

Carbonatogénesis inducida por adición de bacterias en el concreto

Javier R. Nahuat-Sansores*, Luis F. Jiménez, Fátima del C. Teh-Dzul

Tecnológico Nacional de México Campus Chetumal, Av. Insurgentes No. 330, Col. David Gustavo Gutiérrez, Chetumal, Quintana Roo C.P. 77013

Fecha de recepción: 14 de septiembre de 2020 - Fecha de aceptación: 3 de enero de 2021

Resumen

El presente documento procura una interpretación resumida del estado del arte respecto al conocimiento y utilización de bacterias productoras de carbonato de calcio ($CaCO_3$) como adición para el concreto. El propósito principal del trabajo consistió en la descripción del fenómeno de precipitación de calcita, también conocido como carbonatogénesis, y su efecto en el comportamiento mecánico y durabilidad del concreto. Se concluye que la adición de bacterias en el concreto representa una alternativa sostenible de remediación y que los mejores resultados se logran con bacterias ureolíticas, como *Sporosarcina pasteurii* o *Bacillus megaterium*, a través del método de adición directa.

Palabras clave: Carbonatogénesis, bioprecipitación, concreto bacteriano, durabilidad del concreto

Carbonatogenesis induced by bacteria addition in concrete

Abstract

This document provides a summary interpretation of the state-of-the-art regarding the knowledge and use of bacteria that produce calcium carbonate ($CaCO_3$) as an addition for concrete. The main purpose of the work consisted in the description of the calcite precipitation phenomenon, also known as carbonatogenesis, and its effect on the mechanical behavior and durability of concrete. It is concluded that the addition of bacteria in concrete represents a sustainable remediation alternative and that the best results are achieved with ureolytic bacteria, such as *Sporosarcina pasteurii* or *Bacillus megaterium*, through the direct addition method.

Keywords: Carbonatogenesis, bioprecipitation, bioconcrete, durability of concrete

*javiersansnah@hotmail.com

Introducción

El concreto es el material compuesto (matriz cementante y agregados) más utilizado en la construcción dadas sus excelentes prestaciones, la facilidad con la que pueden modificarse sus propiedades, su relativamente bajo costo y su durabilidad. Aunque es precisamente en este último punto donde una gran parte de esfuerzos académicos y científicos se han centrado en la actualidad (Scrivener & Kirkpatrick, 2008).

El concreto posee una microestructura heterogénea en su interior que presenta fisuras y grietas de forma natural, las cuales se incrementan debido al envejecimiento, por la acción de cargas mecánicas o al exponerse a condiciones ambientales severas. Dicha microestructura se caracteriza por la zona interfacial de transición (ITZ, por sus siglas en inglés) que constituye el punto más débil de la matriz puesto que ahí se presentan una mayor porosidad y concurren gran cantidad de microfisuras (Scrivener et al. 2004).

La ITZ no se trata de una zona definida, sus propiedades varían conforme a la maduración del concreto y esto puede afectar positiva o negativamente el desempeño posterior.

La fragilidad de la ITZ se encuentra fuertemente relacionada con la durabilidad del concreto, por ende, esta preocupación ha derivado en investigaciones para mejorar la microestructura del concreto, tanto en concretos con agregado normal como en concretos con agregados reciclados (donde se maximizan los efectos negativos debido al cemento adherido al agregado grueso), entre ellos se encuentran los sistemas epóxicos, resinas acrílicas, o polímeros basados en silicona (Hansen, 1985; Lovato et al. 2012; Kisku et al. 2016).

Con la creciente amenaza del cambio climático, estos materiales de reparación que no son ecológicamente amigables deben ser retirados y sustituidos por otras alternativas.

Una de las tecnologías más prometedoras en la actualidad es la bioprecipitación, un fenómeno que imita un proceso que naturalmente ocurre en el entorno geológico, producido por bacterias (Boquet et al. 1973), cuya ventaja principal consiste en la sinergia entre las bacterias y el ambiente que las rodea dentro del concreto, mientras que, en el caso de otras alternativas sintéticas, se observan problemas de incompatibilidad.

Investigaciones actuales sugieren que la bioprecipitación o carbonatogénesis puede fortalecer la ITZ y reparar microfisuras existentes en el concreto (Nguyen et al., 2019; Chen et al., 2020; Bisht et al., 2020), lo que derivaría en una inherente disminución de consumo de materiales para obras de rehabilitación y reparación.

Dentro de este contexto, el presente trabajo ha tenido por objeto describir el fenómeno de carbonatogénesis y sus efectos en el concreto. Para ello, en principio se hace una descripción del proceso de bioprecipitación de calcita y posteriormente se analizan los resultados de diversas investigaciones en cuanto a su comportamiento mecánico y durabilidad.

Bioprecipitación de calcita

El fenómeno de la bioprecipitación de calcita (también llamada bio-mineralización y carbonatogénesis) fue descrita a detalle primeramente por Boquet et al. (1973), y después por Stocks-Fischer et al. (1999), quienes explicaron que en un entorno natural, los procesos de precipitación tienen lugar en el tiempo geológico, tapando grietas en formaciones rocosas altamente permeables. De ahí la idea de que este proceso pueda inducirse y aplicarse como herramienta de remediación a largo plazo en elementos de concreto es altamente factible.

La precipitación de calcita y su calidad se encuentran gobernadas por cuatro parámetros: (i) la concentración de carbonato inorgánico disuelto, (ii) la concentración de calcio, (iii) la

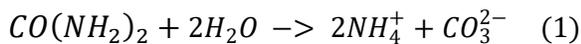
presencia de sitios de nucleación y (iv) el pH del entorno (Nguyen et al. 2019).

Existen tres grupos principales de bacterias que pueden inducir la precipitación de calcita a través de sus procesos metabólicos: organismos fotosintéticos, bacterias consumidoras de sulfatos y los organismos relacionados con el ciclo del nitrógeno (Mondal & Ghosh, 2019).

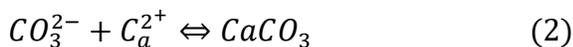
El más adecuado es el último caso, donde puede presentarse por tres diferentes vías: la amonificación de aminoácidos, la reducción de nitratos o la hidrólisis de urea, siendo este último el más simple de los mecanismos y el más fácil de controlar.

Aunado a lo anterior, la investigación a la fecha ha demostrado que la bioprecipitación inducida por bacteria por la vía de hidrólisis de urea tiene un gran potencial para precipitar grandes cantidades de calcita en un corto periodo de tiempo, propiciando abundantes sitios de nucleación en los cultivos de bacteria.

De acuerdo con Bisht et al. (2020), el mecanismo sucede de la siguiente manera: en presencia de la enzima ureasa ocurre la hidrólisis de la urea transformándola en amonio y dióxido de carbono, por lo tanto, la alcalinidad del medio aumenta. La reacción se indica en la Ecuación 1:



El pH alcalino deriva en la precipitación de carbonato de calcio cuando están presentes iones de calcio toda vez que se alcance un nivel de super saturación, como se muestra en la Ecuación 2:



Aunque se ha experimentado con distintos tipos de bacterias (Mondal & Ghosh, 2019; Nguyen et al. 2019) existen tres requisitos básicos en la selección apropiada de bacteria para la fabricación de concreto bacteriano: en principio la producción económica, es decir el

costo de adquisición y cultivo, como segundo punto el alto desempeño concerniente a la hidrólisis de urea y finalmente que este proceso pueda producirse en un ambiente no-estéril. Además, para su uso en construcción se deben cumplir con ciertos parámetros de seguridad, entre ellos, ser un organismo no-patógeno, no modificado genéticamente y que no presente elementos potencialmente peligrosos para la salud como es la resistencia a los antibióticos.

En términos económicos, la auto-reparación bacteriana permite la disminución en el uso de materiales para obras de mantenimiento o de reparación, ya que las investigaciones demuestran que sus características mecánicas y de durabilidad mejoran con la aplicación de bacterias (Nguyen et al. 2019). Otro aspecto a considerar estriba en su viabilidad económica, la cual depende del método de aplicación, sea directo o indirecto. En el primero la bacteria y sus nutrientes son mezclados con agua, la cual se utiliza para preparar el concreto. El segundo consiste en una red vascular, protección externa o encapsulación de las bacterias (Mondal & Ghosh, 2018), por lo que puede resultar más complicado y costoso.

De acuerdo con Nguyen et al. (2019) se ha experimentado con una importante cantidad de bacterias para mejorar las propiedades del concreto. Es notable que una gran mayoría (alrededor del 84%) corresponde a bacterias de la familia *Bacillus*, debido a la respuesta positiva de la bacteria a las propiedades físicas del concreto, entre otras razones que se enumeran a continuación:

1. Se encuentran en estratos de suelo, y forman esporas aún en condiciones desfavorables.
2. Su periodo de actividad en un ambiente alcalino (como el del concreto) supera los 50 años.
3. A través del proceso de hidrólisis de la urea consiguen producir suficiente enzima ureasa para bioprecipitar $CaCO_3$.

Las bacterias más utilizadas corresponden a: *Sporosarcina pasteurii* (23.3%), *Bacillus sphaericus* (18.3%) y *Bacillus cohnii* (9.3%).

Resistencia mecánica de concretos bacterianos

Siguiendo los resultados expuestos por Nguyen et al. (2019) y Mondal & Ghosh (2019) demuestran que la mayoría de especies de bacteria mejoraron la resistencia a la compresión del concreto.

Los mejores resultados los obtuvieron los concretos con *Sporosarcina pasteurii*. También se mencionan los métodos de aplicación (directo e indirecto) y se determina que el método directo proporciona los mejores resultados.

En el sureste de México, se encuentra en proceso un estudio sobre el efecto de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* en el comportamiento mecánico de concretos con agregados normales (CN) y reciclados (CAR). Entre los primeros resultados, mostrados en la **Error! Reference source not found.**, se observa que la resistencia a la compresión (F_c) aumenta en la medida que la concentración de bacteria en la mezcla es mayor (Teh Dzul, 2020).

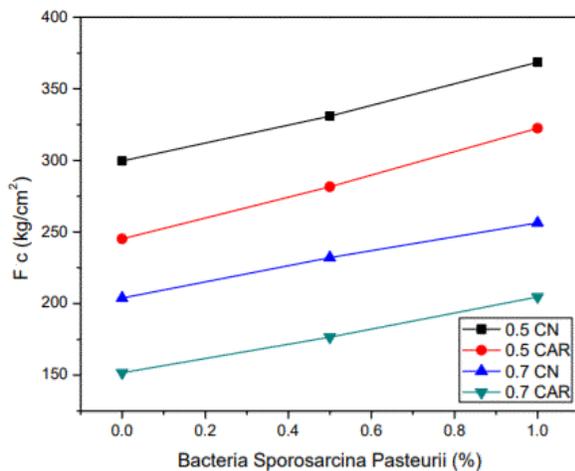


Figura 1. Resistencia a la compresión a 28 días, concretos con bacteria y de control. Teh Dzul, 2020.

En los últimos años, diversos autores han utilizado la bacteria *Sporosarcina pasteurii* en

sus investigaciones y obtenido resultados alentadores para aplicar en la industria de la construcción (Lee et al. 2015; De Bellie, 2016; Mondal & Ghosh, 2018; Xu & Wang, 2018; Mondal & Ghosh, 2019; Bisht et al. 2020; Chen et al. 2020).

Dicha bacteria ha demostrado excelentes resultados para otros usos además de concreto simple o reforzado, se ha utilizado en concreto con ceniza volante (Chahal et al. 2012), para el mejoramiento de agregado grueso y fino (Feng et al. 2020), como tratamiento superficial de agregados reciclados de concreto (Grabiec et al. 2012; Qiu et al. 2014) y como tratamiento de residuos sólidos de la industria cementera para su reúso (Cuzman et al. 2015).

Al igual que en los resultados ya mencionados, autores como Chahal et al. (2012) han encontrado cerca de 22% de mejora en la resistencia a la compresión en los concretos de control (aquellos con 0% de ceniza volante) y un 20% de mejora en aquellos con 10% de ceniza volante, lo que sugiere que la bacteria *Sporosarcina pasteurii* juega un papel muy importante en dicha mejora.

En su trabajo de investigación, Chidara et al. (2014) hallaron que con dicha bacteria se logra incrementar hasta en un 76.6% la resistencia a la compresión en edades tempranas (3 días), sin embargo, a los 28 días se sitúa a la par del concreto de control, lo que sugiere una rápida disminución de vacíos en la matriz del concreto y una etapa de estabilización en la que se activa de nuevo hasta aparecer nuevas fracturas.

Resultados similares fueron reportados por Stocks-Fischer et al. (1999), Achal et al. (2011) y Naidu et al. (2019).

Estudios de durabilidad de concretos modificados con adición de bacteria

En materia de durabilidad se tiene mucho campo por explorar, debido principalmente a que las primeras investigaciones estaban orientadas a describir el fenómeno, así como

evaluar su impacto en las propiedades mecánicas del concreto bacteriano. Sin embargo, en estudios recientes, se han realizado esfuerzos por evaluar la durabilidad de los concretos. Es importante resaltar la importancia de los estudios en esta materia, especialmente en previsión de los efectos que pudiera causar el cambio climático, como son el incremento de CO₂ en el ambiente

El factor que normalmente se considera en los estudios de durabilidad es la corrosión, fenómeno que ocurre por la despasivación del acero de refuerzo al interior del concreto reforzado, permitiendo expansión de la superficie del acero y esfuerzos internos, lo que deviene en el desprendimiento del concreto y eventualmente mayor exposición.

La despasivación ocurre cuando los iones cloruros se infiltran por los poros o microfisuras superficiales del concreto. Normalmente este efecto es de especial relevancia para obras en zonas costeras, expuestas al aerosol marino o al rebote de la marea (Veleva et al. 1998).

Otro factor importante que ha tomado relevancia en los últimos años, es el proceso de carbonatación. Esto ocurre cuando el CO₂ reacciona con los productos de hidratación del cemento, disminuyendo el pH en la solución de poro (Jiménez & Moreno, 2015).

Las investigaciones que relacionan estos fenómenos con la actividad de las bacterias han reportado disminución en la absorción del agua, una disminución en la porosidad, una consolidación de la ITZ y un aumento de la alcalinidad, lo que deriva en una mayor resistencia a la carbonatación y a la penetración de cloruros (Bisht et al. 2020).

En la **Error! Reference source not found.** se ofrece una recopilación de las respuestas de distintos tipos de bacteria en concretos en pruebas de penetración de cloruros (Nguyen et al. 2019). Es notable en la recopilación de resultados que con la bacteria *Sporosarcina*

pasteurii se obtienen los mejores resultados, aplicando el método de adición directa, en un periodo corto de 24 días.

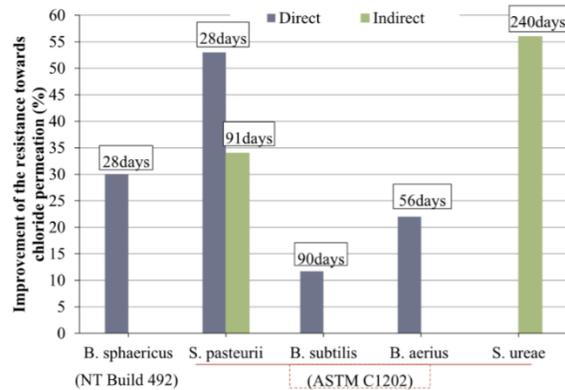


Figura 2. Respuesta ante migración de iones cloruro de concretos de estudio modificados con distintas bacterias. Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H. & Cousture, A., 2019.

En pruebas de penetración de cloruros (Teh Dzul, 2020) también se encontraron resultados favorables, por debajo del límite permisible de 0.4% recomendado por la Red DURAR (Trocónis, 2000) que se pueden apreciar en la **Error! Reference source not found.**

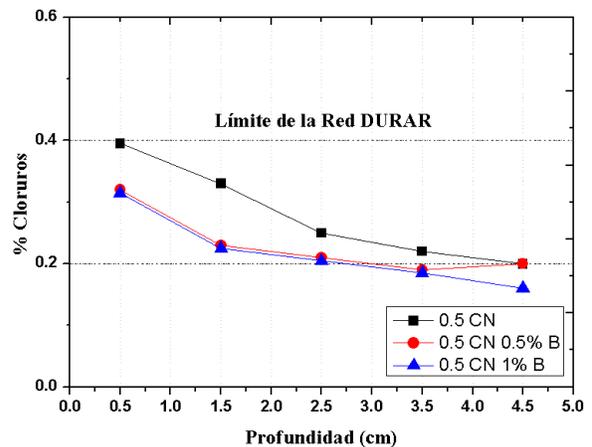


Figura 3. Perfil de cloruros en muestras sumergidas para concretos con agregado normal y reciclado. Teh Dzul, 2020.

En un trabajo reciente, Bisht et al. (2020) reportaron resultados similares en la resistencia a la penetración de cloruros, a través de la medición de la velocidad de corrosión a los 30, 60 y 90 días (Figura 4).

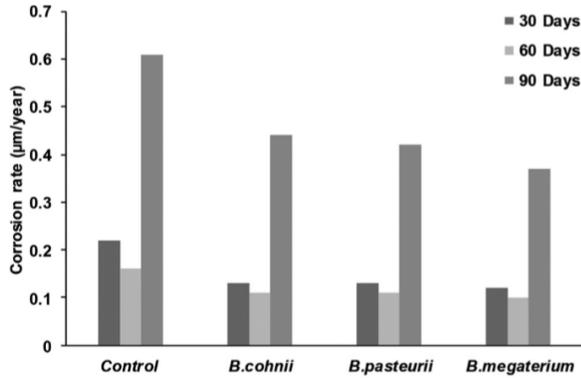


Figura 4. Velocidad de corrosión con y sin adición de bacteria a los 30, 60 y 90 días. Bisht, Chaurasia & Singh, 2020.

El fenómeno de carbonatación en relación con la adición de bacteria ha sido escasamente estudiado (Nguyen et al. 2019). Por su parte Bisht et al. (2020), reportaron buenos resultados en sus ensayos de carbonatación del concreto. Compararon la acción de diferentes bacterias (Figura 5), donde el frente de carbonatación a 90 días fue de 3 mm para *Sporosarcina pasteurii* contra 7 mm que se observó en el concreto de control, demostrando así el efecto de dicha bacteria como coadyuvante en la mejora de la resistencia a la carbonatación.

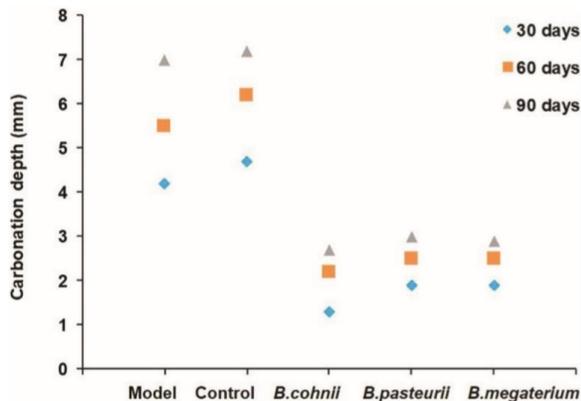


Figura 5. Profundidad de la carbonatación de concretos de control y con adición de bacteria a los 30, 60 y 90 días. Bisht, Chaurasia & Singh, 2020.

Bisht et al. (2020) destacan además, otro fenómeno que podría ser la razón principal a la que se debe esta mejora en la durabilidad de los

concretos: la bacteria en la matriz del concreto propicia una formación de productos de hidratación adicionales a partir de sus sitios de nucleación.

La presencia de cristales de calcita en la matriz del concreto, favorece el sellado de poros y microfisuras, como se ilustra en la Figura 6.

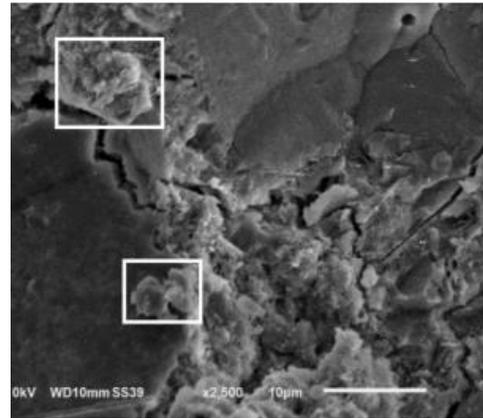


Figura 6. Depósitos de cristales alrededor de una microfisura formada en la matriz del concreto. Teh Dzul, 2020.

La escasez de estos estudios se debe generalmente a que el fenómeno de la carbonatación es relegado por ser erróneamente considerado inconsecuente, sin embargo, un efecto combinado con penetración de cloruros puede presentar un acelerado proceso de despasivación del acero.

Con la presión creciente de los efectos del cambio climático (IPCC, 2018; Farah et al. 2019) los niveles de CO_2 presumiblemente aumentarán de manera sostenida con el pasar de los años, por lo cual es menester contribuir con el fomento a la creación de conocimiento en este campo.

Conclusiones

La adición de bacterias en el concreto se postula como una alternativa sostenible de remediación a largo plazo, que ofrece resultados alentadores en términos de su comportamiento mecánico y durabilidad. El mejor desempeño encontrado corresponde al uso de bacterias ureolíticas, como son la

Sporosarcina pasteurii o la *Bacillus megaterium* a través del método de adición directa.

Muchos fenómenos relacionados con las bacterias en el concreto aún restan por ser estudiados a fondo, como es el caso de la formación de productos de hidratación por bioprecipitación o efectos combinados de

cargas ambientales, como carbonatación y penetración de cloruros. En la industria de la construcción se requiere estudiar el comportamiento de la bacteria en ambientes agresivos tales como obras submarinas, u obras expuestas a congelamiento, así como aquellas donde se emplee concreto con agregado reciclado.

Referencias

- Achal, V., Mukherjee, A. & Reddy, S. M., 2011. Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 730-734.
- Bisht, V., Chaurasia, L. & Singh, L. P., 2020. Studies on Corrosion and Carbonation Resistance by Bacteria-Mediated Mineralization in Concrete. *ACI Materials Journal*, Issue 117-M70, pp. 13-26.
- Boquet, E., Boronat, A. & Ramos-Cormenzana, A., 1973. Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon. *Nature*, Volumen 246, pp. 527-529.
- Chahal, N., Siddique, R. & Rajor, A., 2012. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 351-356.
- Chen, H.-J., Chen, M.-C. & Tang, C.-W., 2020. Research on Improving Concrete Durability by Biomineralization Technology. *Sustainability (MDPI)*, 12(1242), pp. 1-12.
- Chidara, R., Nagulagama, R. & Yadav, S., 2014. Achievement of Early Compressive Strength in Concrete Using *Sporosarcina pasteurii* Bacteria as an Admixture. *Advances in Civil Engineering (Hindawi)*, Volumen 2014, pp. 1-7.
- Cuzman, O. A. y otros, 2015. *Sporosarcina pasteurii* use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes. *Journal of Biotechnology*, pp. 49-56.
- De Bellie, N., 2016. Application of bacteria in concrete: a critical review. *RILEM: Technical Letters*, pp. 56-61.
- Drew, G. H., 1910. The action of some denitrifying bacteria in tropical and temperate seas and the bacterial precipitation of calcium carbonate in the sea. *Journal of the Marine Biological Association*, Issue 9, pp. 142-155.
- Farah, M. y otros, 2019. Carbonation of Concrete in a Climate Change Context. *Risk Evaluation and Climate Change Adaptation of Civil Engineering*, pp. 85-104.
- Feng, Z. y otros, 2020. Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar. *Construction and Building Materials*.

Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D. & Krupa, D., 2012. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. *Construction and Building Materials*, pp. 145-150.

Hansen, T. C., 1985. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report development 1945-1985. *RILEM TECHNICAL COMMITTEE 37-DRC*, pp. 201-246.

IPCC, 2018. *Summary for Policymakers, In: Global warming of 1.5°C.* G nova, Suiza: IPCC.

Jiménez, L. F. & Moreno, E. I., 2015. *Carbonataci n acelerada en concretos con agregados reciclados de alta absorci n*, Lisboa: CONPAT.

Kisku, N. y otros, 2016. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*.

Lee, J. C. y otros, 2015. Effect of Microorganism *Sporosarcina pasteurii* on the Hydration of Cement Paste. *Journal of Microbiol. Biotechnol.*, pp. 1328-1338.

Lovato, P. S. y otros, 2012. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, pp. 437-447.

Mondal, S. & Ghosh, A. (., 2018. Microbial Concrete as a Sustainable Option for Infrastructural Development in Emerging Economies. *Urbanization Challenges in Emerging Economies (ASCE)*, pp. 413-423.

Mondal, S. & Ghosh, A. (., 2019. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 67-75.

Naidu, K. S. S. T., Seshagiri-Rao, M. V. & Srinivasa-Reddy, V., 2019. Performance Enhancement of Light Weight Concrete Using Microbial Induced Calcite Precipitation by *Sporosarcina pasteurii*. *UKIERI Concrete Congress*, pp. 1-13.

Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H. & Cousture, A., 2019. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*.

Qiu, J., Sheng Tng, D. Q. & Yang, E.-H., 2014. Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Material*, pp. 144-150.

Scrivener, K. L., Crumbie, A. K. & Laugesen, P., 2004. Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregates in Concrete. *INTERFACE SCIENCE*, Issue 12, pp. 411-421.

Scrivener, K. L. & Kirkpatrick, R. J., 2008. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, Issue 38, pp. 128-136.

Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K. & Bang, S. S., 1999. Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil, Biology and Biochemistry*, pp. 1563-1571.

Teh Dzul, F. d. C., 2020. *Estudio de las propiedades de durabilidad de concretos con agregados reciclados y adiciones de bacteria Sporosarcina Pasteurii [Tesis inédita de maestría]*. Chetumal, Q. Roo: Tecnológico Nacional de México: Campus Chetumal.

Trocónis, O., 2000. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. RED DURAR.

Veleva, L., Castro, P., Hernandez-Duque, G. & Schorr, M., 1998. The Corrosion Performance of Steel and Reinforced Concrete in a Tropical Humid Climate. A Review.. *Corrosion Reviews*, 16(3), pp. 235-284.

Xu, J. & Wang, X., 2018. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. *Construction and Building Materials*, pp. 1-14.