

Análisis de la autorregeneración de matrices cementicias mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas

F. Pacheco^{1*} , A. Loeff² , V. Müller³ , H. Z. Ehrenbring¹ , R. Christ⁴ ,
R. C. E. Modolo³ , M. F. Oliveira⁵ , B. F. Tutikian³ 

*Autor de Contacto: fernandapache@unisinos.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

Recepción: 28/10/2021 | Aceptación: 07/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Este estudio analizó el potencial de cicatrización del concreto al utilizar soluciones químicas y bacterianas, evaluando diferentes materiales que se pueden utilizar para su encapsulación. Para encapsular los agentes se utilizaron arcilla y perlita expandidas. Para analizar la efectividad de la cicatrización, se realizaron técnicas de análisis visual utilizando un microscopio óptico de alta precisión y microtomografía 3D. Los resultados apuntaron a un mejor desempeño de la mezcla BAC.AE (soluciones bacterianas encapsuladas en arcilla expandida), utilizando solución bacteriana encapsulada en arcilla expandida, que fue capaz de cicatrizar grietas de hasta 0.57mm. Las mezclas BAC.PE (solución bacteriana encapsulada en perlita expandida), solución bacteriana encapsulada en perlita expandida, y SS (silicato de sodio), solución química agregada en el momento de la mezcla para reemplazar el agua, cicatrizaron grietas de 0.16 mm y 0.29 mm respectivamente.

Palabras clave: bioconcreto; autorregeneración; autocicatrización; fisuras; bacterias.

Citar como: Pacheco, F., Loeff, A., Müller, V., Ehrenbring, H. Z., Christ, R., Modolo, R. C. E., Oliveira, M. F., Tutikian, B. F. (2022), "Análisis de la autorregeneración de matrices cementicias mediante diferentes métodos de inserción de soluciones químicas y bacterianas", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 32 – 46, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>

¹ Itt Performance, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

² Civil Engineering Undergraduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

³ Civil Engineering Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

⁴ Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Barranquilla Colombia

⁵ Architecture Graduation, Polytechnical school, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Pacheco ofreció la idea original. Muller y Loeff fueron los responsables del experimento. Ehrenbring y Christ realizaron las pruebas y análisis. Modolo, Tutikian y Oliveira trabajaron en la interpretación de los resultados y como revisores. Pacheco, Muller y Loeff se encargaron de escribir el trabajo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Evaluation of concrete self-healing with different insertion techniques of chemical and bacterial solutions

ABSTRACT

This study evaluated the self-healing potential of concrete with chemical and bacterial solutions encapsulated in different materials. The encapsulating materials were expanded clay (EC) and expanded perlite (EP). Self-healing effectiveness was evaluated visually with a high-precision optical microscope and 3D microtomography. Results pointed to improved performance of bacterial solutions encapsulated in expanded clay (BAC.EC) which were able to heal fissures of 0.57 mm. In contrast, bacterial solutions encapsulated in expanded perlite (BAC.EP) and sodium silicate replacing water during molding (SS) healed fissures of 0.16 mm and 0.29 mm, respectively.

Keywords: bioconcrete; self-healing; self-repairing; fissure; bacteria.

Análise da autorregeneração de matrizes cimentícias através de diferentes métodos de inserção de soluções químicas e bacterianas

RESUMO

Este estudo analisou o potencial de cicatrização do concreto quando do uso de soluções bacterianas e soluções químicas, avaliando diferentes materiais que podem ser empregados para seu encapsulamento. Para encapsular os agentes, foram empregadas argila expandida e perlita expandida. Para analisar a eficácia da cicatrização, realizaram-se as técnicas de análise visual através de microscópio óptico de alta precisão e microtomografia 3D. Os resultados apontaram para um melhor desempenho do traço BAC.AE (soluções bacterianas encapsuladas em argila expandida), utilizando solução bacteriana encapsulada em argila expandida, que foi capaz de cicatrizar fissuras de até 0,57mm, tendo os traços BAC.PE (soluções bacterianas encapsuladas em perlita expandida) e SS (silicato de sódio) inserido na moldagem, em substituição à água, cicatrizando fissuras de 0,16 mm e 0,29 mm respectivamente.

Palavras-chave: bioconcreto; autorregeneração; autocicatrização; fissuras; bactérias.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCION

El concreto tiene numerosas ventajas que conducen a su alta aplicabilidad (SEIFAN et al, 2016), sin embargo, el material sufre deterioro. Se observa que la sostenibilidad de las estructuras no se puede lograr si necesitan reparaciones y ajustes constantes. Por tanto, es fundamental que haya una mejora en la durabilidad del concreto, especialmente en los países del tercer mundo, donde las fallas más dañinas en la industria de la construcción son comunes (Chemrouck, 2015).

La durabilidad del concretos se puede describir como su capacidad para resistir el deterioro, y esta degradación proviene de la exposición a la intemperie o abrasión superficial (Achal et al, 2011), considerando que existen diferentes condiciones de exposición ambiental (Gjorv, 2016). Actualmente, los mayores responsables de la degradación del concreto son las fisuras, por varias causas. Para minimizar tales datos, se tiende a estudiar SHC - Concreto Autorregenerable (Azarsa et al, 2019), o concretos autorregenerativo, objeto de estudio en este trabajo.

La idea principal del hormigón autorreparable es que se deben dar las condiciones necesarias para que los agentes presentes en la matriz de cemento puedan rellenar las fisuras una vez que se han producido. En las últimas décadas, la investigación en esta área ha apuntado a muchas estrategias innovadoras (Wu et al., 2012), incluido el uso de agentes cicatrizantes en fibras huecas, su microencapsulación (White et al, 2001), la inserción de agentes expansores y aditivos minerales (Kishi; Ahn, 2010), materiales con memoria de forma (Abdulridha et al., 2012) y soluciones bacterianas (Krishnapriya et al, 2015).

Se ha demostrado que la adición de soluciones bacterianas a matrices cementosas es una posibilidad prometedora y sostenible (Krishnapriya et al, 2015; Wang et al, 2017; Rais y Khan, 2021). Esta técnica de autocuración se realiza agregando cápsulas de algún material específico que contiene la bacteria, que puede permanecer inactiva durante décadas, junto con un nutriente como el lactato de calcio (Jiang et al, 2020). Así, cuando las cápsulas se rompen con el agrietamiento del hormigón y hay humedad, las bacterias se activan y producen calcita (Patel, 2015). Las bacterias utilizadas deben ser capaces de soportar la alta alcalinidad del cemento y la presión de compresión interna de la matriz de cemento donde se inserta. También se debe proporcionar una fuente de nutrientes para que las bacterias se alimenten (Li; Herbert, 2012; Stanaszek-Tomal, 2020).

Además de la solución bacteriana, la solución química también ha demostrado ser una alternativa eficaz para cerrar grietas en la matriz de hormigón (Alghamri et al, 2016). En los estudios realizados por Huang et al. (2011) y Pelletier et al. (2011) se utilizaron cápsulas esféricas para encapsular una solución de silicato de sodio, que al romperse libera la solución a la matriz, donde ocurre la reacción con el hidróxido de calcio, formando silicato de calcio hidratado (C-S-H) que cura la fisura en el concreto.

Dados los actuales y complicados procesos de encapsulación en desarrollo, es notable la improbabilidad de sus aplicaciones a gran escala. Existe una escasez de estudios que comparen diferentes métodos de encapsulación para soluciones bacterianas y químicas insertadas en la matriz de cemento, por lo que este estudio realiza un análisis comparativo, con encapsulación de bacterias en perlita y arcilla expandida, y también la efectividad del uso de silicato de sodio. directamente en el agua de amasado.

2. AGRIETAMIENTO Y AUTOCICATRIZACIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Las grietas se consideran las manifestaciones patológicas características de las estructuras de concreto y llaman la atención sobre el hecho de que está sucediendo algo anormal (Bianchini, 2008). Ferrara et al (2018) mencionan que minimizar la aparición de grietas sigue siendo un desafío para el concreto. Lottermann (2013) explica que algunas de las causas más comunes de

agrietamiento de estructuras son: curado deficiente; retracción; variación de temperatura; agresividad ambiental; cargando; errores de ejecución y detalle de proyectos y represiones de los apoyos. Las fisuras se pueden dividir en aquellas que se originan en estado fresco y aquellas que aparecen en el concreto una vez endurecido. También pueden estar motivados por más de una causa simultáneamente (Gupta; Pang; Kua, 2017). Considerando el efecto que tienen las fisuras en la durabilidad, sus aberturas límite están contempladas en normas nacionales e internacionales (Carmona Filho; Carmona, 2013). En la norma brasileña, por ejemplo, las fisuras permitidas están en el rango de valores entre 0,2 y 0,4 mm (ABNT, 2014).

Por mucho que se hayan realizado estudios previos sobre este tema, el hito inicial más aceptado en la literatura, que cambió la postura sobre el tema, fue la investigación de Dry, en 1994. Los estudios realizados por Dry (1994 apud Bianchin, 2018) propuso el uso de polímeros encapsulados para obtener hormigones autorreparables. Además, se propuso no solo la descripción de los fenómenos involucrados y sus posibles causas, sino también el uso intencional de estas propiedades con el fin de obtener un material más duradero.

Desde 2005 se han creado dos comités técnicos para estudiar los fenómenos de autocuración en materiales cementicios (Cappelleso, 2018). Parece haber consenso en el campo técnico en que los concretos autorreparables son aquellos con cierre de fisuras y los hormigones autoregeneradores, como los que implican la recuperación de propiedades mecánicas (Pacheco, 2020). También existe una diferenciación relacionada con los mecanismos utilizados para ello, divididos entre autógenos y autónomos. Autógeno se refiere a cuando el proceso utiliza materiales que podrían estar presentes en la composición del concreto y que no se utilizan específicamente para la autocuración. El procedimiento autónomo, en cambio, considera el uso de materiales que no se encontrarían en la composición y solo fueron agregados para este propósito. Los mecanismos autógenos no fueron estudiados en esta investigación, siendo muestras con puzolanas o cemento.

La cicatrización por mecanismos autónomos se basa en microcápsulas llenas de agentes cicatrizantes o tubos vasculares (Van Tittelboom et al., 2011; Wan et al, 2021). Entre los agentes cicatrizantes se encuentran soluciones químicas, soluciones bacterianas, polímeros superabsorbentes (PSA), aditivos reductores de la permeabilidad, expansores, entre otros. Como encapsulamiento se pueden utilizar materiales porosos, agregados ligeros, entre otros. Mila et al (2019) afirman que la disposición del material en cápsulas favorece la presencia de productos cicatrizantes a lo largo de la matriz.

La encapsulación de soluciones químicas corresponde a la impregnación de agregados ligeros y porosos con alguna solución química (Alghamri; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2016). Souradeep y Kua (2016) explican que los agentes se liberan por ruptura de las cápsulas. Después de su liberación, los agentes cicatrizantes penetran en la fisura a través de la acción capilar. Souradeep y Kua (2016) afirman que la estrategia de encapsulación es capaz de incrementar la vida útil de los agentes de curado químicos o biológicos, asegurando la recuperación y mayor durabilidad del concreto. En términos de soluciones químicas, se señala como una posibilidad el uso de silicato de sodio (Manoj-Prabhar et al., 2017).

La aplicación de bacterias para la remediación de grietas consiste en la producción de calcita (CaCO_3) (Xu et al, 2020) que es ambientalmente inocuo en comparación con los polímeros sintéticos que se utilizan actualmente para la reparación del concreto. Sobre ellos, existen algunos enfoques diferentes en uso, y se puede utilizar la precipitación de carbonato de calcio a través de la hidrólisis bacteriana de la urea (Elzébio; Alves; Fernandes, 2017), así como la incorporación de esporas bacterianas y compuestos orgánicos en el concreto (Schwantes-Cezario et al., 2017).

Un factor que puede afectar a las bacterias es el pH muy alcalino del hormigón. Otro aspecto es que las células bacterianas pueden destruirse durante el proceso de hidratación del cemento. Por tanto, la encapsulación es una estrategia de protección para estos seres (Jonkers; Thijssen, 2010).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La tabla 1 muestra la composición de las mezclas realizados en esta investigación. La mezcla de referencia se basa en el estudio de Schwantes-Cezario et al. (2019).

Tabla 1. Variables de estudio.

Mezcla	Cemento	Arena	Perlita	a/c	Agente cicatrizante
Referencia	1,00	1,00	-	0,36	-
BAC.PE	1,00	0,7	0,064	0,36	<i>B.subtilis</i>
BAC.AE	1,00	0,7	0,147	0,36	<i>B.subtilis</i>
SS	1,00	1,00	-	0,18	Silicato de sodio

En las mezclas BAC.AE y BAC.PE, el 30% de la masa de arena fue reemplazada por el volumen correspondiente de arcilla expandida (AE) y perlita expandida (PE), respectivamente. En la mezcla SS se utilizó un aditivo superplastificante a base de policarboxilatos para ajustar la fluidez, con un contenido de 0.89% en relación con la masa de cemento. En cada una de las mezclas se realizaron ensayos de compresión, tracción en flexión (para inducción de fisuras), análisis visual y microtomografía 3D, con el objetivo de identificar los vacíos.

3.1 Materiales

El cemento utilizado en el estudio fue el cemento Portland tipo CP II-F-40, con uso de filler y sin adiciones puzolánicas. La arena utilizada en este estudio fue arena de cuarzo extraída de los ríos. La masa unitaria obtenida de la arena fue de 1,592.16 kg/m³ y la masa específica de 2,427.36 kg/m³. La granulometría de arena, que se muestra en la Figura 1, se obtuvo mediante ensayos según NBR NM 248 (ABNT, 2003). Como solución química se utilizó silicato de sodio neutro, en estado líquido, compuesto de fórmula Na₂SiO₃, por su alta compatibilidad con matrices cementicias, las cuales se diluyen al 50% en agua desionizada, razón por la cual la relación agua / cemento de esta mezcla es la mitad de las anteriores.

La especie bacteriana utilizada en la solución bacteriana en el programa experimental es *Bacillus subtilis* AP 91, de la unidad Campinas de EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Los procedimientos de verificación de la curva de crecimiento y preparación están incluidos en el estudio de Pacheco (2020). Se utilizó como diluyente una solución tampón estéril que contenía 1.06 g/L de fosfato de sodio (dibásico anhidro), 0.36 g/L de fosfato de sodio (monobásico) y 8.17 g/L de cloruro de sodio en agua desionizada fue utilizado como diluyente de la bacteria para la encapsulación y posterior inserción en la mezcla cementicia.

El PE fue suministrado por la empresa Pervale Minerais, con un tamaño de partícula entre 2 y 4 mm, habiendo sido tamizado antes de su uso para adaptarse a este rango de tamaño de partícula. La determinación de la masa unitaria se realizó para el material en su estado natural y para el material impregnado con la solución bacteriana y revestido con cemento, obteniendo valores de 128.43 kg/m³ y 328.52 kg/m³, respectivamente. La determinación de la granulometría de perlita (mostrada en la Figura 2) se realizó según NBR NM 248 (ABNT, 2003).

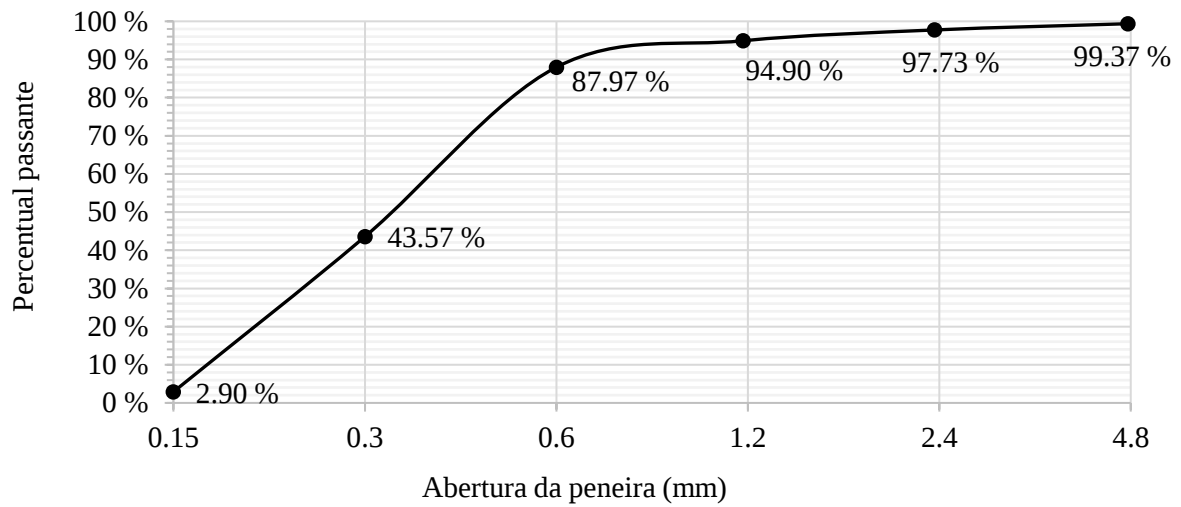


Figura 1. Distribución granulométrica de arena.

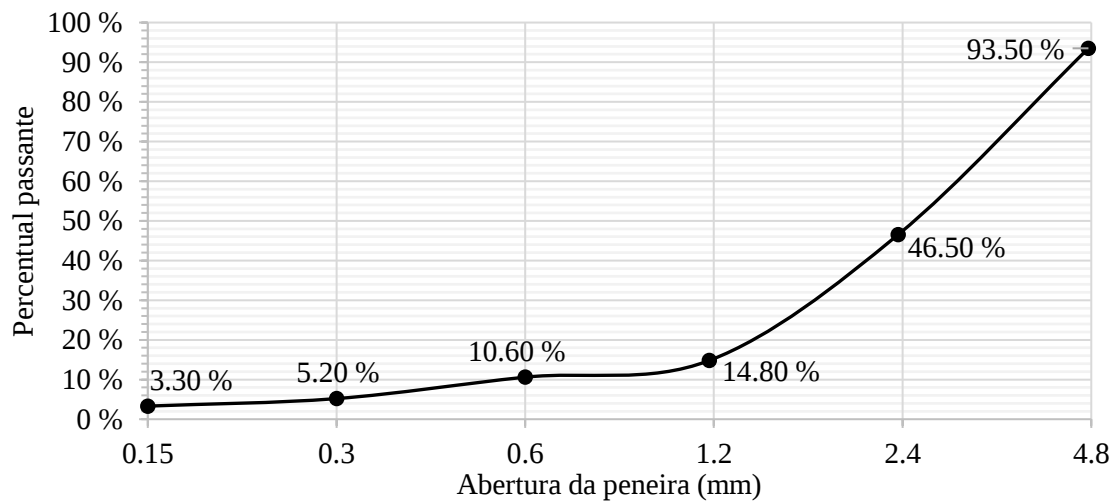


Figura 2. Distribución granulométrica de perlita expandida.

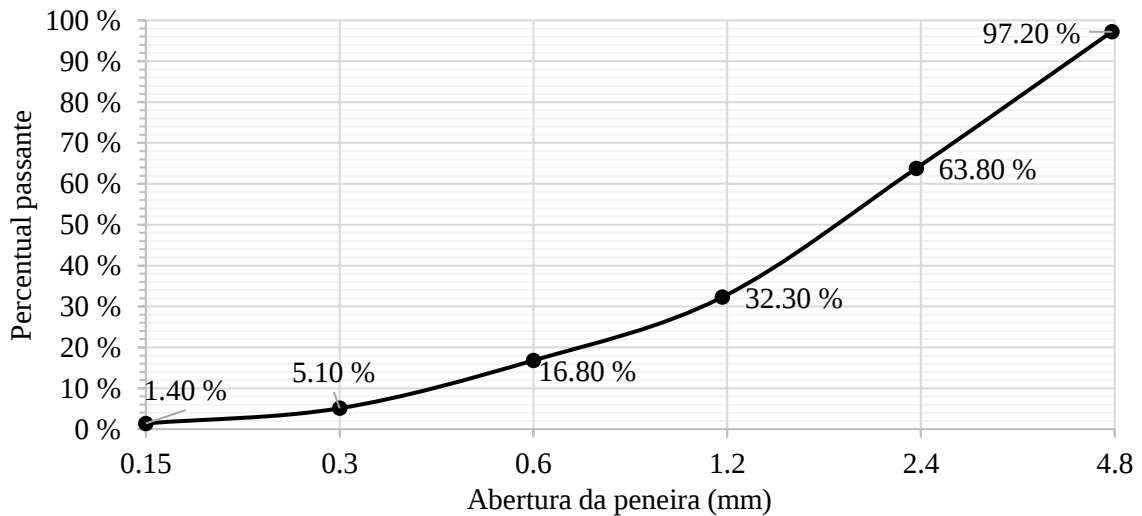


Figura 3. Distribución granulométrica de arcilla expandida.

El AE utilizado fue el tipo 0500, adquirido a la empresa Global Minérios, con una granulometría entre 2 y 4 mm. Para su caracterización se realizaron las pruebas de determinación de masa unitaria y granulométrica (ver Figura 3), de acuerdo con las normas NBR NM 45 (ABNT, 2006) y NBR NM 248 (ABNT, 2003), respectivamente. La determinación de la masa unitaria se realizó en condiciones naturales y para el material impregnado con la solución bacteriana y revestido con cemento, con valores de 930.39 kg/m³ y 1395.48 kg/m³, respectivamente.

La composición química de la perlita y la arcilla expandidas se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química de los agregados ligeros utilizados para la encapsulación.

Elemento	AE		PE	
	Masa %	Atómica %	Masa %	Atómica %
O	42.80	58.92	43.05	57.65
Na	0.43	0.41	2.27	2.12
Mg	1.78	1.61	0.00	0.00
Al	10.23	8.35	7.18	5.70
Si	30.87	24.22	40.70	31.04
K	4.48	2.52	4.76	2.61
Ca	1.16	0.64	0.62	0.33
Ti	1.15	0.53	0.00	0.00
Fe	7.10	2.80	1.41	0.54
Total	100.00		100.00	

3.2 Métodos

Para los análisis realizados se moldearon un total de 27 probetas cilíndricas (50 x 100 mm) y 9 probetas prismáticas (60 x 60 x 180 mm), según NBR 5738 (ABNT, 2015), respectivamente, y 3 probetas de prueba cilíndrica (8 x 30 mm). Las muestras de forma prismática se reforzaron con una barra de acero CA 60 de 5 mm de diámetro, colocada a 2 cm de la base, para que la muestra no sufriera una rotura frágil. Luego de la deformación, las muestras fueron curadas en cámara con humedad y temperatura controlada, según NBR 5738, hasta la edad de prueba, en 7, 14 y 35 días (ABNT, 2015).

3.2.1 Encapsulación de solución bacteriana

El procedimiento con la solución bacteriana implicó la inmersión de las cápsulas en la solución y su saturación en un desecador de vacío, como lo realizaron Alghamri et al (2016) y Sisomphon; Copuroglu y Fraaij, (2011). Una vez completada la impregnación, PE y AE se enviaron a un horno durante 48 horas a 45 °C, según lo realizado por Zhang et al. (2017). Junto con la solución bacteriana, se eliminó el nutriente de lactato de calcio. Para proporcionar una envoltura protectora, se colocaron capas de cemento alrededor de los agregados, con el objetivo de la formación de una costra protectora. En relación con el encapsulado, se verificó inicialmente la masa de los agregados y posteriormente el encapsulado. Más detalles de este procedimiento experimental se pueden ver en el estudio de Pacheco (2020).

3.2.2 Ensayos

La resistencia a la compresión del concreto se obtuvo mediante NBR 5739 (ABNT, 2018). Para la formación de grietas, las muestras prismáticas se sometieron al ensayo de tracción por flexión de tres puntos, según NBR 13279 (ABNT, 2005). El análisis visual de la cicatrización se produjo al inicio del estudio y a los 7, 14 y 35 días. Se realizó una prueba de microtomografía 3D para verificar la distribución de huecos en el material. Para esta prueba se utilizaron muestras de forma cilíndrica

de 8x30 mm y se analizó una muestra por línea.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la resistencia a la compresión, el análisis visual y la microtomografía 3D se presentan en los siguientes elementos.

4.1 Resistencia mecánica a la compresión

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión se muestran en la Figura 4. Se puede observar que la resistencia a la compresión se mantuvo muy similar a lo largo del tiempo, lo que puede deberse al cemento utilizado, que ya presenta alta resistencia en las edades tempranas. La mayor diferencia encontrada está en la mezcla SS, con una diferencia de 4.7 MPa (11,63%) de resistencia, entre 14 y 35 días. La SS puede haber generado en este período C-S-H debido a su activación, ya que no depende de las grietas para actuar (GIANNAROS et al, 2016)

También es importante señalar que hubo una diferencia significativa de fuerza al comparar las diferentes mezclas, observándose que la mezcla BAC.AE adquirió una fuerza mucho mayor que las otras dos mezclas utilizadas, con una diferencia de hasta 12.7 MPa a 35 días. Es posible que ocurra esta diferencia, ya que la unidad de masa de la perlita es menor que la de la arcilla, y ambas se agregaron a las mezclas en tamaños de partícula similares.

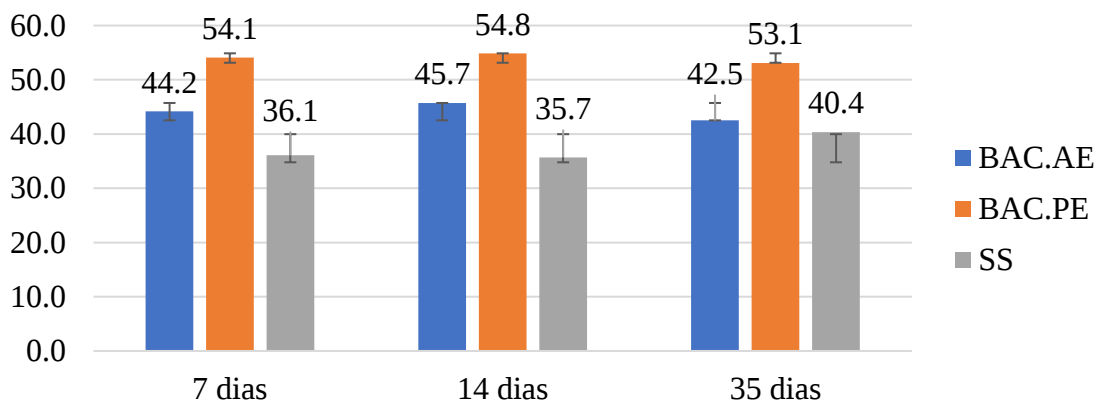


Figura 4. Resistencia a la compresión media de las muestras.

Según un estudio de Schwantes-Cezario et al (2017), con la traza utilizada en este estudio, la resistencia a la compresión encontrada en las muestras debe tener un valor promedio de 65 MPa, sin embargo, este valor no se alcanzó debido a la inserción de agregado ligero en la mezcla, ya que, según Jonkers (2011), el uso de este tipo de material reduce la resistencia a la compresión. Sin embargo, este parámetro no se puede utilizar a la hora de evaluar la mezcla SS, ya que no presenta agregados ligeros en su composición, siendo así la razón de la disminución de su resistencia asociada a la posible hidratación incompleta del cemento, debido a la baja proporción agua/cemento en la mezcla.

4.2 Análisis visual superficial

Se destacan algunas manifestaciones verificadas en las mezclas. En la mezcla BAC.PE se notó la formación de productos cicatrizantes en grietas secundarias en la muestra y su deposición superficial, ver Figura 5.

Como se puede destacar, aparentemente, la limitación de las fisuras cicatrizadas resulta de su máxima apertura. En la fisura principal evidenciada en esta muestra, no se notó la formación de

productos cicatrizantes. La bibliografía habla de que la curación se limita a fisuras más pequeñas (ZHANG et al., 2016; JIANG et al., 2020). Se notó en las muestras que el producto cicatrizante se presenta en formato de placa. La bibliografía afirma que esta forma de placa se atribuye a la presencia de calcita, producto esperado en soluciones bacterianas (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; ALGHAMRI et al., 2016). En relación a la mezcla que contiene bacterias en AE, se notó la formación de productos dentro de la grieta, como se muestra en la Figura 6.

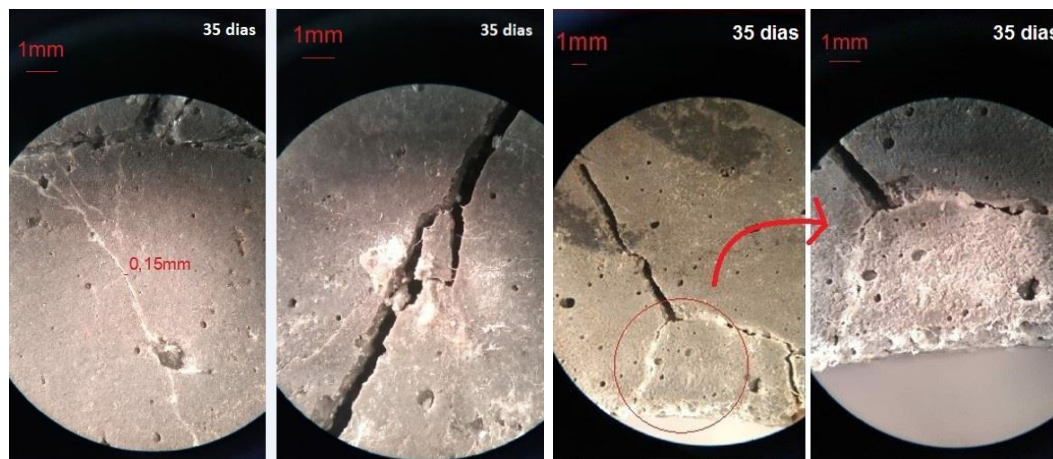


Figura 5. Autorreparación en la mezcla BAC.PE - Muestra 1.

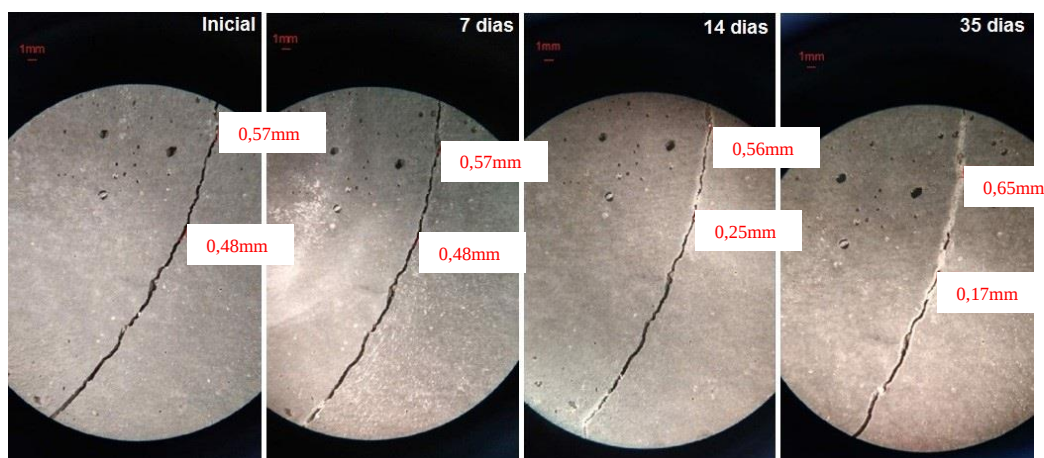


Figura 6. Autorreparación en la mezcla BAC.AE - Muestra 2.

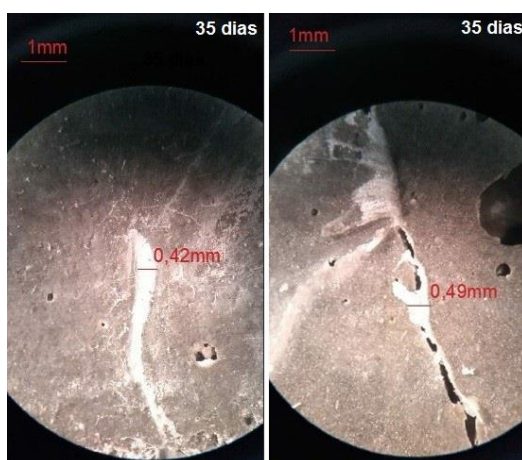


Figura 7. Autocuración en la mezcla BAC.AE - Muestras 3 y 1.

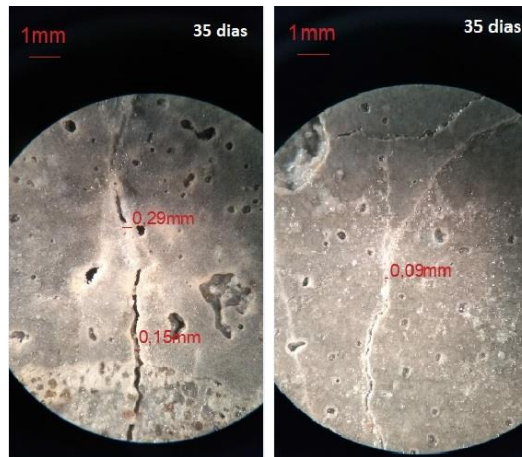


Figura 8. Autocuración en la mezcla SS: Muestras 1 y 2.

Hubo cicatrización en varios puntos a lo largo de la fisura, siendo el ancho de fisura completamente sellado más grande de 0.57 mm. Se notó el carácter progresivo de la cicatrización, siendo la hendidura inicial de 0.48 mm con solo 0.17 mm en la edad final, de acuerdo con Zhang et al. (2017). Otra observación que se puede hacer es que la distribución del producto no fue uniforme en la fisura, lo que puede resultar de la disponibilidad de perlita en el sitio para la liberación del producto de regeneración y la consecuente formación de calcita, lo cual está en línea con el estudio realizado por Alghamri et al. (2016).

En la Figura 7, se muestra la línea BAC.AE con cicatrización de 0.42 mm y 0.49 mm, respectivamente. Se observa que no solo ocurrió la formación de un producto de cicatrización, sino que también se formó en un espesor mayor que la apertura inicial, lo que indica un depósito en la superficie de la muestra. Este tipo de ocurrencia se atribuye a la presencia de calcita, como se mencionó anteriormente. Los autores Rais y Khan (2021) encuentran un aspecto similar a la cicatrización observada en esta investigación.

Con respecto a la mezcla SS, la Figura 8 muestra una fisura con una apertura inicial de 0.31 mm y una apertura final de 0.09 mm. También es importante señalar que hubo cicatrices en placas puntuales en ambas muestras, visibles al microscopio a partir de los 14 días. Esto se puede atribuir a la existencia de pequeños poros superficiales que permiten la acumulación de agua, creando así un ambiente propicio para la autocicatrización. En la mezcla SS, el espesor máximo de la fisura cicatrizada fue de 0.29 mm, presentado en la muestra 1.

Finalmente, es interesante notar que la cicatrización, en todas las muestras, ocurre principalmente de manera puntual. Este comportamiento probablemente se deba a la dispersión de las cápsulas en la estructura interna de las muestras. En la mezcla SS, pueden haber ocurrido fallas en la dispersión del silicato de sodio, lo cual está en línea con lo señalado por Van Tittelboom y Belie (2013). Además, se notó que la cicatriz comienza a formarse en la pared de la grieta, avanzando gradualmente al centro, corroborando el estudio de Al-Tabbaa et al. (2019).

Al comparar con la bibliografía, se ve que Zhang et al. (2017), recuperaron grietas de hasta 0.79 mm a los 28 días de curado, y esta diferencia probablemente se observó porque los autores utilizaron otro material regenerador, específicamente, la bacteria *Bacillus cohnii* encapsulada en perlita y recubierta con geopolímero. Asimismo, Jiang et al. (2020), al estudiar la encapsulación de *B. cohnii* en perlita expandida, lograron sellar grietas de hasta 0.4 mm, valor muy cercano a los encontrados en el presente trabajo. Liu et al (2021) informan una cicatrización de 0.25 mm.

Aún en comparación con la literatura, Van Tittelboom y de Belie (2013) prueban que no hay linealidad en la curación de fisuras, como se muestra en los resultados. Esto ocurre porque la cicatrización solo ocurre si hay material regenerador disponible, por lo que cuando no hay evidencia de curación, no hay suficiente agente regenerador disponible para que la fisura se cierre.

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para el espesor máximo cicatrizado en cada muestra de estudio.

Tabla 3. Resumen de los resultados.

Mezcla	Muestra	Espesor máximo cicatrizada
BAC.PE	1	0.16 mm
	2	0.14 mm
	3	0.12 mm
BAC.AE	1	0.38 mm
	2	0.57 mm
	3	0.42 mm
SS	1	0.29 mm
	2	0.22 mm
	3	No se produjo curación

Finalmente, podemos ver que la mezcla BAC.AE fue capaz de cicatrizar grietas con espesores significativamente mayores que las otras dos mezclas, ya que la dimensión más grande sellada por ella fue de 0.57 mm, mientras que las mezclas BAC.PE y SS curaron 0.16 mm y 0.29 mm, respectivamente. Dicho esto, se concluye que la mezcla que presentó mayor eficiencia en el análisis visual de fisuras fue la mezcla BAC.AE, por su mayor cantidad de fisuras selladas y por presentar los mayores espesores cicatrizados.

4.3 Microtomografía 3D

La prueba de microtomografía 3D se realizó en el Instituto Tecnológico de Ensayos y Seguridad Funcional (itt Fuse), de Unisinos. La Figura 9 muestra los resultados generados por microtomografía para la mezcla BAC.PE. Se puede notar que el PE utilizado en la mezcla, fácilmente detectable por la coloración amarilla, se distribuye uniformemente por toda la muestra, con solo unas pocas manchas con acumulación de agregado. Esta distribución es favorable una vez que se producen las grietas, ya que es más probable que encuentren y rompan las cápsulas de PE, liberando el agente cicatrizante. Además, presentan vacíos en un porcentaje de 11.45% en proporción al volumen total de la muestra ensayada, valor que es consistente con los resultados de compresión presentados anteriormente, ya que los concretos más porosos tienden a tener menores resistencias (YANG; JIANG, 2003).

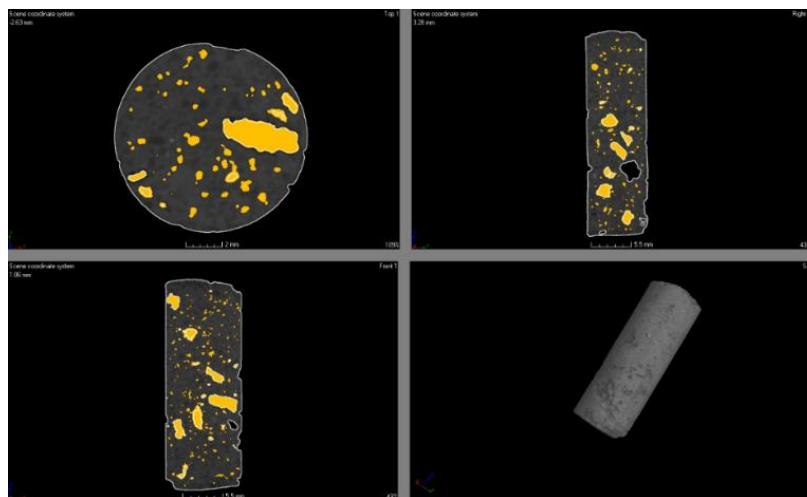


Figura 9. Microtomografía de la mezcla BAC.PE.

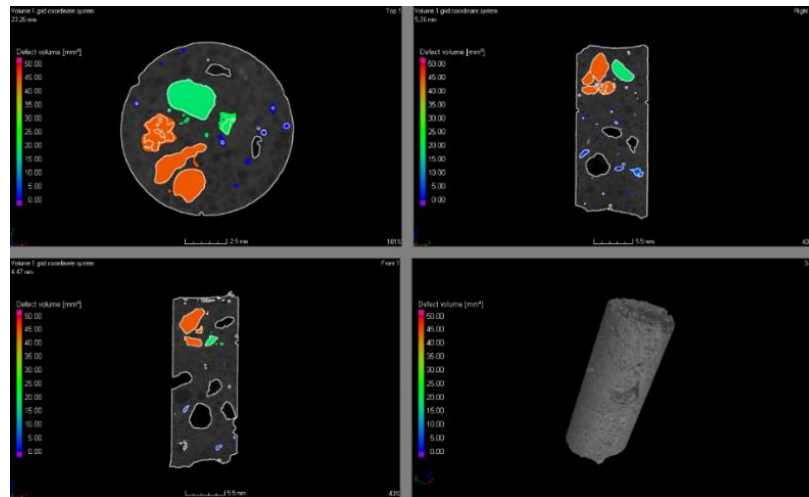


Figura 10. Microtomografía de la mezcla BAC.AE.

Se puede observar, en la Figura 10, que en la mezcla BAC.AE, existe una mala distribución de los AE en la estructura interna de la muestra ensayada, siendo los AE los puntos con diferentes colores dentro de la muestra, lo que puede haber afectado la distribución del agente curativo. El porcentaje de vacíos encontrado para esta muestra analizada es de 8.38% en proporción a su volumen, lo que puede estar relacionado con la mayor resistencia a la compresión observada para esta mezcla. Finalmente, la Figura 11 presenta los resultados de la microtomografía para la mezcla SS, donde es posible observar una adecuada distribución de los constituyentes de la mezcla a lo largo de toda la muestra, situación que, como se señaló anteriormente, es favorable para la cicatrización de la formación de producto en toda la superficie de la muestra de argamasa. El porcentaje de vacíos encontrados en esta muestra es del 2.28% en proporción a su volumen total.

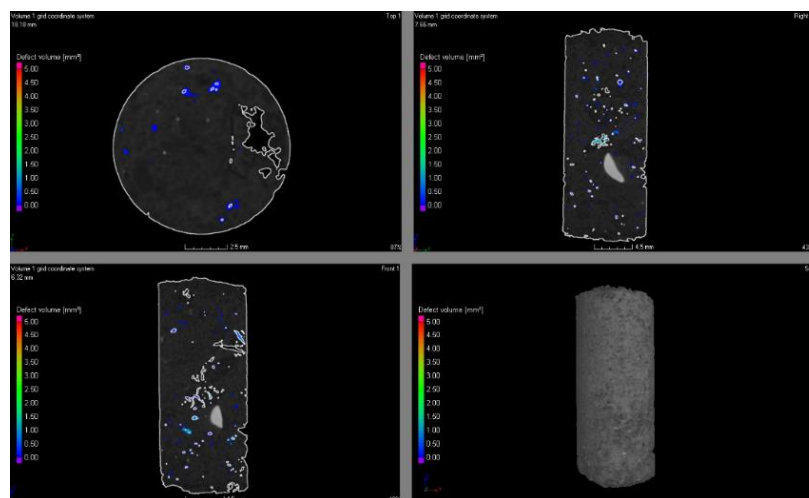


Figura 11. Microtomografía del trazo SS.

En cuanto a la microtomografía de la mezcla SS, es pertinente destacar que la muestra a la que se refiere no contiene agregados ligeros, por lo que el porcentaje de vacíos verificados se atribuye a fallas en la compactación, la presencia de una zona de transición y los vacíos entre materiales. Analizando comparativamente los vacíos de las tres muestras, se puede observar que las dos mezclas que contienen AE y PE tuvieron valores mucho más altos, ya que incluso después de la impregnación con solución bacteriana permaneció la estructura porosa del PE, lo que resultó en la identificación de vacíos. En la mezcla SS, con mayor compactación, se observó un índice mucho

menor. Al respecto, cabe mencionar que no se percibe daño en la incorporación de SS directamente a la matriz.

Como señalan Zhang et al (2021), existe una influencia en relación con la distribución de cápsulas y huecos en un concreto autorregenerador, ya que dichos puntos influyeron en la distribución del agente promotor autorregenerador. Si bien se reconoce esta influencia, no se percibió una relación entre el porcentaje de vacíos detectados y la cicatrización máxima registrada. Por tanto, es necesario analizar la distribución de los poros capilares y no su cuantificación en términos de volumen total.

Madalena, Taha y Garder (2021) evaluaron los poros del concreto autoregenerador y se dieron cuenta de que, así como se produce la cicatrización en la grieta, los productos pueden formarse en los vacíos presentes en el material. En este sentido, existe la necesidad de analizar la porosidad a lo largo del tiempo, lo que puede mejorar la microestructura del concreto, sin embargo, puede afectar la distribución del producto cicatrizante.

5. CONCLUSIÓN

La prueba de resistencia mecánica mostró que la mezcla con mejor comportamiento mecánico fue la mezcla BAC.AE, con 53.1 MPa a los 35 días, frente a 42.5 MPa y 40.4 MPa para las mezclas BAC.PE y SS, respectivamente. Además, también fue la mezcla BAC.AE la que presentó mayor capacidad de cicatrización cuando se realizó el análisis superficial de los CP, teniendo 0.57 mm como máxima fisura sellada. En las mezclas BAC.PE y SS, el valor máximo fue de 0.16 mm y 0.29 mm, respectivamente.

Hubo formación de productos dentro de las fisuras, principalmente en la línea SS. La cicatrización de grietas se produjo de forma más puntual que a lo largo de toda su extensión.

Mediante el análisis de la microtomografía 3D, se pudo comprobar que los materiales constituyentes de la argamasa se encontraban bien dispersos dentro de las matrices cementicias.

Así, con todos estos datos, es posible concluir que la mezcla más eficiente, en general, fue la mezcla BAC.AE. Sin embargo, desde el punto de vista de la producción y aplicación a gran escala, existen beneficios y la posibilidad de utilizar la mezcla SS, ya que los procedimientos involucrados en la impregnación de las cápsulas se eliminan del proceso de producción del hormigón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a itt Performance por su apoyo en la realización de esta investigación.

7. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006), *NBR NM 45: Agregados - Determinação da*

massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.

Achal, V., Mukherjee, A., Reddy, M. S. (2011), *Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 38:1229-1234, <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-010-0901-8>

Al-Tabbaa, A., Litina, C., Giannaros, P., Kanellopoulos, A., Souza, L. (2019), *First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 208:669-685, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>

Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016), *Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete*. Construction and Building Materials. 124:910-921, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>

Carmona Filho, A., Carmona, T. (2013), “*Fissuração nas estruturas de concreto*”. Boletim Técnico ALCONPAT Internacional.

Cappellesso, V. G. (2018), “*Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Chemrouk, M. (2015), *The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete*. Procedia Engineering. 125:713-724, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.112>

Gupta, S., Pang, S. D., Kua, H. W. (2017), *Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review*. Construction and Building Materials. 146:419-428, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>

JIANG, L. et al. *Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications*. Construction and Building Materials, v. 232, p. 117222, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117222>

Jonkers, H. M. (2011), *Bacteria-based self-healing concrete*. Frankfurter Afrikanistische Blätter. 8:49-79.

Jonkers, H. M., Thijssen, A. (2010). “*Bacteria Mediated Remediation of Concrete Structures*” in: K. van Breugel, G. Ye, Y. Yuan (Eds.), 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, [S. l.], pp. 833-840.

Krishnapriya, S., Babu, D. L. V., Arulraj, G. P. (2015), *Isolation and identification of 60 bacteria to improve the strength of concrete*. Microbiological Research. 174:48-55, <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.03.009>

Li, V. C., Herbert, E. (2012), *Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure*. Journal of Advanced Concrete Technology. 10:207-218, <https://doi.org/10.3151/jact.10.207>

LIU, C et al. (2021), *Experimental and analytical study on the flexural rigidity of microbial self-healing concrete based on recycled coarse aggregate (RCA)*. Construction and Building Materials, Vol 85, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122941>

Lottermann, A. F. (2013), “*Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso*”, Monografia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, p. 66.

Maddalena, R., Taha, H., Gardner, D. (2021), *Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: sorptivity and pore structure*. Developments in the built environment, Vol 6, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100044>

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. IBRACON, São Paulo, Brasil, p. 782.

Milla, J. et al. (2019), *Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate*. Construction and Building Materials, v. 201, p. 526–538, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.193>

- Pacheco, F. (2020), “Análise da confiabilidade dos mecanismos de autorregeneração do concreto em ambientes agressivos de exposição”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, p. 348.
- Patel, P. (2015), *Helping Concrete Heal Itself*. ACS Central Science. 1(9):470-472.
- Pelletier, M. M., Brown, R., Sshukla, A., Bose, A. (2011), *Selfhealing concrete with a microencapsulated healing agent*. University of Rhode Island, Kingston, RI, USA.
- Rais, M. S., Khan, R. A. (2021), *Experimental investigation on the strength and durability properties of bacterial self-healing recycled aggregate concrete with mineral admixtures*. Construction and Building Materials. Vol 306, Nov 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124901>
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S. (2001), *Remediation of concrete using microorganisms*, ACI Mater. J. 98(1).
- Schwantes-Cezario, N., Nogueira, G. S. F., Toralles, B. M. (2017), *Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de B. subtilis AP91*. Revista de Engenharia Civil IMED. 4(2):142-158, <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2017.v4i2.2072>
- Seifan, M., Samani, A. K. and Berenjian, A. (2016), *Bioconcrete: next generation of selfhealing concrete*, Applied Microbiology and Biotechnology. 100:2591-2602, <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Fraaij, A. (2011), *Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a selfhealing agent in blast furnace slag mortar*. Heron. 56(1-2):17-36.
- Souradeep, G., Kua, H. W. (2016), *Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering. 25:864-870, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001687](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001687)
- Stanaszek-Tomal, E. (2020), *Bacterial Concrete as a Sustainable Building Material?* 2020. Sustainability, 12, 696; <http://doi:10.3390/su12020696>
- Tittelboom, K. V., De Belie, N. (2013), *Self-Healing in Cementitious Materials - A Review*. Materials. 6:2182-2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
- Van Breugel, K. (2007). “Is there a market for self-healing cement-based materials?” in: First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee (Netherlands), pp. 1-9.
- Xu et al. (2020), *Application of ureolysis-based microbial CaCO₃ precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion*. Construction and Building Materials, Vol 265, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120364>
- Wan, P, et al. (2021), *Self-healing properties of asphalt concrete containing responsive calcium alginate/nano-Fe₃O₄ composite capsules via microwave irradiation*. Construction and Building Materials, Vol 310, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125258>
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Vlierbergue, S. V., Verstraete, W., De Belie, N. (2014), *X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete*. Cement and Concrete Composites. 53:289-304, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.014>
- Wang, J. et al. (2017), *Bacillus sphaericus LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete*. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 101, n. 12, p. 5101–5114, <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8260-2>
- Yang, J., Jiang, G. (2003), *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*, Cement and Concrete Research. 33:381-386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3)
- Zhang, X et al. (2021), *Effects of carrier on the performance of bacteria-based self-healing concrete*. Construction and Building Materials, Vol 305, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124771>