

Contributo biotecnológico do *Microbially Induced Carbonate Precipitation* (MICP) aplicada a construção civil

Biotechnological contribution of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) applied to civil construction

JÉSSICA CECÍLIA FREITAS DA SILVA

Graduanda em Engenharia Civil
pelo Laureate International Universities (UNINORTE)

CHARLES RIBEIRO DE BRITO

Professor Mestre do curso de Engenharia Civil
da Laureate International Universities (UNINORTE)

ELISON DE SOUZA SEVALHO

Bioteecnologista, Doutorando em Biotecnologia
pela Rede Bionorte da Universidade do Estado do Amazonas

Resumo

Evidências de envolvimento microbiano na precipitação de carbonatos levaram à exploração deste processo no campo dos materiais de construção. O objetivo principal do assunto abordado foi analisar a aplicabilidade biotecnológica da técnica MICP na construção civil. O método de pesquisa utilizado consistiu na revisão bibliográfica de artigos, relacionados ao tema. O MICP - Microbially Induced Carbonate Precipitation, traduzido para Precipitação de Carbonato Induzida Microbiologicamente, é um mecanismo biotecnológico que utiliza os íons cálcio que não foram utilizados no metabolismo de micro-organismos, acumulando-se no meio extracelular, onde ficam disponíveis para que ocorra a reação de precipitação. As tecnologias de biodeposição, bioremediação e bioconcretos, além de serem inovadoras, sua aplicação na engenharia civil aponta por meio de estudos multidisciplinares, para a possibilidade de se promover o desenvolvimento sustentável,

entrelaçando-se diferentes áreas do conhecimento na construção de alternativas para a solução dos problemas sócio-ambientais e tecnológicos.

Palavras-chave: Biotecnologia; MICP; Biodeposição; Bioremediação; Bioconcretos Construção civil.

Abstract

Evidence of microbial involvement in carbonate precipitation led to the exploitation of this process in the field of building materials. The main objective of the subject was to analyze the biotechnological applicability of the MICP technique in civil construction. The research method used consisted of the bibliographic review of articles related to the theme. The MICP - Microbially Induced Carbonate Precipitation, is a biotechnological mechanism that uses calcium ions that were not used in the metabolism of microorganisms, accumulate in the extracellular medium, where they are available for the precipitation reaction to occur. In addition to being innovative, the technologies of bioposition, bioremediation and bioconcrete, their application in engineering points to the possibility of promoting sustainable development through multidisciplinary studies, intertwining different areas of knowledge in the construction of alternatives for the solution of socio-environmental and technological problems.

Keywords: Biotechnology; MICP; Biodeposition; Bioremediation; Bioconcrete Construction.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, estamos a caminho da quarta revolução industrial, marcada pela síntese de tecnologias distintas e a união de esferas digitais, físicas e biológicas. A convergência desse conjunto pode oferecer soluções ambientalmente sustentável e econômico, e como consequência o emprego eficiente dos recursos naturais (SANEIYAN et al., 2019). Por conta de tudo isso, é preciso estudar alternativas

inovadoras capazes de adaptar os materiais as condições técnicas que a construção civil necessita (ZHANG et al., 2018).

Nesse cenário, a biotecnologia uma área importante que visa desenvolver produtos e processos biológicos através de organismos vivos (bactérias, fungos e plantas) e seus produtos (enzimas), assim como o emprego de técnicas modernas, que envolvem as engenharias genética, química, bioquímica (DE SOUZA SEVALHO, 2017). Além disso, os principais benefícios da biotecnologia ocorrem por meio do desenvolvimento de bioprodutos, visto que estes oferecem mais resistência, são sustentáveis e apresentam melhor custo benefício (DE SOUZA SEVALHO, 2017).

Assim surge a inclusão de processos biotecnológicos usando a biomineralização aplicada à construção civil, que envolvem o estudo de espécies de bactérias heterotróficas que participam do ciclo metabólico do nitrogênio, degradando ureia ou ácido úrico. Estes processos se baseiam na biomineralização induzida utilizando uma grande variedade de micro-organismos, na grande maioria bactérias do solo, que não tem ação patogênica significativa e são de fácil manuseio (VERMA et al., 2015).

Dentre os mecanismos de biomineralização, encontra-se a *microbially induced carbonate precipitation* (MICP), onde vários micro-organismos precipitam minerais de carbonato de cálcio (CaCO_3) (WU et al., 2018). Nesse fenômeno a urease apresenta fundamental papel ao hidrolisar ureia em amônia (NH_3) e carbamato (NH_2COOH), resultando em um aumento de pH e proporcionando as condições necessárias para que a formação dos cristais ocorra (GAT; RONEN; TSESARSKY, 2016).

O MICP é uma técnica ambientalmente “amigável” que vem sendo aplicada para resolver problemas ambientais incluindo a remediação de íons cálcio, radionucleotídeos e metais potencialmente tóxicos, sequestro de CO_2 , restauração de calcário em prédios históricos, bioestabilização de solos e taludes, biocimentação, proteção da superfície de argamassas, concreto e remediação de fissuras em obras (TAMAYO-FIGUEROA; CASTILLO; BRANDÃO, 2019).

A grande importância desses micro-organismos para aplicações na construção civil, é abordagem de pesquisa bastante difundida na literatura internacional, com uma variedade de artigos

científicos publicados em inglês, o que almeja uma divulgação em português desse tema tão relevante. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo levantar dados bibliográficos analisando a aplicabilidade biotecnológica da técnica MICP na construção civil.

2. METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa realizada por meio de uma revisão crítica da literatura, buscando reunir e sintetizar os resultados encontrados em trabalhos científicos que analisaram exclusivamente a aplicabilidade da técnica MICP para construção civil, contribuindo para o conhecimento da temática. Realizou-se o levantamento dos referenciais bibliográficos entre os meses de outubro de 2018 a março de 2019 nas bases de dados de *Science Direct*, Periódico da Capes e *Scielo*. Os descritores em inglês “MICP”, “*Microbial carbonate precipitation*”, “*Biomineralization*”, “*Biodeposition*”, “*Bioremediation*” “*Bioconcrete*” “*Urea hydrolysis*” e “*Biotechnology*” foram utilizadas para pesquisa deste trabalho.

3. BIOTECNOLOGIA E BIOMINERALIZAÇÃO

Dentre as definições mais amplamente aceita para Biotecnologia foi dada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), definindo como aplicação de princípios científicos e de engenharia ao processamento de materiais por agentes biológicos, para fornecer produtos e serviços (AMARAKOON et al., 2017). É no seguimento da definição de biotecnologia que se entende que a sua interdisciplinaridade promove um desenvolvimento tecnológico com aplicação prática em diversas áreas, incluindo na engenharia civil.

Dentre os processos biotecnológicos encontra-se a biomineralização uma tática dos recursos naturais importante pela qual organismos biológicos produzem minerais estruturados hierarquicamente com funções importantes (KRAJEWSKA, 2018). Estudos de biomineralização tipicamente focam na função de mediação de matrizes orgânicas em minerais inorgânicos, o que ajuda os cientistas a projetar e sintetizar materiais funcionais biosintetizados (VERMA et al., 2015).

A biomineralização é a alteração química de um ambiente por atividade microbiológica que resulta na precipitação de minerais (LI et al., 2018). Esse é um processo comum na natureza, principalmente nos ambientes marinhos, de água doce e no solo, no qual organismos vivos formam precipitados minerais. Dos minerais formados, aproximadamente 80% são cristalinos e 20% são amorfos (CAMCI-UNAL et al., 2016).

Esta síntese de minerais é dividida em duas classes: mineralização biologicamente controlada (MBC) e mineralização biologicamente induzida (MBI) (YAO et al., 2017). Na MBC os organismos usam a atividade celular para controlar, num ambiente isolado, a nucleação, crescimento, morfologia e localização final do mineral depositado (LI et al., 2018). Este processo pode ocorrer extra, inter ou intracelularmente. Um exemplo de MBC extracelular são as conchas de moluscos (YAO et al., 2017).

Na MBI os organismos, principalmente micro-organismos, secretam um ou mais produtos metabólicos que reagem com íons ou compostos do meio físico envolvente resultando na deposição subsequente de partículas minerais como subprodutos metabólicos (YAO et al., 2017). Nesta classe engloba-se a produção microbiológica de carbonato de cálcio, visto ser um processo altamente dependente das condições do meio envolvente (LI et al., 2018).

4. MICROBIALLY INDUCED CARBONATE PRECIPITATION (MICP)

O acrônimo MICP – *Microbially Induced Carbonate Precipitation*, traduzido para Precipitação de Carbonato Induzida Microbiologicamente, é um mecanismo biotecnológico que utiliza os íons cálcio que não foram utilizados no metabolismo microbiano, acumulam-se no meio extracelular, onde ficam disponíveis para que ocorra a reação de precipitação (WANG et al., 2017; WU et al., 2018).

In vivo a técnica MICP, permite que uma variedade de micro-organismos induza a precipitação de carbonatos, alterando a química da solução através de uma ampla gama de atividades fisiológicas, tais como a redução de sulfatos; fotossíntese; hidrólise de ureia; oxidação anaeróbica de sulfureto; formação de biofilme e de substância

polimérica extracelular. Contudo, a precipitação de carbonato de cálcio por bactérias via hidrólise da ureia é o método mais amplamente utilizado (VERMA et al., 2015; BIBI et al., 2018; JONGVIVATSAKUL et al., 2019).

A quantidade precipitada de carbonato de cálcio é em geral, uma função linear resultante do produto da concentração de íons de Ca^{2+} e CO_3^{2-} . As bactérias exercem papel fundamental ao influenciar a saturação atingível e a taxa de precipitação de carbonato de cálcio, regulando a morfologia dos cristais formados. Quanto mais supersaturada for a solução, maior é a chance de a precipitação de carbonato de cálcio ocorrer (MUJAH; SHAHIN; CHENG, 2017).

Segundo Saricicek et al (2018) as principais bactérias utilizadas no MICP são do gênero *Bacillus* cujo metabolismo baseia-se na uréase, na qual uma enzima transforma a ureia em gás carbônico e amônia. Na Figura 1 está apresentada uma representação esquemática da precipitação de carbonato de cálcio a partir da uréase. Os íons cálcio na solução são atraídos para a parede celular bacteriana devido à carga negativa que essa apresenta. Após a adição de ureia para as bactérias ocorre a liberação de dióxido de carbono e amônia (PHILLIPS et al., 2018).

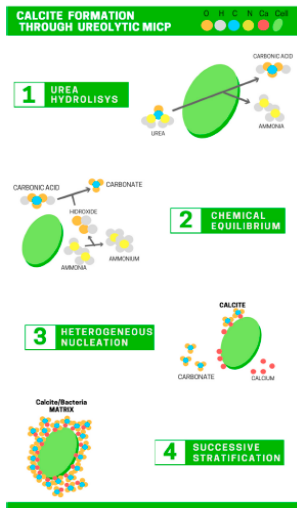


Figura 1 – Precipitação de carbonato de cálcio a partir da urease.

Fonte: Torres-Aravena et al (2018).

A MICP pode ser um meio eficaz e ambientalmente “amigável” para reparação de estruturas deterioradas. As estruturas de concreto deterioram-se devido várias razões, tais como ataques ambientais, sobrecarga ou danos acidentais e por isso exigem remediação para prolongar seu tempo de vida. É comum o uso de agentes sintéticos para reparação dessas estruturas, tais como polímeros (SANEIYAN et al., 2019).

Para Choi et al (2017) entre os mecanismos da MICP podemos destacar três diferentes métodos, o primeiro conhecido por biodeposição, onde uma camada de mineral é precipitada sobre a superfície do material. O segundo método, a bioremediação, onde o material biogênico é utilizado como agente de reparação das superfícies. E por fim, os bioconcretos, que são materiais onde se induz a produção de cristais de carbonato de cálcio entre os vazios existentes na matriz de agregados e cimento.

5. BIODEPOSIÇÃO

A biodeposição é uma técnica que se caracteriza pela precipitação de uma camada de carbonato de cálcio de origem biológica sobre a superfície porosa de materiais como rochas utilizadas em construções ornamentais, tijolos e concretos (ANBU et al., 2016). A utilização desta técnica tem como principal objetivo obstruir os poros superficiais do material prevenindo que água ou outros líquidos agressivos ingressem no seu interior e provoquem danos prematuros a estrutura (WANG et al., 2017).

A redução da porosidade do material está associada à presença de uma grande quantidade de resíduos biológicos que se depositam sobre os poros superficiais e impedem a penetração da água e outros elementos no interior do material. Com isso o material se torna mais durável e resistente ao ataque de agentes tóxicos como ácidos, de agentes corrosivos e resistente à penetração de gases (PHILLIPS et al., 2018).

As contribuições relevantes sobre quais microrganismos seriam capazes de produzir biominerais e quais condições eram necessárias para que este fenômeno ocorresse em laboratório (ANBU et al., 2016). Entretanto, foi a equipe do pesquisador Adolphe em 1990

que solicitou a primeira patente utilizando a biomineralização como técnica de proteção para a superfície de monumentos e esculturas construídas com rochas calcárias (CAMCI-UNAL et al., 2016).

Além da técnica de biodeposição por aplicação na superfície de compostos contendo bactérias, também foram desenvolvidas técnicas que utilizavam culturas microbianas já existentes na camada mais externa dos materiais e de ativação de microrganismos capazes de remover as incrustações superficiais (geralmente sulfatos) e transformar este resíduo em carbonato de cálcio (ZHANG et al., 2018). Zhuang et al. (2018) propuseram a aplicação de um meio de cultura capaz de ativar os micro-organismos já existentes sobre a superfície dos materiais para que estes produzissem uma camada protetora de carbonato de cálcio. Enquanto que o consórcio Biobrush (*Bioremediation of Building Restoration of the Urban Stone Heritage*) demonstrou ser possível utilizar micro-organismos presentes na superfície de rochas ornamentais para o processo de remoção das incrustações de sulfatos e transformação dos resíduos destas incrustações em carbonato de cálcio (PHILLIPS et al., 2018).

Recentemente, o Saneiyán et al. (2019) reuniu estudos utilizando técnica de biodeposição utilizando diferentes micro-organismos, conforme demonstrando na tabela 1, assim como no seu mesmo estudo descreve a importância da biodeposição na melhoria das propriedades de concretos produzidos a partir de materiais de construção e demolição reciclados. Os primeiros resultados indicaram que a técnica de biodeposição é promissora para redução de absorção de água por concretos constituídos de agregados reciclados (SANEIYAN et al., 2019).

Tabela 1 – Diferentes micro-organismos utilizando a técnica de biodeposição.

Micro-organismos	Aplicabilidade
<i>Bacillus cerus</i>	Biodeposição em estruturas ornamentais; Biodeposição em gesso.
<i>Bacillus pasteurii</i>	Biodeposição em areia; Biodeposição em amostras de argamassa; Biodeposição em concretos produzidos com material reciclado de construção e demolição.
<i>Bacillus subtilis</i>	Biodeposição em amostras de rocha calcárias.
<i>Bacillus sphaericus</i>	Biodeposição em amostras de argamassa.
<i>Mixococcus xanthus</i>	Biodeposição em amostras calcárias utilizadas em

Fonte: Adaptação de Saneiyan et al. (2019)

6. BIOREMEDIÇÃO

Bioremediação no contexto da engenharia ambiental é o processo no qual micro-organismos são utilizados para reduzir ou remover contaminações do meio ambiente a fim de recuperar ecossistemas degradados pela ação do homem. Neste trabalho, o termo bioremediação refere-se a mecanismos biotecnológicos que visam recuperar estruturas de concreto danificadas pela presença de trincas e rachaduras (AL-SALLOUM et al., 2017).

Para Jongvivatsakul et al., (2019) o termo bioremediação foi utilizado como tradução para o termo em inglês *bioremediation*, que é citado em publicações internacionais sobre este assunto. Neste contexto, bio refere-se a presença de microrganismos como protagonistas do processo de remediação ou recuperação das trincas presentes nas superfícies de materiais cimentícios.

Em se tratando de recuperação de estruturas de concreto há uma grande variedade de produtos e técnicas para reparo de trincas e rachaduras em concretos (DAKHANE et al. 2018). São utilizados produtos sintéticos como resinas epóxi e poliuretano, que são conhecidos por serem compostos orgânicos tóxicos, não biodegradáveis que geralmente possuem coeficiente de expansão térmica diferente daquele apresentado pelo concreto AMIRI; AZIMA; BUNDUR, 2018).

A bioremediação, pode ser descrita como um processo de reparação de trincas em concretos onde um material contendo microrganismos é utilizado como selante. Este processo comparado aos processos tradicionais de reparo de trincas tem como vantagens produzir naturalmente cristais de carbonato de cálcio que crescem adaptados ao concreto e por ser uma técnica potencialmente sustentável (CHOI et al., 2017).

O material selante é formado inserindo a quantidade de areia necessária para preencher a trinca e após, injetando a solução contendo nutrientes e micro-organismos durante um período de tempo e em intervalos definidos. Esta técnica apresentou resultados

satisfatórios, aumentando a resistência a compressão e diminuindo a permeabilidade a água e cloretos na região da trinca (AMIRI; AZIMA; BUNDUR, 2018).

Outro método foi proposto por Al-Salloum et al. (2017), o qual utiliza um material selante com base cimento, areia e agente biológico. Este método resultou em um material de reparação que apresentou menor delaminação da superfície do concreto.

Conforme Zhuang et al (2018) em seus estudos com a bactéria *Bacillus cereus MRR2*, fez um levantamento bibliográfico descrevendo que o mecanismo de bioremediação pode ocorrer principalmente através de bactérias do gênero bacilo, conforme a Tabela 2. Estes microrganismos são conhecidos por possuírem alta atividade da enzima urease e por sobreviverem por um longo tempo em condições adversas.

Tabela 2 – Diferentes micro-organismos utilizando a técnica de bioremediação.

Micro-organismos	Aplicabilidade
<i>Bacillus pasteurii</i>	Remediar trincas em concretos
<i>Bacillus sphaericus</i>	Comparar processos de reparo de trincas e processo com restaurador biológico
<i>Bacillus cohnii</i>	Utilização de argamassa biológica para reparo de trincas

Fonte: Adaptação de Zhuang et al (2018).

7. BIOCONCRETOS

Bioconcretos são materiais que possuem em sua formulação um agente biológico capaz de induzir a formação de carbonato de cálcio biótico nos espaços vazios entre os grãos de cimento e agregados. Este carbonato de cálcio age como um ligante biológico, unindo as partículas dos materiais promovendo melhorias nas propriedades físicas como aumento da durabilidade e resistência a compressão, podendo ainda ter função de auto reparação de trincas na fase inicial de surgimento (VIJAY; MURMU; DEO, 2017).

As técnicas de produção de concretos biológicos consistem na adição de bactérias e seus nutrientes diretamente na composição da mistura de cimento e areia. A produção de bioconcretos pode ser dividida em dois processos: (i) adição direta do agente biológico e (ii)

com imobilização prévia do agente biológico e seus nutrientes (HARIKRISHNAN et al., 2016; WU et al., 2019).

Os primeiros estudos para a produção de bioconcreto consistiam basicamente na adição de microrganismos e seus nutrientes dissolvidos na água de composição da massa de concreto. Entretanto este método possui como desvantagem a redução dos espaços vazios da matriz cimento e areia à medida que o concreto avança na cura, impedindo assim o desenvolvimento dos microrganismos no longo prazo (VERMA et al., 2015).

Com o objetivo de preservar o material biológico das ações mecânicas durante a preparação e proteger as células de microrganismos das condições extremas do ambiente, foi proposto a imobilização prévia do agente biológico e seus nutrientes em microcápsulas (ALAZHARI et al., 2018).

O microencapsulamento dos micro-organismos e de seus nutrientes tem como vantagens a preservação das atividades metabólicas permitindo que se crie um microambiente propício ao seu desenvolvimento (WANG et al., 2015). Ainda, o microencapsulamento protege as células do atrito que ocorre durante o processo mecânico de mistura na fase de preparação da massa de concreto (SOURADEEP; KUA, 2016).

A imobilização com poliuretano é amplamente utilizada, visto que este polímero é reconhecido por ser um material quimicamente estável, resistente e inerte. Outros materiais, como a sílica gel, hidrogel e argila expandida foram utilizados como materiais alternativos para imobilização das bactérias e seus nutrientes em microcápsulas a serem incorporadas no bioconcreto (CHOI; HOANG; PARK, 2019).

Para WU et al., (2019) Estudos apontam que a adição de bactérias capazes de induzir a produção biológica de carbonato de cálcio pode melhorar significativamente propriedades mecânicas de argamassas e concreto. Isso ocorre devido a deposição de uma nova camada de carbonato de cálcio entre as partículas, atuando como ligante e diminuindo os vazios da matriz areia e cimento.

Para Jongvivatsakul et al. (2019) observou-se um aumento na capacidade de auto reparação das trincas em concretos biológicos. Enquanto que nas amostras sem adição de microrganismos as trincas

até 0,2 mm são auto reparáveis, em amostras contendo agente microbiológico a auto reparação das trincas apresentou resultados entre 0,5 mm a 0,8 mm devido a formação de uma nova camada de carbonato de cálcio biológico.

Entretanto, este processo não se mostrou eficaz para trincas com tempo superior a 60 dias, quando se observou um decréscimo da capacidade de auto reparação do material. Isso ocorre porque as bactérias não são capazes de sobreviver mais que 7 dias no interior do concreto, pois com o tempo de cura avançado, os poros do material – de até 1 µm de tamanho – se tornam pequenos demais a tal ponto que se tornar inviável a sobrevivência do microrganismo (JONGVIVATSAKUL et al., 2019).

A evolução das pesquisas em bioconcretos resultou em um material capaz de se auto reparar quando do surgimento de trincas indiferente a idade do concreto. Isso foi possível com a utilização de uma preparação prévia da bactéria e seus nutrientes em um processo de encapsulação (WU et al., 2019).

As microcápsulas são sensíveis a presença de água, se rompem liberando os microrganismos para o meio. O processo tem início no surgimento de micro trincas na superfície do concreto que permite que a água penetre no seu interior e entre em contato com as microcápsulas contendo os microrganismos e seus nutrientes (WANG et al., 2015).

Os micro-organismos, na presença de água e dos nutrientes adequados, têm sua atividade metabólica ativada, iniciando o processo de indução a formação de cristais de carbonato de cálcio (ZHANG et al., 2018). À medida que são produzidos, estes cristais atuam como reparadores e vão fechando as trincas. A reparação imediata da trinca evita que ela chegue a dimensões que comprometam a resistência do material, aumentando a durabilidade dos mesmos (SILVA et al., 2015). Segundo Erşan et al. (2015) e recentemente, Thakur et al. (2018) reuniu estudos utilizando diferentes micro-organismos na técnica de bioconcretos, conforme demonstrando na tabela 3.

Tabela 3 – Diferentes micro-organismos utilizando a técnica de biconcreto.

Micro-organismos	Aplicabilidade
<i>Shewanella sp</i>	Biconcretos
<i>Bacillus pasteurii</i>	Biconcreto contendo fumo de sílica Biconcretos
<i>Bacillus subtilis</i>	Biconcretos Biconcretos que se auto reparam
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Biconcreto com células vegetativas
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Biconcretos em argila expadida
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Biconcreto reforçado que se auto reparam
<i>Bacillus sphaericus</i>	Biconcretos imobilizado em sílica gel

Fonte: Adaptação de ERŞAN et al. (2015); Thakur et al. (2018).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica de biomineralização, além de inovadora, sua aplicação na engenharia aponta por meio de estudos multidisciplinares, para a possibilidade de se promover o desenvolvimento sustentável, entrelaçando-se diferentes áreas do conhecimento na construção de alternativas para a solução dos problemas sócio-ambientais e tecnológicos.

Diversos micro-organismos são utilizados para a precipitação de carbonato de cálcio. A MICP tem surgido como um aparato biotecnológico eficaz e ambientalmente “amigável”. Na biodisposição ocorre a precipitação de uma camada de carbonato de cálcio de origem biológica sobre a superfície porosa de materiais como rochas utilizadas em construções ornamentais, tijolos e concretos. Na remediação, no contexto da engenharia ambiental é o processo no qual micro-organismos são utilizados para reduzir ou remover contaminações do meio ambiente a fim de recuperar ecossistemas degradados pela ação do homem, assim como na técnica de bioconcretos para formulação de materiais que possuem um agente biológico capaz de induzir a formação de carbonato de cálcio biótico nos espaços vazios entre os grãos de cimento e agregados. Por fim, as aplicações da MICP são ilimitadas e uteis em aplicações que visam gerar produtos seguros e ambientalmente estáveis para a construção civil.

REFERÊNCIAS

1. ALAZHARI, Mohamed et al. Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 610-619, 2018.
2. AL-SALLOUM, Yousef et al. Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation—A review. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 857-876, 2017.
3. AMIRI, Ali; AZIMA, Mahzad; BUNDUR, Zeynep Başaran. Crack remediation in mortar via biomineralization: effects of chemical admixtures on biogenic calcium carbonate. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 317-325, 2018.
4. ANBU, Periasamy et al. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. **Springerplus**, v. 5, n. 1, p. 250, 2016.
5. BIBI, Shazia et al. Isolation, differentiation and biodiversity of ureolytic bacteria of Qatari soil and their potential in microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. **RSC Advances**, v. 8, n. 11, p. 5854-5863, 2018.
6. CAMCI-UNAL, Gulden et al. Biomineralization guided by paper templates. **Scientific reports**, v. 6, p. 27693, 2016.
7. CHOI, Sun Gyu et al. Sustainable biocement production via microbially induced calcium carbonate precipitation: use of limestone and acetic acid derived from pyrolysis of lignocellulosic biomass. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 6, p. 5183-5190, 2017.
8. CHOI, Sun-Gyu et al. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 209-221, 2017.
9. CHOI, Sun-Gyu; HOANG, Tung; PARK, Sung-Sik. Undrained Behavior of Microbially Induced Calcite Precipitated Sand with Polyvinyl Alcohol Fiber. **Applied Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1214, 2019.

10. DAKHANE, Akash et al. Crack healing in cementitious mortars using enzyme-induced carbonate precipitation: Quantification based on fracture response. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, p. 04018035, 2018.
11. DE SOUZA SEVALHO, Elison. Biotecnologia no cotidiano escolar: abordagem prática através de uma atividade extensionista. **Interfaces-Revista de Extensão da UFMG**, v. 5, n. 2, p. 163-180, 2017.
12. ERŞAN, Yusuf Çağatay et al. Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 196-203, 2015.
13. GAT, Daniella; RONEN, Zeev; TSESARSKY, Michael. Soil bacteria population dynamics following stimulation for ureolytic microbial-induced CaCO_3 precipitation. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 2, p. 616-624, 2016.
14. HARIKRISHNAN, Hariharan et al. Improvement of Concrete Durability by Bacterial Carbonate Precipitation. **South Indian Journal of Biological Sciences**, v. 1, n. 2, p. 90-96, 2015.
15. JONGVIVATSAKUL, Pitcha et al. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 737-744, 2019.
16. KRAJEWSKA, Barbara. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. **Journal of advanced research**, v. 13, p. 59-67, 2018.
17. LI, Zhishang et al. Biomineralization-mimetic preparation of hybrid membranes with ultra-high loading of pristine metal-organic frameworks grown on silk nanofibers for hazard collection in water. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 6, n. 8, p. 3402-3413, 2018.
18. MUJAH, Donovan; SHAHIN, Mohamed A.; CHENG, Liang. State-of-the-art review of biocementation by microbially

- induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 6, p. 524-537, 2017.
19. PHILLIPS, Adrienne J. et al. Enhancing wellbore cement integrity with microbially induced calcite precipitation (MICP): A field scale demonstration. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 171, p. 1141-1148, 2018.
 20. SANEIYAN, Sina et al. Induced polarization as a monitoring tool for in-situ microbial induced carbonate precipitation (MICP) processes. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 36-47, 2019.
 21. SARICICEK, Yilmaz Emre et al. Comparison of microbially induced calcium carbonate precipitation eligibility using *sporosarcina pasteurii* and *bacillus licheniformis* on two different sands. **Geomicrobiology Journal**, p. 1-11, 2018.
 22. SEIFAN, Mostafa; BERENJIAN, Aydin. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation in designing bio self-healing concrete. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 34, n. 11, p. 168, 2018.
 23. SILVA, Filipe Bravo et al. Industrial application of biological self-healing concrete: challenges and economical feasibility. **Journal of Commercial Biotechnology**, v. 21, n. 1, p. 31-38, 2015.
 24. SOURADEEP, Gupta; KUA, Harn Wei. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 12, p. 04016165, 2016.
 25. TAMAYO-FIGUEROA, Diana P.; CASTILLO, Elianna; BRANDÃO, Pedro FB. Metal and metalloid immobilization by microbiologically induced carbonates precipitation. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 35, n. 4, p. 58, 2019
 26. THAKUR, S. A. et al. Concrete: A Review, **International Journal of Engineering Technology Science and Research Bacterial**, v. 5, n. 2, p. 19-22, 2018.
 27. VERMA, Rajesh K. et al. Bio-mineralization and bacterial carbonate precipitation in mortar and concrete. **Bioscience**

- And Bioengineering, Roorkee, India**, v. 1, n. 1, p. 5-11, 2015.
28. VIJAY, Kunamineni; MURMU, Meena; DEO, Shirish V. Bacteria based self healing concrete—A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008-1014, 2017.
29. WANG, Jianyun et al. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 1088, 2015.
30. WANG, Zhaoyu et al. Review of ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP). **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 35, n. 8, p. 1135-1146, 2017.
31. WU, Chuangzhou et al. Microbially induced calcite precipitation along a circular flow channel under a constant flow condition. **Acta Geotechnica**, p. 1-11, 2018.
32. WU, Mingyue et al. Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 631-643, 2019.
33. YAO, Shasha et al. Biomineralization: From material tactics to biological strategy. **Advanced Materials**, v. 29, n. 14, p. 1605903, 2017.
34. ZHANG, Jiaguang et al. Publisher Correction: Microbial network of the carbonate precipitation process induced by microbial consortia and the potential application to crack healing in concrete. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1019, 2018.
35. ZHUANG, Dingxiang et al. Calcite precipitation induced by *Bacillus cereus* MRR2 cultured at different Ca²⁺ concentrations: Further insights into biotic and abiotic calcite. **Chemical Geology**, v. 500, p. 64-87, 2018.