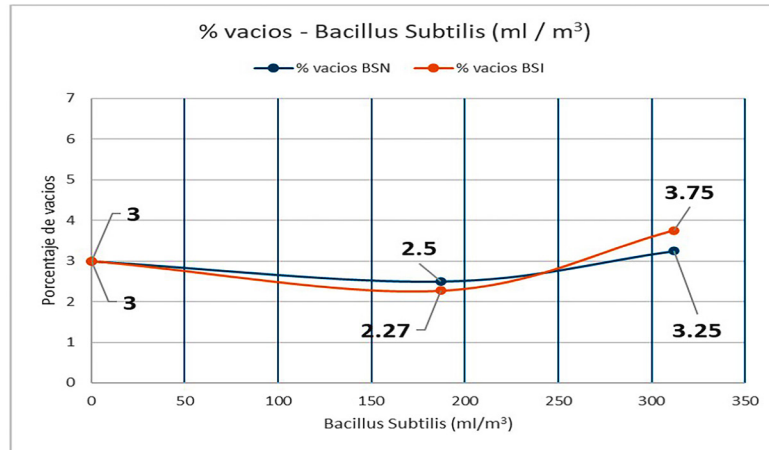


Figura 5
Gráfico para muestras independientes con BS

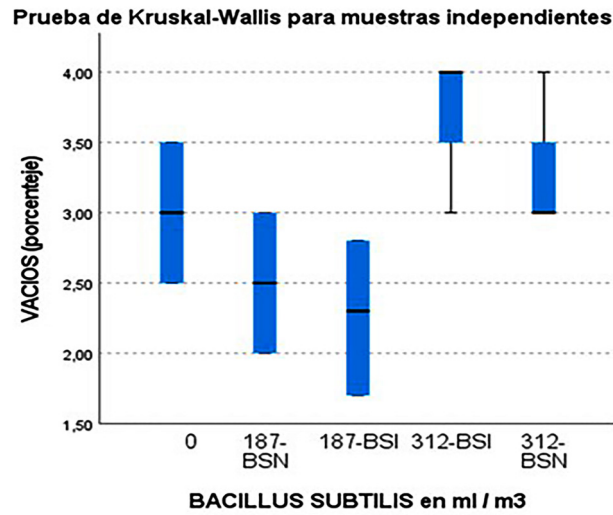
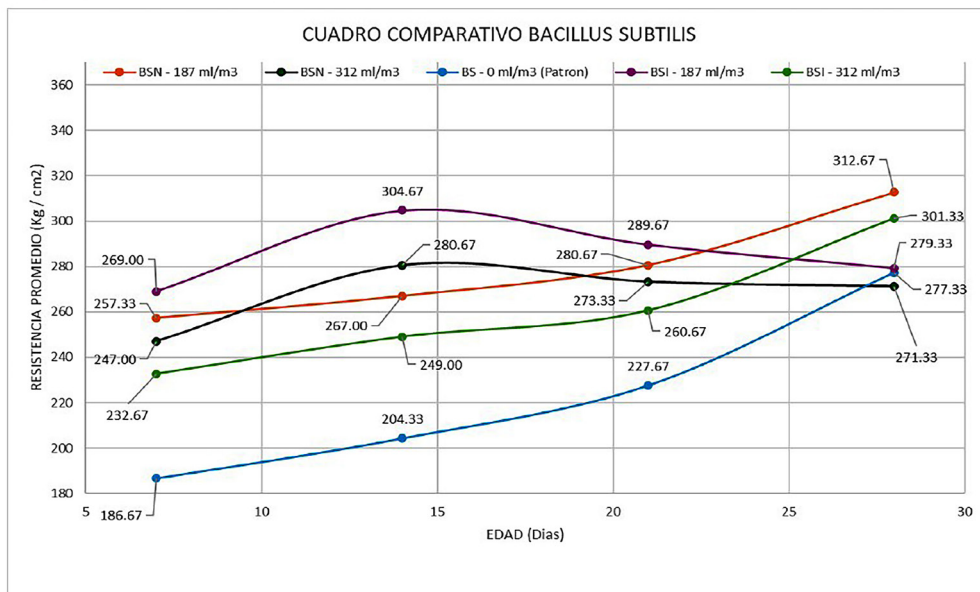


Figura 6
Gráfico para resistencia a la compresión del concreto con BS.



Discusión

La presente investigación logra establecer relaciones de causa y efecto al aplicar BSN y BSI sin encapsular en cantidades de 187 ml/m³ y 312 ml/m³, en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Del mismo modo, se demuestra un significativo impacto positivo en las propiedades físicas y mecánicas del concreto tradicional elaborado, del mismo modo Ibrahim et al., (2025) encontró que la resistencia a la flexión y compresión con aplicación del BS, se incrementa después de 28 y 56 días al adicionar bacterias en 5% y el 10% en peso. Una concentración bacteriana del 5% logro mejorar significativamente la resistencia.

Cuando se aplicó 187 ml/m³ de BSI los valores del asentamiento se incrementaron en 66.67% respecto a la mezcla control, en cambio cuando aplicamos 312 ml/m³ se reduce el incremento a 43.33%, también Sukumaran et al., (2025) encontró que añadir bacterias mejora la construcción sostenible con un incremento de la trabajabilidad, el aumento lo atribuye a la actividad microbiana mejorando la hidratación.

En los ensayos realizados se pudo observar que al aplicar 187 ml/m³ de BSI, el porcentaje de vacíos disminuye en un 24.33%, pero no se encontró evidencia estadística significativa que respalde esta diferencia. Cuando aplicamos 187 ml/m³ de BSN la resistencia a la compresión a los 28 días se incrementó en 12.74% respecto al concreto sin aplicación alguna, igualmente cuando aplicamos 312 ml/m³ de BSI este incremento fue de 8.65%, en el mismo sentido Akindahunsi et al., (2021), reportó incrementos de hasta un 27% en la resistencia a la compresión para concentraciones de 10⁵ células/ml ensayados a los 7, 14, 28 y 56 días, atribuible a que la calcita bacteriana mejora la resistencia, Zamba & Mohammed, (2023) en su investigación sobre la mejora de las propiedades del concreto adicionando bacterias al concreto encontró mejora significativa en las propiedades mecánicas en el orden del 19.55% a los 28 días de edad al compararlo con el grupo control.

Sobre la autorreparación, encontramos diferencia estadística significativa con la aplicación de 312 ml/m³ de BSN (concentración de 2 x 10⁴ UFC/ml) en comparación con la mezcla patrón a una edad de 365 días solo en cinco especímenes de los sesenta elaborados con BS (12 del grupo control, 12 con 187 ml/m³ de BSI, 12 con 312 ml/m³ de BSI, 12 con 187 ml/m³ de BSI y 12 con 312 ml/m³ de BSI), lo que indica que esta proporción contribuye a la probabilidad que haya bacterias activas de carbonato de calcio, las que no evidenciaron cerramiento de fisuras a edades de 28 y 56 días, si lo hicieron a los 365 días, en concordancia con Tan et al., (2023) quien

señala la necesidad de mejorar portadores para lograr mayor velocidad de curación y profundidad de la fisura, lo señalado en este estudio también coincide con lo señalado por Zamba & Mohammed, (2023) cuando afirma que adicionar bacterias al concreto mejora las propiedades mecánicas y durabilidad por la generación de calcita.

Conclusión

Se observó un incremento promedio del 66.67% en el asentamiento del concreto al aplicar 187 ml/m³ de BSI en comparación con la mezcla control, lo que sugiere una modificación de la trabajabilidad atribuible a la presencia de bacterias en la mezcla, al incrementar la dosificación a 312 ml/m³, el incremento en el asentamiento se redujo a 43.33%.

La mezcla con 187 ml/m³ de BSI presentó una disminución del 24.33% en el porcentaje de vacíos respecto a la mezcla control, sin embargo, el análisis estadístico indicó que no existen diferencias significativas entre las distribuciones de vacíos para las mezclas con incorporación de bacterias y aquellas sin adición de BSI.

El análisis estadístico evidenció diferencias significativas en la resistencia a la compresión entre el concreto con adición de BS y el grupo control. En particular la resistencia promedio obtenida a los 28 días con 187 ml/m³ de BSN fue de 12.74 % por encima a la del grupo control, el promedio encontrado a los 28 días con la aplicación 312 ml/m³ de BSI fue 8.65% mayor que el grupo control. Estos hallazgos pueden atribuirse a la producción de carbonato de calcio (CaCO₃) lo que contribuye a la densificación de la microestructura del concreto.

En cuanto a la autorreparación se encontró diferencia estadística significativa entre el grupo control y el grupo con 312 ml/m³ de BSN a la edad de 365 días.

Contribuciones: Máximo Edilberto Huayanca Hernández (autor principal único). Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción borrador original, redacción revisión y edición.

Fuente de financiamiento: Autofinanciada.

Conflicto de interés: El autor declara respetar los principios éticos de investigación y estar libre de cualquier conflicto de intereses

El presente artículo forma parte de una tesis.

Referencias

- Akindahunsi, A. A., Adeyemo, S. M., & Adeoye, A. (2021). The use of bacteria (*Bacillus subtilis*) in improving the mechanical properties of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00112-7>
- Asgharpour, F., Çakiral, K., & Marar, K. H. (2024). Harnessing microbes for self-healing concrete – A review. *Research on Engineering Structures & Materials*, 10(4), 1565-1588.
- Erazo, R. R. (2022). Modelos de crecimiento económico, una evaluación analítica macroeconómica. *Cátedra Villarreal Posgrado*, 1(1), 57-67. <https://doi.org/10.24039/rcvp2022111640>
- Flores, V. A. A., & Tolentino, D. C. (2023). Evaluación geotécnica de la cantera Lliclao en la construcción de una carretera en Pasco. *Cátedra Villarreal*, 11(1), 75-88. <https://doi.org/10.24039/rcv20231111519>
- Hadhinata, C., Amira, A., Nurjanna, A., Indrasara, A. R., Hasanah, N., & Pratama, M. M. A. (2022). Multi-perspective review on application of self-healing concrete and its prospect in Asia. *AIP Conference Proceedings*, 2489(1), 030028. <https://doi.org/10.1063/5.0093875>
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera edición). McGrawHill.
- Ibrahim, O. A., Mohamed, A. I. H., Ibrahim, W., Abd-Al Ftah, R. O., Hamed, S. R., & Abd-Elnaby, S. F. M. (2025). The influence of adding *B. subtilis* bacteria on the mechanical and chemical properties of cement mortar. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43088-024-00591-w>
- Jing, Y., Lee, J. C., Moon, W. C., Ng, J. L., Yew, M. K., & Jin, Y. (2025). Durability and environmental evaluation of rice husk ash sustainable concrete containing carbon nanotubes. *Scientific Reports*, 15(1), 4352. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88927-z>
- Mahmood, F., Kashif Ur Rehman, S., Jameel, M., Riaz, N., Javed, M. F., Salmi, A., & Awad, Y. A. (2022). Self-Healing Bio-Concrete Using *Bacillus subtilis* Encapsulated in Iron Oxide Nanoparticles. *Materials* (1996-1944), 15(21), 7731. <https://doi.org/10.3390/ma15217731>
- Mohammadi, A., & Ramezani-pour, A. M. (2023). Investigating the environmental and economic impacts of using supplementary cementitious materials (SCMs) using the life cycle approach. *Journal of Building Engineering*, 79, 107934. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107934>
- Quintanilla Anyaipoma, D. A. (2025). Influencia de la adición de bacterias *Bacillus subtilis* en la autoreparación de grietas del concreto. Universidad Nacional Federico Villarreal. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/10866>
- Sukumaran, A., Johnpaul, V., Balasundaram, N., & Senthil Kumar, S. (2025). Bacterial concrete: The future of self-healing and sustainable infrastructure. *MethodsX*, 15, 103569. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103569>
- Tan, K., Wu, S., & Ding, S. (2023). Carriers of Healing Agents in Biological Self-Healing Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, e7179162. <https://doi.org/10.1155/2023/7179162>
- Toledo-Espinoza, V. T. (2024). Colapso sísmico basado en energía para edificios aporcados de concreto armado equipados con amortiguadores viscosos, Lima 2024. *Cátedra Villarreal*, 12(2), 63-77. <https://doi.org/10.24039/rcv20241221816>
- Zamba, D. D., & Mohammed, T. A. (2023). Self-healing performance of normal strength concrete with *Bacillus subtilis* bacteria. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00356-5>