REVISTA DE
ARQUITETURA IMED

Técnicas e Metodologias de Biomineralização na Cicatrização de Fissuras do Concreto

Techniques and Methodologies of Biomineralization in the Healing of Concrete Cracks

Vinícius Mello(1); Fernanda Pacheco(2); Bernardo Fonseca Tutikian(3)

1 Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo/RS, Brasil.
E-mail: vmullerm@outlook.com | ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5078-446X
2 Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo/RS, Brasil.
E-mail: fernandapache@unisinos.br | ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4610-7845
3 Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo/RS, Brasil.
E-mail: bftutikian@unisinos.br | ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1319-0547

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 2, p. 164-182, Julho-Dezembro, 2019 - ISSN 2318-1109

DOI: https://doi.org/10.18256/2318-1109.2019.v8i2.3679

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*
Editor-chefe: Marcos L. S. Oliveira

Como citar este artigo / How to cite item: clique aqui!/click here!

Resumo

As estruturas de concreto tornaram-se usuais mundialmente, porém o material sofre fissuração, propiciando a entrada de agentes deletérios. Atualmente, alguns países já despendem de mais gastos na recuperação de estruturas existentes do que na construção de novas estruturas. Assim, na última década, pesquisadores têm avaliado técnicas para promover a autocicatrização do concreto. Sabe-se que o concreto possui uma pequena capacidade de cicatrização pela hidratação tardia de partículas de cimento anidro, porém limitando-se a pequenas fissuras e aumentando o consumo de cimento, o que gera desvantagens financeiras e ambientais. Na busca por técnicas mais promissoras, tem sido estudada a utilização de bactérias para a produção de biominerais, que cicatrizam as fissuras, reduzem a permeabilidade e absorção de água, e aumentam a resistência à compressão. Este estudo busca apresentar um estudo da arte dessa técnica, abordando as espécies utilizadas e a metodologia de inserção dos microrganismos na matriz do concreto. Dentre os gêneros taxonômicos estudados, há vantagens na utilização das bactérias do gênero *Bacillus*, por apresentarem fisiologia resistente à ambientes agressivos. Quanto à inserção das bactérias no concreto, são apresentadas vantagens e desvantagens em relação ao seu encapsulamento em agregados leves e à sua adição direta na água de amassamento do concreto. Foram identificadas lacunas a serem ainda estudadas, como a redução dos custos envolvidos na preparação do material, o aprimoramento de metodologias de dimensionamento, a simplificação dos processos construtivos, a verificação da durabilidade deste concreto, e o estudo da vida inativa nas bactérias dentro do concreto edurecido.

Palavras-chave: Autocicatrização. Bioconcreto. Fissuras. Bactérias. Microrganismos.

Abstract

Concrete structures have become common all over the world, however the mateiral undergoes a cracking process, allowing the entrance of deleterious agents. Some countries are now spending more money on recovering existing structures than on building new ones. Thus, in the last decade, researchers have evaluated techniques to promote the self-healing of concrete. It is known that the concrete has a small healing capacity due to the late hydration of anhydrous cement partickes, but it is limited to small cracks and it increases the consumption of cement, which generates financial and environmental disadvantages. In the search for more promising techniques, it has been studied the use of bacteria for the production of biominerals, which heal the cracks, reduce the permeability and the water absorption, and increase the compressive strenght. This study aims to present the state-of-art of this technique, approaching the species used and the methodology of insertion of the microorganisms in the concrete matrix. Among the taxonomic genus studied, there are advantages in the use of bactéria of the genus *Bacillus*, because they have physiology resistant to aggressive environments. As for the insertion of the bacteria in the concrete, advantages and disadvantages are presented in relation to their encapsulation in lightweight aggregates and their direct addition in the kneading water of the concrete. Gaps were still to be studied, such as the reduction of costs involved in the preparation of the material, improvement of design methodologies, simplification of the construction processes, verification of the durability of this concrete, and study of the inactive life in the bactéria within the hardened concrete.

Keywords: Self-healing. Bioconcrete. Cracks. Bacteria. Microorganisms.

1 Introdução

Por todo o mundo existem edificações que apresentam uma vida útil não satisfatória. Isso pode ocorrer devido à razões puramente culturais, como uma renovação dos imóveis de tempos em tempos (CELADYN, 2014), ou pela sua deterioração precoce (CHEMROUK, 2015). Li e Herbert (2012) e Sangadji (2015) apontam que, em países desenvolvidos, são dispendidos maiores gastos com manutenção, reparo e reconstrução, do que com a construção de edificações novas. Essas atividades geram custos financeiros, sociais, ambientais e culturais (CELADYN, 2014; LI; HERBERT, 2012; LICORDARI, 2015). Assim, é necessário o estudo de técnicas que aumentem a durabilidade das construções.

As estruturas em concreto armado são utilizadas mundialmente (CHEMROUK, 2015), porém, conforme apontam Mehta e Monteiro (2014), elas apresentam diversas formas de deterioração, como a fissuração. Filho e Carmona (2013) indicam as fissuras como os danos mais comuns no concreto, ao que Granger (2006) aponta que sua ocorrência reduz suas propriedades resistentes, vedantes e de transferência de esforços.

Mehta e Monteiro (2014) apontam um total de 17 causas para a fissuração do concreto, e que sua ocorrência pode surgir de 10 minutos após seu lançamento até mais do que 2 anos após a concretagem, além de sua relação com a perda de resistência e de rigidez do material, inutilizando-o como elemento estrutural. Sabe-se que a fissuração ocorre quando há uma interconexão dos poros internos naturais a qualquer concreto (RECENA, 2014). Breugel (2007), Ferrara *et al.* (2018) e Zhang *et al.* (2017) afirmam que essas fissuras levam ao ingresso de agentes degradantes na forma de fluidos do ambiente externo, que reagem química e/ou fisicamente com sua estrutura interna (CLAISSE; ELSAYAD; SHAABAN, 1997). Zhang *et al.* (2017) apontam alguns destes agentes como os sulfatos e cloretos.

Foi proposto por Mehta e Monteiro (2014) um modelo holístico de deterioração do concreto a partir dos efeitos ambientais mais frequentes. Deste modelo, é interessante perceber que o surgimento das primeiras fissuras pode ser indefinidamente prolongado através de manutenções à impermeabilidade do material. Porém, após o surgimento de uma fissura, inicia-se um ciclo onde elas mesmas são responsáveis pelo surgimento de novas fissuras, devido à mecanismos como a corrosão do aço e ataque por sulfatos, por exemplo. Kitsutaka e Nakamura (1999) também apontaram esta natureza cíclica da fissuração no concreto.

Atualmente, para enfrentar esta limitação, faz-se a recuperação de fissuras através de técnicas caras e que utilizam produtos químicos potencialmente nocivos à saúde e ao meio ambiente (KRISHNAPRIYA; BABU; ARULRAJ, 2015). Assim, é possível notar a necessidade de estudos para elaboração de técnicas que mitiguem o surgimento das fissuras, sendo assunto desta pesquisa as técnicas que envolvem processos de autocicatrização pela inclusão de microrganismos ao concreto.

CC BY

1.1 Objetivo

Produção de um referencial teórico, reunindo e organizando informações referentes à diferentes metodologias já elaboradas para autocicatrização do concreto, com grande enfoque para os processos de biomineralização, citando vantagens e desvantagens de cada técnica. Para esse fim, desenvolveu-se uma pesquisa científica de resultados a seguir dissertados.

2 Autocicatrização e seus Mecanismos

Entende-se por autocicatrização a capacidade que qualquer material cimentício e ligante hidráulico, dentre eles, o cimento *Portland*, apresenta de selar suas fissuras sem necessidade de manutenções, similarmente à cicatrização da pele ou de ossos em organismos vivos (FERRARA *et al*., 2018; GRANGER, 2006). Existe uma variedade de diferentes termos para referir-se à autocicatrização e seus processos. Porém, buscando a fixação de uma etimologia padrão, De Rooij *et al.* (2011) definem dois mecanismos que levam à autocicatrização dos concretos: os mecanismos autógeno e autônomo.

2.1 Mecanismo Autógeno

De Rooij *et al.* (2011) afirmam que a autocicatrização ocorre, aqui, através dos materiais já presentes em um concreto qualquer. Conforme Edvardsen (1999), muitos fatores podem ocasionar a cicatrização autógena, com destaque à hidratação contínua da pasta de cimento. Como limitação, pelo consumo das partículas de cimento anidro no processo, é inviável a atuação em múltiplos fenômenos de fissuração (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Salienta-se que não se busca aqui o estudo do mecanismo autógeno, não sendo então abordados maiores detalhes sobre o processo. Entretanto, cabe notar que a produção do cimento *Portland* emite 9,5% do total de CO_2 emitido na atmosfera, além de outros gases poluentes (OLIVIER *et al*., 2014). Como agravante, Chen, Hong e Xu (2015) apontam que devido aos processos de urbanização houve um aumento expressivo no consumo deste material. Também, Van Tittelboom e De Belie (2013) relatam que este mecanismo tem um bom funcionamento apenas para fissuras de reduzida espessura.

2.2 Mecanismos Autônomos

Os mecanismos autônomos de autocicatrização são aqueles obtidos através da inserção de materiais ao concreto especificamente com esta finalidade (DE ROOIJ *et al*., 2011). Entre esses materiais, existem estudos propondo a inserção de pozolanas

(ALYOUSIF, 2016; ŞAHMARAN; LI, 2009), de soluções químicas encapsuladas em agregados leves (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; SISOMPHON; COPUROGLU; FRAAIJ, 2011), e de soluções bacterianas, conforme se abordará no capítulo seguinte. Dentre as possibilidades, Wang *et al.* (2012) apontam que a biomineralização através da inserção de soluções bacterianas apresenta a melhor compatibilidade com a matriz do concreto, além de ser uma melhor opção pela ótica ambiental.

3 Biomineralização

A autocicatrização através da adição de soluções bacterianas ocorre pela precipitação de calcita[1] induzida microbiologicamente (MICP), sendo uma solução biomimética durável e econômica, quando tem seus custos comparados aos de reparos em estruturas (AFIFUDIN *et al.*, 2011; KRISHNAPRIYA; BABU; ARULRAJ, 2015). Conforme apontam Madigan *et al.* (2016), todas as células apresentam metabolismo, isto é, retiram nutrientes do ambiente em que estão, os transformam, e excretam este produto de volta ao ambiente. A tabela 1 apresenta diferentes metabolismos que levam à precipitação do carbonato de cálcio.

Tabela 1. Diferentes metabolismos para MICP

<table>
<tr><td rowspan="2">Bactérias autotróficas</td><td colspan="5">Bactérias heterotróficas</td></tr>
<tr><td>Metabolismo assimilativo</td><td colspan="4">Metabolismo dissimilativo</td></tr>
<tr><td>Metanogênese não-metilotrófica</td><td rowspan="2">Decomposição de ureia</td><td colspan="4">Oxidação de carbono orgânico</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fotossíntese anoxigênica</td><td rowspan="4">Amonificação de aminoácidos</td><td colspan="2">Aeróbio</td><td colspan="2">Anaeróbio</td></tr>
<tr><td>Processo</td><td>Receptor de elétron</td><td>Processo</td><td>Receptor de elétron</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fotossíntese oxigênica</td><td>Respiração</td><td>O_2</td><td>Respiração</td><td>NO_3^-/NO_2^-</td></tr>
<tr><td>Oxidação de metano</td><td>CH_4/O_2</td><td>Redução de sulfato</td><td>SO_4^{2-}</td></tr>
</table>

Fonte: De Belie e Wang (2015) – traduzido pelos autores.

Conforme apontam os autores, é possível notar que existem muitos processos[2] que levam à biomineralização, dependendo da espécie utilizada e seu metabolismo.

1 Especialmente, quando utilizadas bactérias reduzidas em sulfato, há a formação de carbonatos de cálcio e magnésio, precipitando dolomita (ALSHALIF *et al.*, 2016). Também pode vir à ocorrer, junto à calcita, a precipitação de vaterita, outra forma cristalina do carbonato de cálcio (TANG; YU; ZHAO, 2009), porém essa precipitação se dá em menor quantidade (DE MUYNCK *et al.*, 2008).

2 Para completa compreensão dos processos físico-químicos envolvidos, bem como dos termos técnicos na área da microbiologia, consultar Madigan *et al.* (2016).

É indicado também que a precipitação de carbonato de cálcio é mais abundante pelas bactérias heterotróficas. Nota-se que existem 3 metabolismos autotróficos para MICP, porém, não foram encontrados estudos que fizessem proveito destas bactérias. Conforme abordar-se-á nos itens seguintes, as pesquisas concentram-se nos seguintes processos: hidrólise de ureia e oxidação de componentes orgânicos (WANG *et al.*, 2017).

3.1 Hidrólise de Ureia

Madigan *et al.* (2016) apontam que uma bactéria é composta por cerca de 13% de nitrogênio, o obtendo através de diversas moléculas, como, por exemplo, a amônia. É através desta necessidade dos microrganismos que ocorre a MICP por hidrólise de ureia. Os processos que levam a biomineralização são descritos por De Muynck, De Belie e Verstraete (2010) conforme as equações 1 a 5. Na presença de enzimas urease nas bactérias, ureia ($CO(NH_2)_2$) é hidrolisada em amônia (NH_3) e ácido carbâmico (NH_2COOH), conforme apresentado na equação 1. A presença da urease serve como agente catalizador, reduzindo a energia necessária para ativar a reação, e, assim, aumentando sua velocidade (MADIGAN *et al.*, 2016). A seguir, conforme a equação 2, o ácido carbâmico é espontaneamente hidrolisado em ácido carbônico (H_2CO_3) e amônia. Após, conforme as equações 3 e 4, a amônia equilibra-se com a água gerando íons hidróxido (OH^-), que por sua vez reagem com o ácido carbônico gerando carbonato (CO_3^{2-}).

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow{\text{Microrganismo}} NH_2COOH + NH_3$$	*(Equação 1)*
$$NH_2COOH + H_2O \rightarrow NH_3 + H_2CO_3$$	*(Equação 2)*
$$2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^-$$	*(Equação 3)*
$$2OH^- + H_2CO_3 \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2H_2O$$	*(Equação 4)*
$$CO_3^{2-} + Ca^{2+} \rightarrow CaCO_3$$	*(Equação 5)*

Por fim, conforme apontado na equação 5, quando há a presença de íons de cálcio, há a precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Os autores ainda relatam que a MICP por hidrólise de ureia é o método indubitavelmente mais simples e rápido para a precipitação dos biominerais. Apesar disso, De Muynck, De Belie e Verstraete (2010), Jonkers *et al.* (2010) e Seifan, Samani e Berenjian (2016) apontam que essa abordagem pode resultar em altas emissões de óxido de nitrogênio na atmosfera, uma vez que há a produção de dois íons amônio para cada íon carbonato.

Uma vasta gama de espécies tem sido estudada para biomineralização por hidrólise de ureia, conforme aponta a tabela 2.

Tabela 2. Espécies utilizadas para MICP por hidrólise de ureia

Espécies		Autores
Bacillus sp.		Achal, Mukerjee e Reddy (2013)
Bacillus sphaericus		De Muynck *et al.* (2008), Wang *et al.* (2012, 2014a, 2017, 2014b, 2014c)
Bacillus megaterium		Krishnapriya, Babu e Arulraj (2015), Wang *et al.* (2017)
Sporosarcina pasteurii		Achal, Mukherjee e Reddy (2011), Bang, Galinat e Ramakrishnan (2001), Chahal, Siddique e Rajor (2012), Ramachandran, Ramakrishnan e Bang (2001), Wang *et al.* (2017), Xu e Wang (2018)
Pseudomonas aeruginosa		Ramachandran, Ramakrishnan e Bang (2001)
Espécies aleatórias coletadas em solos alcalinos:	Bacillus megaterium	Krishnapriya, Babu e Arulraj (2015)
	Bacillus licheniformis	
	Bacillus flexus	

Fonte: Autoral.

Conforme apresentado, nota-se que há um maior uso das bactérias do gênero *Bacillus* para MICP através da hidrólise da ureia. O uso abundante dessas espécies é devido à sua extrema compatibilidade com matrizes cimentícias, que é explicada através dos aspectos fisiológicos dos microrganismos, assunto que será abordado no capítulo 4 deste trabalho.

3.2 Oxidação de Componentes Orgânicos

Madigan *et al.* (2016) apresentam uma classe de microrganismos, chamados quimiorganotróficos, que obtêm sua energia através da oxidação de compostos orgânicos. Quando utilizados para MICP, a biomineralização ocorre através de reações mais simples quando comparamos à hidrólise de ureia. Como mostra a equação 6, quando na presença de lactato de cálcio ($CaC_6H_{10}O_6$) como nutriente, ocorre sua oxidação em carbonato de cálcio ($CaCO_3$), gerando também dióxido de carbono (CO_2) e água. A seguir, na equação 7, o dióxido de carbono produzido reage então com o hidróxido de cálcio que já é presente no concreto como um produto de hidratação do cimento (JONKERS *et al.*, 2010).

$$CaC_6H_{10}O_6 + 6O_2 \rightarrow CaCO_3 + 5CO_2 + 5H_2O \quad \textit{(Equação 6)}$$

$$5CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 5CaCO_3 + 5H_2O \quad \textit{(Equação 7)}$$

Os autores apontam que a equação 7 é um processo muito similar à carbonatação

natural do concreto, porém muito mais rápido devido à intervenção bacteriana. Ainda, é interessante notar que para 1 mol de lactato de cálcio, são produzidos 6 mols de carbonato de cálcio, mostrando grande eficácia do processo. Além do lactato de cálcio, outros nutrientes podem ser utilizados como fonte de cálcio para as reações, como será visto mais adiante.

Entre os microrganismos utilizados para biomineralização neste metabolismo, estão os citados na tabela 3 a seguir. Conforme se vê, apenas o gênero *Bacillus* é alvo das pesquisas realizadas.

Tabela 3. Espécies utilizadas para MICP por oxidação de componentes orgânicos

Espécies	Autores
Bacillus sp.	Jonkers (2011), Tziviloglou *et al.* (2016)
Bacillus pseudofirmus	Jonkers *et al.* (2010)
Bacillus cohnii	Jonkers *et al.* (2010), Jonkers e Thijssen (2010), Zhang *et al.* (2017)
Bacillus alkalinitrilicus	Wiktor e Jonkers (2011)

Fonte: Autoral.

4 Fisiologia e seus Impactos à Inserção no Concreto

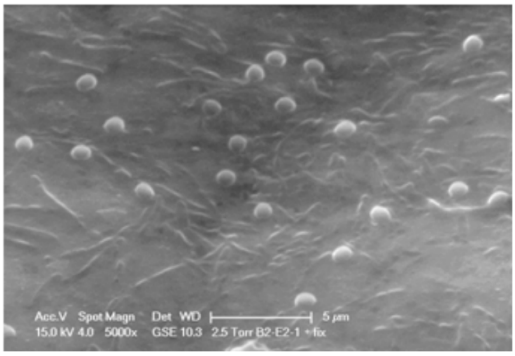
Quanto à incorporação de bactérias em uma matriz cimentícia, apenas bactérias aeróbias alcalifílicas esporuladoras são capazes de sobreviver em tal ambiente, devido à presença de oxigênio, e ao pH elevado da matriz (JONKERS *et al.*, 2010). Além do proposto pelo autor, é notável a possibilidade de utilização de bactérias anaeróbias facultativas, descritas por Madigan *et al.* (2016) como microrganismos capazes de sobreviver ou não a ambientes oxigenados. Para que seja possível compreender as classificações mencionadas, formam-se as seguintes definições através do trabalho de Jonkers (2011) e Madigan *et al.* (2016):

- Microrganismos aeróbios: aqueles que extraem sua energia de compostos apenas através de respiração, isto é, apenas na presença de oxigênio;
- Microrganismos alcalifílicos: apresentam sua melhor taxa de crescimento quando inseridos em ambiente com pH ≥ 8;
- Microrganismos esporuladores: sofrem um processo denominado diferenciação, gerando esporos (ver figura 1), células extremamente resistentes à estresses químicos e físicos, utilizadas como estrutura de sobrevivência em ambientes agressivos, podendo permanecer em estado de dormência por mais de 50 anos.

Zai e Murthy (2015) apontam o gênero *Bacillus* como capaz de produzir carbonato de cálcio e como resistente a condições extremas. Madigan *et al.* (2016)

também apresentam este gênero como o mais bem-estruturado para cultivo em meios alcalinos e o mais estudado com relação à formação de endósporos. *Bacillus sphaericus* foi analisado biologicamente quanto à sobrevivência em concretos por Wang *et al.* (2017), sendo provada sua aplicabilidade no material. No Brasil, Schwantes-Cezario *et al.* (2017) avaliaram o uso de *Bacillus subtilis* AP 91, com resultados positivos à precipitação de carbonato de cálcio.

Figura 1. Microfotografia de esporos do gênero Bacillus, com diâmetro próximo a 1 µm



Fonte: Jonkers (2011).

Para o cultivo de microrganismos *in vitro*, prepara-se inicialmente uma solução nutriente, a qual pode ser definida (feita pela adição de quantidades precisas de compostos químicos em água destilada) ou complexa (emprega componentes de produtos microbianos, animais ou vegetais, altamente nutricionais, porém de composição exata desconhecida). Feito isso, a solução é esterilizada, e as bactéria são, então, inoculadas (MADIGAN *et al.*, 2016). Os pormenores do processo variam conforme cada pesquisador, principalmente com relação à solução nutriente, sobre a qual é utilizada solução definida por alguns autores (JONKERS; SCHLANGEN, 2007, 2008), e complexa por outros (KRISHNAPRIYA; BABU; ARULRAJ, 2015; LUO; QIAN; LI, 2015; WILLIAMS; KIRISITS; FERRON, 2017).

4.1 Encapsulamento

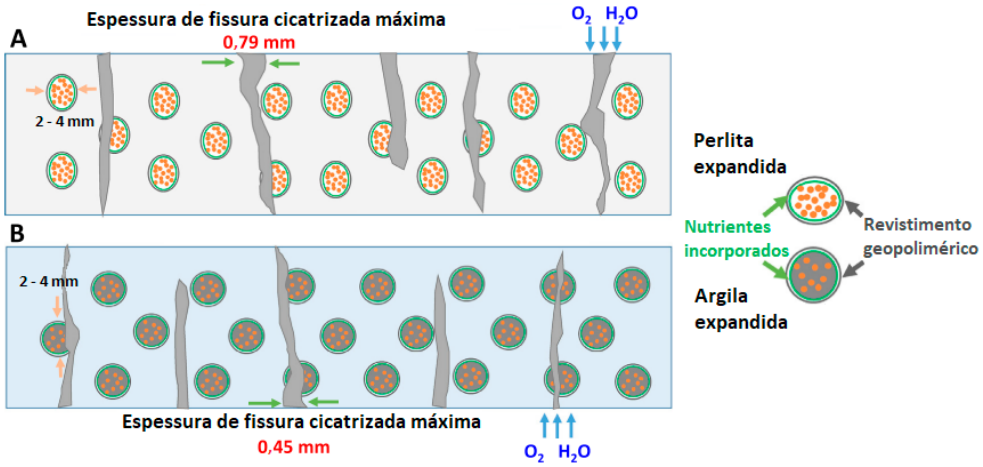
O maior obstáculo enfrentado para inserção de bactérias ao concreto é a sua sobrevivência em seu interior (LUO; QIAN; LI, 2015), que, conforme apontam Jonkers *et al.* (2010), é altamente alcalino devido à presença natural de hidróxido de cálcio, o que pode levar, em casos extremos, à morte dos microrganismos. Mesmo quando capazes de sobreviver em pH elevado, as atividades metabólicas dos microrganismos sofrem grande redução em tais condições (WANG *et al.*, 2012). Há também problema em relação às dimensões dos poros do concreto e das bactérias, pois Wang *et al.* (2014c) afirmam que os poros, em geral, têm tamanho menor do que 0,5 µm, ao passo que as bactérias mais utilizadas têm tamanho entre 1 e 3 µm, e seus esporos têm tamanho de

1 µm, conforme já visto na figura 1. Neste caso, é notável a necessidade da proteção das bactérias ao inseri-las no concreto.

Alghamri, Kanellopoulos e Al-Tabbaa (2016) explicam que, quando encapsulado, o agente cicatrizante só atua após o rompimento das cápsulas e sua liberação. Além do encapsulamento, Jonkers *et al.* (2010) e Jonkers e Thijssen (2010) apresentam a possibilidade da utilização de aditivos incorporadores de ar no concreto, buscando formar poros em seu interior que sirvam como ambiente para as bactérias. De qualquer maneira, existem também estudos que avaliam a inserção da solução bacteriana diretamente na água de amassamento do concreto (JONKERS *et al.*, 2010; PEI *et al.*, 2013).

Uma das possibilidades para encapsulamento é a argila expandida, utilizada por Jonkers (2011), Sisomphon, Copuroglu e Fraaij (2011), Tziviloglou *et al.* (2016), Wiktor e Jonkers (2011) e Zhang *et al.* (2017). Porém, Jonkers (2011) obteve uma queda de 50% na resistência à compressão aos 28 dias ao substituir 50% dos agregados pelo material. Além da argila expandida, Alazhari *et al.* (2018) obtiveram sucesso ao substituírem 20% da areia por perlita expandida, utilizando-a junto a *Bacillus pseudofirmus*. Zhang *et al.* (2017) realizaram estudo comparativo entre o encapsulamento de *Bacillus cohnii* tanto em argila expandida, quando em perlita expandida. Seus resultados podem ser vistos na figura 2.

Figura 2. Comparativo gráfico entre o encapsulamento em argila expandida e em perlita expandida



Fonte: Zhang *et al.* (2017) – traduzido e adaptado pelos autores.

Além da maior eficiência na cicatrização das amostras com perlita expandida, pode-se ver que foi utilizado revestimento geopolimérico nas cápsulas. Essa proteção é feita devido a fragilidade que suas finas paredes apresentam, o que pode levar à sua ruptura prematura (SOURADEEP; KUA, 2016). É possível também realizar a proteção das cápsulas pela pulverização de cimento sobre seu exterior úmido, conforme realizado por Sisomphon, Copuroglu e Fraaij (2011).

Ademais destes materiais, podem ser utilizados também poliuretano (BANG;

GALINAT; RAMAKRISHNAN, 2001; WANG *et al*., 2012), gel de sílica (WANG *et al*., 2012) microcápsulas a base de melanina (WANG *et al*., 2014b) e hidrogel (WANG *et al*., 2014a, 2014c). Quanto à utilização do hidrogel, os autores apontam que, além de protegerem as bactérias do ambiente agressivo, o material também é fonte de água para elas.

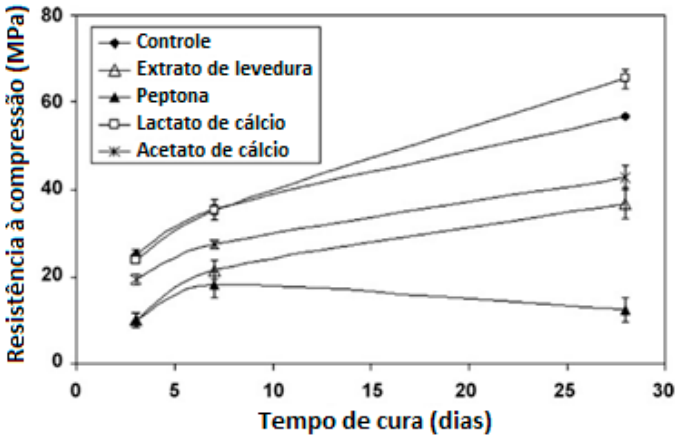
Zemskov, Jonkers e Vermolen (2011) desenvolveram modelos matemáticos que apontam a probabilidade de uma fissura tocar a cápsula, liberando o agente cicatrizante. Como variáveis em seu estudo, foram considerados a disposição das cápsulas, a largura e o comprimento da fissura, o raio da cápsula e a distância média intracapsular.

4.2 Nutrição *in situ*

Para fornecimento de uma fonte de cálcio às bactérias, são utilizados diversos nutrientes (também chamados por alguns autores de precursores químicos) como, por exemplo, nitrato de cálcio (WANG *et al*., 2014a, 2014b, 2014c), cloreto de cálcio (DE MUYNCK *et al*., 2008; PEI *et al*., 2013), acetato de cálcio (ALAZHARI *et al*., 2017; DE MUYNCK *et al*., 2008; JONKERS *et al*., 2010), e, o mais utilizado, lactato de cálcio (JONKERS, 2011; JONKERS *et al*., 2010; JONKERS; THIJSSEN, 2010; TZIVILOGLOU *et al*., 2016; WIKTOR; JONKERS, 2011; ZHANG *et al*., 2017). Entretanto, a adição de cloreto ao concreto pode gerar corrosão às armaduras, de modo que é mais comum o uso do lactato de cálcio ou do nitrato de cálcio (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016). Além dos nutrientes cálcicos definidos, podem-se utilizar nutrientes complexos, como extrato de levedura (JONKERS *et al*., 2010; WANG *et al*., 2012, 2014a, 2017, 2014b, 2014c; ZHANG *et al*., 2017), extrato de carne (XU; WANG, 2018), e peptona (JONKERS *et al*., 2010; XU; WANG, 2018).

(JONKERS *et al*., 2010) realizaram testes com 4 nutrientes diferentes, a fim de avaliar seu impacto quanto à resistência à compressão das amostras. Seus resultados podem ser vistos na figura 3 abaixo.

Figura 3. Desenvolvimento da resistência à compressão em amostras com adições de nutrientes orgânicos



Fonte: Jonkers *et al.* (2010) – traduzido pelos autores.

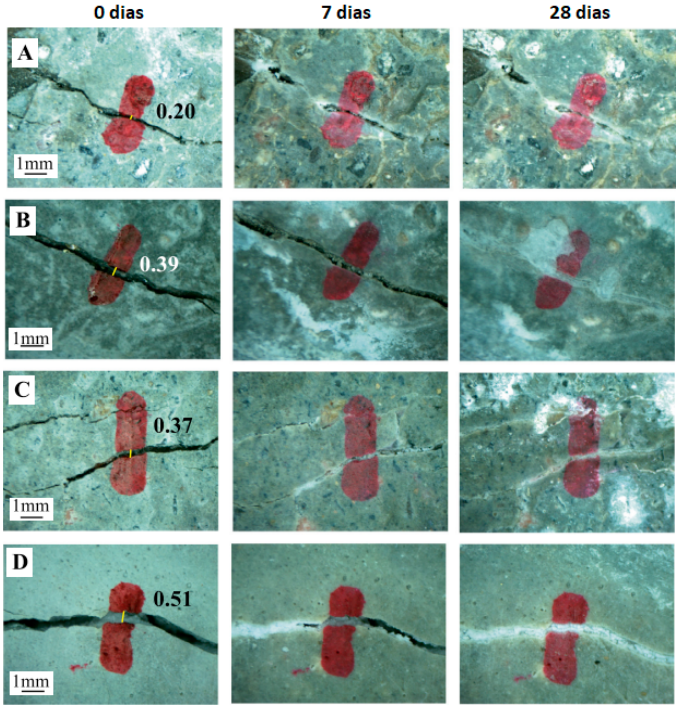
Pode-se ver que a incorporação de acetato de cálcio e extrato de levedura ao material diminuíram sua resistência à compressão em relação à amostra controle. Ainda mais inconveniente, a adição de peptona levou a um valor na ordem de 15 MPa. Em contrapartida, a inserção de lactato de cálcio apresentou melhora nos valores de resistência, atingindo um valor de resistência superior a 60 MPa. Como perspectiva futura, Patel (2015) cita que já se trabalha no desenvolvimento de nutrientes a base de açúcar, na tentativa de substituição ao lactato de cálcio, visto seu alto custo.

5 Efeitos no Concreto

Os estudos já realizados têm apresentado resultados promissores. De Muynck *et al.* (2008), ao adicionar *Bacillus sphaericus* para tratamento superficial em concreto, obtiveram valores de absorção de água, permeabilidade à gases e aspecto cromático comparáveis aos obtidos pela aplicação de repelentes convencionais, como silanos e siloxanos. Alshalif *et al.* (2016) também apontam para a redução na absorção de água, o que aumenta a durabilidade do material.

Em análise visual à cicatrização das fissuras, Zhang *et al.* (2017) apresentam, conforme a figura 4, um diagnóstico por imagem da biomineralização de carbonato de cálcio, demonstrando o potencial da técnica. É possível notar que houve cicatrização completa em uma fissura com tamanho máximo de 0,51 mm aos 28 dias de cura do material. Ao avaliar as espécies mais empregadas, sua concentração e o efeito na resistência dos concretos, Vijay, Murmu e Deo (2017) elaboraram uma tabela síntese, aqui apresentada na tabela 4.

Figura 4. Biomineralização ao longo de 28 dias em 4 amostras de concreto



Fonte: Zhang *et al.* (2017).

Tabela 4. Impacto na resistência à compressão por cada espécie e concentração utilizada

Bactéria utilizada	Melhores resultados em relação à resistência à compressão	Concentração da solução bacteriana
Bacillus sp.	Resistência 40% maior que as amostras controle	5 x 10^4 células/ml
Bacillus megaterium	Acréscimo máximo de 24% em concreto de 50 MPa	30 x 10^5 células/ml
Bacillus subtilis	Melhoria em 12% comparado às amostras controle com agregados leves	2,8x10^8 células/ml
Bacillus aerius	Acréscimo de 11,8% comparado às amostras controle dosadas com 10% de cinza de casca de arroz	10^5 células/ml
Sporosarcina pasteurii	Resistência 35% maior que as amostras controle	10^5 células/ml
Cepa AKKR5	10% de acréscimo comparado às amostras controle	10^5 células/ml
Shewanella spp.	25% de acréscimo comparado às amostras controle	10^5 células/ml

Fonte: Vijay, Murmu e Deo (2017) – traduzido e adaptado pelos autores.

Conforme se vê, não houve em nenhum dos estudos redução da resistência à compressão, e sim o oposto. Os acréscimos alcançados na resistência mostram variação de 10% a 40% em relação às amostras controle, moldadas sem a solução bacteriana.

Quanto à concentração de células por mililitro de solução, há uma variação entre 10^5 e 2,8 x 10^8, não havendo, porém, proporcionalidade direta entre o acréscimo da resistência à compressão e o aumento nos valores da concentração.

6 Lacunas Observadas

Percebem-se como brechas para o desenvolvimento da autocicatrização a análise da confiabilidade dos diferentes mecanismos, ensaiando os materiais em condições reais de exposição da estrutura, e não se limitando somente à ensaios laboratoriais (LI; HERBERT, 2012). Para permitir a utilização dos materiais em escala real, deve-se trabalhar na busca da redução de custos na produção dos agentes cicatrizantes, como o lactato de cálcio, ao qual Patel (2015) define como tendo um custo elevado (ADAK, 2015). Buscando ainda a aplicação em grande escala, Adak (2015) aponta a necessidade de um dimensionamento preciso e eliminação de processos complexos, como o encapsulamento à vácuo dos microrganismos.

Em relação aos ensaios laboratoriais, sabe-se que a água é um componente fundamental à biomineralização (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016), de forma que a maioria dos estudos realizam a cura de suas amostras em ambiente submerso. Entretanto, tal condição não condiz com grande parte dos ambientes nos quais as estruturas estão realmente inseridas (WANG *et al.*, 2014c). Assim, é necessário também uma abordagem da autocicatrização em ambientes secos ou expostos a variações de umidade.

Seifan, Samani e Berenjian (2016) ressaltam ser imprescindível a realização de simulação numérica para reduzir custos e estimar a durabilidade de concretos autocicatrizantes, a verificação da vida inativa das bactérias no interior das estruturas e a aderência entre a superfície das fissuras e os produtos de cicatrização. Também, In *et al.* (2013) apontam que ambientes marinhos apresentam potencial para inserção de concretos autocicatrizantes, ficando então aberta a lacuna de estudo em distintos ambientes.

Por fim, Talaiekhozani *et al.* (2016) apontam que o público apresenta interesse em morar e trabalhar em edificações estruturadas em concreto autocicatrizante. Porém, há uma grande preocupação dos entrevistados em relação aos efeitos que as bactérias possam trazer à sua saúde. Assim, percebe-se a necessidade de divulgação e popularização da técnica, salientando sempre o uso de microrganismos não patogênicos para composição do material.

6 Conclusões

Este estudo buscou realizar uma pesquisa bibliográfica quanto às técnicas de autocicatrização no concreto já estudadas até hoje. Como visto, existem mecanismos

que fazem uso do cimento anidro presente no concreto, da adição de pozolanas, de cápsulas contendo soluções químicas, e de soluções bacterianas. Com relação ao último, muitos microrganismos podem ser utilizados, e é imprescindível conhecer o metabolismo através do qual cada espécie obtém energia para seu crescimento, de forma que se possa avaliar qual nutriente deve ser fornecido como precursor químico ao carbonato de cálcio.

Foi visto também que muitos estudos estão sendo desenvolvidos com a finalidade de avaliar como cada novo elemento inserido ao concreto afeta suas propriedades. Com relação à resistência à compressão, a adição das bactérias mostrou-se benéfica. Porém, certos nutrientes são prejudiciais neste sentido, sendo o lactato de cálcio a melhor opção para adição ao concreto, entretanto faz-se necessária a busca por alternativas mais baratas. Além disso, foram observadas reduções na absorção e permeabilidade das amostras, o que traz melhorias quanto à durabilidade do material.

Por fim, notou-se a carência de estudos quanto à avaliação desta técnica em estruturas em escala real, além da sua submissão à agressividade ambiental realística. Ainda, faz-se necessária a avaliação do comportamento das bactérias inseridas na matriz do concreto ao longo de grandes períodos de tempo.

CC BY

Referências

ACHAL, V.; MUKERJEE, A.; REDDY, M. S. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 1–5, 2013.

ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; REDDY, M. S. Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 38, p. 1229–1234, 2011.

ADAK, A. *SELF HEALING CONCRETE*. [s.l: s.n.].

AFIFUDIN, H. et al. *Microbial Participation in the Formation of Calcium Silicate Hydrated (CSH) from Bacillus Subtilis*. Procedia Engineering. *Anais*...2011.

ALAZHARI, M. et al. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 2017.

ALAZHARI, M. et al. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 160, p. 610–619, 30 jan. 2018.

ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 2016.

ALSHALIF, A. F. et al. Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. *MATEC Web of Conferences*, v. 47, n. July, p. 01016, 2016.

BANG, S. S.; GALINAT, J. K.; RAMAKRISHNAN, V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 28, p. 404–409, 2001.

CELADYN, W. *Durability of Buildings and Sustainable ArchitectureCzasopismo Techniczne*, 2014.

CHAHAL, N.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 645–651, 2012.

CHEMROUK, M. The deteriorations of reinforced concrete and the option of high performances reinforced concrete. *Procedia Engineering*, v. 125, p. 713–724, 2015.

CHEN, W.; HONG, J.; XU, C. Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement. *Journal of Cleaner Production*, v. 103, p. 61–69, 2015.

DE BELIE, N.; WANG, J. Bacteria-based repair and self-healing of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 5, n. 1, p. 35–56, 2015.

DE MUYNCK, W. et al. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 5, p. 875–885, 2008.

DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 118–136, 2010.

DE ROOIJ, M. et al. (EDS.). *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. [s.l.] Springer, 2011.

EDVARDSEN, C. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *Aci Materials Journal*, v. 96, n. 4, p. 448–454, 1999.

FILHO, A. C.; CARMONA, T. G. *Fissuração nas Estruturas de Concreto*Mérida, 2013.

GRANGER, S. *Caractérisation expérimentale et modélisation du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures dans les bétons*. [s.l.] Ecole Centrale de Nante, 2006.

IN, C. W. et al. Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound. *NDT and E International*, v. 57, n. July 2013, p. 36–44, 2013.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, G. C. (Ed.). . *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1, 2v. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1843–1869.

JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 2, p. 230–235, 2010.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. *Frankfurter Afrikanistische Blätter*, v. 8, n. 1, p. 49–79, 2011.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. Crack Repair By Concrete-Immobilized Bacteria. *Civil Engineering*, n. April, p. 1–7, 2007.

JONKERS, H. M.; THIJSSEN, A. Bacteria Mediated Remediation of Concrete Strutures. *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure*, n. October, p. 833–840, 2010.

JONKERS, H.; SCHLANGEN, E. Development of a bacteria-based self healing concrete. *Tailor Made Concrete Structures*, p. 109–109, 2008.

KITSUTAKA, Y.; NAKAMURA, N. *PREDICTION OF CONCRETE CRACK OPENING CAUSED BY REINFORCING BAR CORROSION Concrete cracks caused by bar corrosion*. [s.l: s.n.].

KRISHNAPRIYA, S.; BABU, D. L. V.; ARULRAJ, G. P. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. *Microbiological Research*, v. 174, p. 48–55, 2015.

LI, V. C.; HERBERT, E. Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 10, p. 207–218, 2012.

LICORDARI, M. Le béton armé dans le concept de patrimoine à préserver. *e-Phaïstos*, v. 4, p. 72–82, 2015.

LUO, M.; QIAN, C. X.; LI, R. Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 87, p. 1–7, 2015.

MADIGAN, M. T. et al. *Microbiologia de Brock*. 14. ed. Porto Alegre: Grupo A Educação S.A., 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: [s.n.].

OLIVIER, J. G. J. O. et al. *Trends in global CO2 emissions: 2014 Report*. [s.l: s.n.].

PATEL, P. Helping Concrete Heal Itself. *ACS Central Science*, v. 1, n. 9, p. 470–472, 2015.

PEI, R. et al. Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 39, p. 122–130, 2013.

RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of Concrete Using Micro-Organisms. *ACI Materials Journal*, v. 98, n. 1, p. 3–9, 2001.

RECENA, F. A. P. *Retração do Concreto*. Porto Alegre: [s.n.].

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Bioprecipitation of calcium carbonate induced by Bacillus subtilis isolated in Brazil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 123, p. 200–205, 2017.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. *Bioconcrete: next generation of self-healing concreteApplied Microbiology and Biotechnology*, 2016.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; FRAAIJ, A. Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar. *Heron*, v. 56, n. 1–2, p. 17–36, 2011.

SOURADEEP, G.; KUA, H. W. Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. October, p. 864–870, 2016.

TALAIEKHOZANI, A. et al. Psychological Effects towards Humans Living in the Environment Made of Biological Concrete in Malaysia at 2015. *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*, v. 4, n. 1, p. 683–688, 2016.

TANG, H.; YU, J.; ZHAO, X. Controlled synthesis of crystalline calcium carbonate aggregates with unusual morphologies involving the phase transformation from amorphous calcium carbonate. *Materials Research Bulletin*, v. 44, n. 4, p. 831–835, 2009.

TZIVILOGLOU, E. et al. Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*, 2016.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 1008–1014, 2017.

WANG, J. et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 26, n. 1, p. 532–540, 2012.

WANG, J. et al. X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 53, p. 289–304, 2014a.

WANG, J. et al. Bacillus sphaericus LMG 22257 is physiologically suitable for self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 101, n. 12, p. 5101–5114, 2017.

WANG, J. Y. et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, v. 56, p. 139–152, 2014b.

WANG, J. Y. et al. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 110–119, 2014c.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 763–770, 2011.

WILLIAMS, S. L.; KIRISITS, M. J.; FERRON, R. D. Influence of concrete-related environmental stressors on biomineralizing bacteria used in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 611–618, 2017.

XU, J.; WANG, X. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 1–14, 2018.

ZAI, S. A. K.; MURTHY, M. K. Self Healing Concrete. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, v. 2, n. 16, p. 27–33, 2015.

ZEMSKOV, S. V.; JONKERS, H. M.; VERMOLEN, F. J. Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials. *Computational Materials Science*, v. 50, n. 12, p. 3323–3333, dez. 2011.

ZHANG, J. et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 610–617, 2017.