

Bioconcreto un material con vida propia

Bioconcret a material with own life

*Cuadros Portales J.A.

*Autor de correspondencia: j.cuadros@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila. Facultad de Ciencias Químicas. Blvd. Venustiano Carranza, sin número, Col. República, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila.

RESUMEN

El concreto es un material que sufre deterioros. De éstos, el más frecuente es la aparición de grietas, las cuales requieren mantenimiento, que consiste en sellarlas con diferentes tipos de compuestos, pero no son totalmente eficaces. Además, los compuestos son muy contaminantes. Esto indica que se requiere de un concreto libre de mantenimiento. Como consecuencia de esto, se desarrolla un llamado bioconcreto, el cual incorpora agentes microbianos que habitan dentro del mismo. Éstos al aparecer una grieta se activan, y con ayuda de los nutrientes necesarios empiezan a sellar dicho agrietamiento, gracias a la producción de CaCO_3 (carbonato de calcio). Este compuesto además es compatible con el concreto. En esta revisión bibliográfica se hace una compilación y análisis de los diferentes grupos de microorganismos, así como de los nutrientes necesarios para lograr la acción de auto-reparación del concreto.

Palabras claves: *Bioconcreto, microorganismo, nutriente y auto-reparable.*

ABSTRACT

Concrete is a material that suffers deterioration. Of these, the most frequent is the appearance of cracks, which require maintenance, which consists of sealing them with different types of compounds, but they are not totally effective. In addition, the compounds are very polluting. This indicates that a concrete free of maintenance is required. As a consequence of this, a so-called bioconcrete is developed, which incorporates microbial agents that inhabit it. These when a crack appears, are activated, and with the help of the necessary nutrients begin to seal

said cracking, thanks to the CaCO_3 (calcium carbonate) production. This compound is also compatible with concrete. In this bibliographical review a compilation and analysis of the different groups of microorganisms is made, as well as the necessary nutrients to achieve the action of self-repair of the concrete.

Keywords: *Bioconcrete, microorganism, nutrient and self-repairing.*

INTRODUCCIÓN

En materia de construcción el concreto es el material más utilizado en el mundo, del cual se deriva el concreto armado. Éste involucra acero que refuerza sus características mecánicas a tensión, lo que resulta en un material más versátil y con mayor cantidad de usos. Sin embargo, esto incrementa sus costos, debido a que al momento de diseñarlo se tiene que incluir mayor cantidad de acero para disminuir fallas permisibles. Cuando éstas no son erradicadas en su totalidad a causa de: fatiga, antigüedad o desastres naturales, en las estructuras aparecen grietas, las cuales requieren mantenimiento para evitar que la humedad llegue al acero de refuerzo y lo debilite oxidándolo, ya que a consecuencia de esto se pierde el refuerzo y ocurre una falla. Por lo tanto, el mantenimiento de las estructuras es primordial para evitar que las grietas se propaguen, o sedan el paso a humedades o agentes oxidantes. Inconvenientemente, esto deriva en un costo adicional. Entonces, surge la necesidad de un concreto especializado, que requiera menor acero de refuerzo y servicios de mantenimiento para disminuir sus costos directos de elaboración, así como indirectos de su vida utilizable. Ajustándose a esta necesidad se trabaja con un nuevo concreto, el “bioconcreto”. Éste comprende el uso de bacterias, que al producirse una grieta en la estructura con la humedad del ambiente se activan y comienzan alimentarse, siendo así como por medio del proceso digestivo, producto de su metabolismo se expulsa como el material necesario para rellenar la grieta, en un lapso que está determinado por la relación del largo y grosor de la misma. El objetivo de esta revisión bibliográfica, es realizar un análisis de los diferentes trabajos sobre el bioconcreto y las bacterias que actúan en el mismo, así como los diferentes tipos de nutrientes para las bacterias, debido a que ambas características son clave para el correcto funcionamiento del bioconcreto.

Antecedentes

El uso del término “concreto” data desde la edad del antiguo imperio romano, el cual ha ido evolucionando con los años. En la actualidad, el concreto es un material compuesto por una mezcla de: agua, agregados pétreos y cemento. Este último es el componente principal del concreto, que define las propiedades de: moldeado, alta resistencia a la compresión, compatibilidad con el acero de refuerzo. Su preparación es bastante simple, porque solo se necesita un molde, de acuerdo a la aplicación que tendrá, después se vierte la mezcla de sus componentes, los cuales reaccionan al instante y dan formación al concreto. No obstante, éste carece de un buen comportamiento a tensión, por lo cual se agrega acero de refuerzo que cubre esta necesidad (Jonkers, 2011). Por lo antes mencionado, debido a sus múltiples propiedades mecánicas, además de su simplicidad de aplicación, el concreto es el material más utilizado en la construcción. El mismo sufre deterioros, siendo el más perjudicial la aparición de grietas. Estas aparecen debido a movimientos bruscos de la cimbra, cuando está en proceso de fraguado, detalles de diseño, fatiga, antigüedad, sobrecargas o después de algún desastre natural (temblores, heladas, inundaciones, etc.) (Seifan et al., 2016).

Material de auto-reparación

Actualmente, el diseño de materiales llamados de auto-reparación, en el área de ingeniería, ya sea civil, estructural o de materiales, respalda la práctica de prevención de daños (Zwaag, S. van der., 2007). Esto quiere decir que, si en una variante de ese material se produce mayor daño que en la versión base del mismo, pero este nuevo material puede curarse autónomamente, los daños que se hayan formado, no se toman como una problemática. En el caso particular del concreto, la necesidad de diseñar un material auto-reparable viene a cubrir la reducción de costos de mantenimiento, sellando las grietas sin la intervención humana o de un material externo al propio, es decir, este agente curativo que incorpora el concreto debe ser afín con el mismo y perdurar en el cuerpo del concreto por su misma edad final de diseño (Mors y Jonkers, 2012).

La continuidad de las grietas en el concreto da paso a humedad u otros agentes dañinos, por lo tanto el mantenimiento para dichos agrietamientos es crucial. Actualmente existen varias

técnicas para rellenarlas y evitar que penetren debilitando el acero de refuerzo. Los métodos más usados son resinas epóxicas, poliuretanos y un agente microbiano que ayuda a producir carbonato de calcio. Las primeras dos técnicas mencionadas sufren dificultades en durabilidad, así como en afinidad con el concreto, por lo cual se empezó a trabajar con un material auto-reparable que no requiera de un material externo para sellar las grietas (Irwan et al., 2013). El material concebido en su proceso de auto-reparación debe ser completamente afín al concreto para evitar reparaciones externas e incidir en el problema principal. Entonces, se trabaja sobre un nuevo material que recibe varios nombres como “concreto bacteriano”, “bioconcreto”, y el mayormente conocido como “concreto auto-reparable”. Este último se compone en forma general de las materias primas para la creación del concreto y en adición de microorganismos junto a los nutrientes necesarios, que por lo general son compuestos orgánicos precursores de minerales para ayudar en la formación de carbonato de calcio (piedra caliza). Este agente asume el papel de relleno en la grieta, el mismo es completamente afín al concreto ya que alrededor del mundo la mayoría de los concretos están hechos a base de triturados de piedra caliza la cual cementa muy bien (Anneza et al., 2016).

Agentes microbianos

Una bacteria es un organismo unicelular, es decir, su cuerpo es una sola célula, y su ADN se encuentra libre en el citoplasma. Estos seres vivos son los más abundantes del planeta, cuentan con una sola pared celular. El hecho de que se tomaran en cuenta para su uso en concreto auto-reparable es porque pueden llegar a resistir condiciones muy extremas que algunos otros micro seres vivos no, tales como, ambientes de producto del fraguado y reacciones químicas del concreto. Algunas bacterias llegan a tomar forma de endoesporas, las cuales contienen su material genético y las sustancias necesarias para poder vivir, en algunos casos, de 50 hasta 200 años (Yang et al., 2011).

Un grupo en especial es el de las bacterias alcalínicas. Una especie como *Bacillus* puede soportar el entorno extremo del concreto debido a las ya mencionadas endoesporas. En su caso, éstas tienen una membrana mas gruesa en comparación a otros grupos de microorganismos, misma que les da la capacidad de sobrevivir a radiaciones ultravioleta,

rayos X y fuerzas intramecánicas del cuerpo de concreto. Entonces, se deduce que la incorporación de endoesporas como bacterias inmovilizadas es de vital importancia para la incorporación en el concreto auto-reparable (Soltmann et al., 2003; Jonkers, 2011; Van Tittelboom y De Belie, 2013).

Medios protectores de microorganismos

Se ha trabajado con encapsulación por medio de materiales protectores como tierra diatomea, hidrogel, arcilla expandida porosa en cápsulas tubulares, gel de sílice y poliuretano. Todos estos dan cabida a un mayor grupo de microorganismos para su intrusión en concreto, debido a que los protegen mejor para soportar los ambientes alcalinos del mismo (Wang et al., 2012a). Se ha reconocido que los geles de sílice protegen las bacterias, ayudándolas a conservar la actividad enzimática (Wang et al., 2012a). Entonces, para el funcionamiento correcto de un material auto-reparable, en este caso sellar las grietas en el concreto, se debe profundizar en más técnicas de partículas protectoras bacterianas para mantener su vida durante más años.

Biomineralización

Para entender el concepto “biomineralización” se debe saber que es un proceso de formación de minerales por microorganismos, que es una maravilla nacida en la naturaleza (Alonso et al., 2018). La formación de minerales impulsada biológicamente, suele cambiar el medio ambiente como un efecto incontrolado, producto del metabolismo de las bacterias. El cuerpo de las bacterias y diagrama esquemático de la formación de carbonato de calcio se pueden observar en la Figura 1. La precipitación del mineral se produce mediante la fusión exitosa de los iones cargados positivamente, junto a las cargas negativas que se encuentran en la pared celular (Seifan et al., 2018).

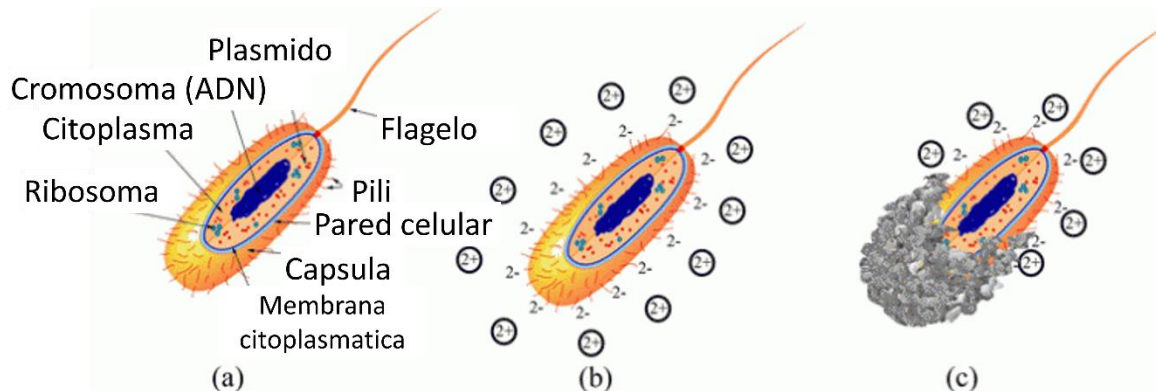
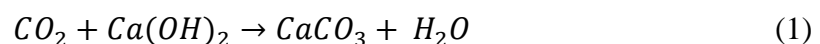


Figura 1. *Diagrama esquemático de biomineralización* (Seifan et al., 2016): a) Estructura de la bacteria. b) Presencia de cargas negativas en la pared celular y presencia de cargas positivas en el mineral del ambiente. c) Producción del biomineral y sus medios de unión a la pared celular. (Producción de carbonato de calcio en el cuerpo de concreto)

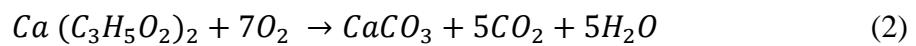
Existe una amplia variedad de bacterias mencionados en los diversos trabajos realizados con bioconcreto, pero éstas tienen en común el término biomineralización es decir, que estos microorganismos son capaces de producir biominerales como producto de su metabolismo. Con dichos minerales se irán sellando los agrietamientos que van de un ancho de fisura desde cero hasta 8 mm, según investigaciones más recientes (Alsharif, 2016).

La reacción de carbonatación se basa en el principio de obtención de carbonato de calcio, en donde el dióxido de carbono que está inmerso en el medio ambiente, así como en residuos de la reacción química del concreto al momento de su fraguado, reacciona con el hidróxido de calcio producto de hidratación de agua o humedad en el medio ambiente como se puede ver en la siguiente ecuación:



Es decir, la reparación por medio de bacterias radica en la precipitación de carbonato de calcio (piedra caliza) (Irwan et al., 2016). Entonces, las moléculas de H₂O cuando entran en los agrietamientos, activan las bacterias que se encuentran en estado latente, y la reacción de precipitación de carbonato de calcio, gracias a un compuesto, el cual es un precursor de un mineral incorporado al concreto junto a todos sus compuestos. Éstos pueden ser llamados

también nutrientes para las bacterias o alimento. En este caso, como ejemplo se está tomando el compuesto de lactato de calcio. La reacción ocurre como se indica en la ecuación (2) en la cual las bacterias solo actúan como catalizadores:



De la conversión metabólica del lactato de calcio, se produce dióxido de carbono, que reacciona con el hidróxido de calcio que se encuentra en el cuerpo del concreto. De acuerdo con la reacción química de la ecuación (1), se produce carbonato de calcio adicional. La producción en masa de precipitaciones de carbonato de calcio cristalino de más de 100 μm , sella y bloquea las grietas, evitando un mayor paso de agua u otras sustancias dañinas que puedan atacar al concreto y oxidantes para el acero de refuerzo embebido en el mismo, como se muestra en la Figura 2 (Jonkers, 2011).

Las moléculas de H_2O que ingresan, activan a las bacterias en estado latente en las superficies de las grietas abiertas. Éstas empiezan a multiplicarse y precipitan el carbonato de calcio sucesivamente rellenando la grieta, y protegiendo al acero de refuerzo en el interior del cuerpo del concreto (Jonkers, 2011).

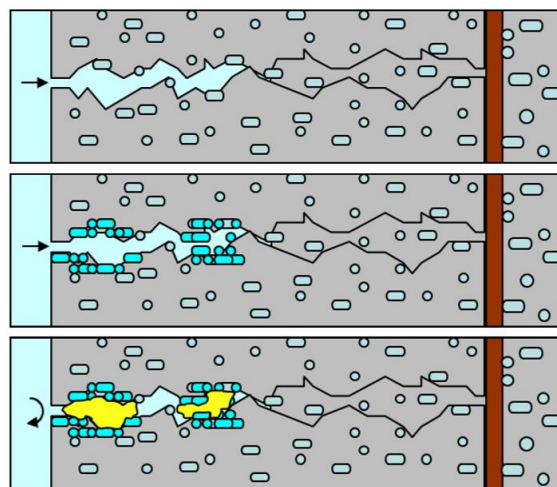


Figura 2 *Escenario de curación de grietas por bacterias inmovilizadas en concreto*
(Jonkers, 2011).

Evolución de agentes microbianos en el bioconcreto

El grupo de microorganismos *Bacillus sphaericus* y *Bacillus pasteurii* son los más utilizados debido a que son capaces de producir biominerales a través de la reacción metabólica en una fuente de calcio, la cual es la de menor interferencia con un concreto. Estos microorganismos Gram positivos son compatibles con la ureasa, involucrados en el ciclo del nitrógeno y capaces de producir carbonato de calcio mediante de hidrólisis de la urea (Wang et al., 2012a).

El trabajo metabólico microbiano lleva a un aumento de concentración de carbonato y del pH, lo cual facilita la transformación del dióxido de carbono en carbonato. Estas transformaciones metabólicas favorecen la precipitación de carbonato de calcio (principalmente configuradas como calcita que es abundante en la naturaleza) bloqueando el ingreso de moléculas de agua y químicos corrosivos en las grietas (Wang et al., 2014b).

Teniendo en cuenta las reacciones básicas para la formación del carbonato de calcio, así como los medios en los cuales se produce la activación y trabajo de las bacterias, en la Tabla 1 se muestra el trabajo de varios investigadores a través de los años con los diferentes nutrientes necesarios para la precipitación de carbonato, así como el acoplamiento en el concreto de las bacterias.

Tabla 1. Descripción general de los microorganismos y nutrientes que se han utilizado para producir carbonato de calcio en el cuerpo de concreto (Seifan et al., 2016).

Mecanismo de precipitación	Microorganismo	Nutriente	Acoplamiento en el concreto	Referencias
Conversión metabólica en ácido orgánico	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Lactato de calcio, acetato de calcio, extracto de levadura y peptona	Directo	Jonkers y Schlangen, 2009
	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Lactato de calcio, acetato de calcio, extracto de levadura y peptona	Directo	Jonkers et al., 2010
	<i>B. cohnii</i>	Lactato de calcio y extracto de levadura	Latente	Sierra-Beltran et al., 2014
	<i>B. cohnii</i>	Lactato de calcio y extracto de levadura	Latente	Jonkers, 2011
Ureólisis	<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Lactato de calcio y extracto de levadura	Latente	Wang et al., 2014b
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	Latente	Wang et al., 2014b
	<i>Bacillus sphaericus</i> <i>Bacillus sphaericus</i>	Urea y cloruro de calcio Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura.	Directo Latente	Achal et al., 2013 Wang et al., 2012a

	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea y cloruro de calcio	Directo	Achal et al., 2011
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	Latente	Wang et al., 2010
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, cloruro de calcio, nitrato de calcio y extracto de levadura	Latente	Van Tittelboom et al., 2010
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	Latente	Wang et al., 2014c
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, nitrato de calcio y extracto de levadura	Latente	Wang et al., 2012b
	<i>S. pasteurii</i>	Urea y cloruro de calcio	Directo	Ramachandran et al., 2001
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>			
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea y acetato de calcio	Directo	Kim et al., 2013
	<i>S. pasteurii</i>			
	<i>S. pasteurii</i>	Urea y cloruro de calcio	Latente	Bang et al., 2001
	<i>S. pasteurii</i>	Urea y cloruro de calcio	Latente	Bang et al., 2010
	<i>S. pasteurii</i> <i>Bacillus cereus</i>	Urea, agar nutriente y cloruro de calcio.	Directo	Maheswaran et al., 2014
	<i>Sporosarcina soli</i>	Urea y cloruro de calcio	Directo	Park et al., 2010
	<i>Bacillus massiliensis</i>			
	<i>Arthrobactercrystall opoietes</i>			
	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>			
Desnitrificación	<i>Diaphorobacternitroreducens</i> <i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, calcium formate, calcium nitrate and yeast extract	Latente	Erşan et al., 2015a

CONCLUSIÓN

En suma de lo estudiado se puede deducir que, los compuestos derivados del calcio se toman en cuenta para la mayoría de los casos como nutriente de precipitación. En cuanto a los microorganismos, el género *Bacillus*, son los que mayormente se utilizan por su capacidad de precipitar carbonato de calcio dentro del entorno alcalino, y su alta resistencia a ese ambiente extremo, además sobresale su idoneidad como sellador por su afinidad con el concreto. Mientras tanto, se debe seguir estudiando las técnicas enfocadas a la inclusión de bacterias y sus respectivos nutrientes en la matriz del concreto, ya que no existe un método o protocolo que asegure exactamente las características finales que el concreto adopte. Por otro lado, hay que tomar en cuenta la investigación necesaria para la reducción de costos asociados al tema, para aumentar la eficiencia del bioconcreto en relación a su costo de producción, e inducir al sector industrial para el uso del mismo, como un material básico para la construcción en un futuro pronto.

REFERENCIAS

- Achal, V., Mukerjee, A., Sudhakara Reddy, M. (2013) Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Constr. Build Mater.*, 48:1–5
- Achal, V., Mukherjee, A., Sudhakara Reddy, M. (2011) Microbial concrete: way to enhance the durability of building structures. *J. Mater. Civil Eng.*, 23:730–734.
- Alonso, M. J. C., Ortiz, C. E. L., Perez, S. O. G., Narayanasamy, R., Fajardo San Miguel, G. del J., Hernández, H. H., & Balagurusamy, N. (2018). Improved strength and durability of concrete through metabolic activity of ureolytic bacteria. *Environ. Sci. Poll. Res.*, 25(22), 21451–21458. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9347-0>
- Alshalif, A. F., Irwan, J. M., Othman, N., & Anneza, L. H. (2016) Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 47, 01016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164701016>
- Anneza, L. H., Irwan, J. M., Othman, N., & Alshalif, A. F. (2016) Identification of Bacteria and the Effect on Compressive Strength of Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 47, 01008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164701008>
- Bang, S.S., Galinat, J.K., & Ramakrishnan, V. (2001) Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. *Enzyme Microb. Tech.*, 28:404–409.
- Bang, S.S., Lippert, J.J., Yerra, U., Mulukutla, S., & Ramakrishnan, V. (2010) Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation. *Int. J. Smart. Nano Mater.*, 1:28–39.
- Deepika, B., & Kumar, C. S. (2016) Study on strength of bacterial concrete in *Bacillus megaterium*. *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, 5(5), 780–785.
- Erşan, Y.Ç., Da Silva, F.B., Boon, N., Verstraete, W., & De Belie, N. (2015a) Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. *Construction Build Mater.*,

88:196–203.

Irwan, J. M., & Othman, N. (2013) An Overview of Bioconcrete for Structural Repair. *Appl. Mecha. Mater.*, 389: 36–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.389.36>

Irwan, J. M., Anneza, L. H., Othman, N., Alshalif, A. F., & Zamer, M. M. (2016) Calcium lactate addition in bioconcrete : Effect on compressive strength and water penetration. *MATEC Web of Conferences*, 78, 01027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801027>

Jonkers, H.M., & Schlangen, E. (2009) *A two component bacteria-based self-healing concrete*. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, ICCRRR Cape Town South Africa

Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010) Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecol. Eng.*, 36:230–235.

Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56(1): 1–12.

Kim, H.K., Park, S.J., Han, J.I., & Lee, H.K. (2013) Microbially mediated calcium carbonate precipitation on normal and lightweight concrete. *Constr. Build Mater.*, 38:1073-1082.

Maheswaran, S., Dasuru, S.S., Rama Chandra Murthy, A., Bhuvaneshwari, B., Ramesh Kumar, V., Palani, G.S., Iyer, N.R., Krishnamoorthy, S., & Sandhya, S. (2014) Strength improvement studies using new type wild strain *Bacillus cereus* on cement mortar. *Curr. Sci. India*, 106:50–57.

Mors, R., & Jonkers, H. (2012). Bacteria-based self-healing concrete-introduction. *On Durability of Reinforced Concrete*, (April), 32–39. Retrieved from <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:63f20865-ed50-4613-a181-ca7af2f01aab/290363.pdf>

Park, S.J., Park, Y.M., Chun, W.Y., Kim, W.J., & Ghim, S.Y. (2010). Calcite-forming bacteria for compressive strength improvement in mortar. *J. Microbiol. Biotech.*, 20:782–788

- Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V., & Bang, S.S. (2001). Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Mater. J.*, 98:3-9.
- Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Appl. Microbiol. Biotech.*, 100(6): 2591-2602.
<https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
- Seifan, M., Sarmah, A. K., Samani, A. K., Ebrahimezhad, A., Ghasemi, Y., & Berenjian, A. (2018) Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. *Appl. Microbiol. Biotech.*, 102(10): 4489-4498.
<https://doi.org/10.1007/s00253-018-8913-9>
- Sierra-Beltran, M.G., Jonkers, H.M., & Schlangen, E. (2014). Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Constr. Build Mater.*, 67:344–352.
- Soltmann, U., Raff, J., Selenska-Pobell, S., Matys, S., Pompe, W., & Böttcher, H. (2003) Biosorption of heavy metals by sol-gelimmobilized *Bacillus sphaericus* cells, spores and S-layers. *J Sol-Gel. Sci. Techn.*, 26:1209- 1212.
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013) Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*, 6:2182–2217.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement. Concrete Res.*, 40:157–166.
- Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2012a). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Constr. Build. Mater.*, 26:532–540.
- Wang, J.Y., De Belie, N., Verstraete, & W. (2012a). Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. *J. Ind. Microbiol. Biot.*, 39:567–577.
- Wang, J.Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014b). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Constr. Build. Mater.*, 68:110–119.

- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014c). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement Concrete Res.*, 56:139–152.
- Wang, J.Y., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). *Potential of applying bacteria to heal cracks in concrete*. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies
- Yang, Z., Hollar, J., He, X., & Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cement Concrete Compos.*, 33(4):506–512.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.010>
- Zwaag, S. van der. (2007). *Self Healing Materials An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*. Springer, Berlin, 161-193.
<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1369334>