

Precipitação de calcita induzida microbianamente em argamassas de reparo: uma revisão integrativa da literatura

DOI: 10.20396/labore.v17i00.8673375

Marcella Maria Gomes Damasceno

<https://orcid.org/0000-0002-7859-0966>

Universidade Federal do Ceará / Cratêus [CE] Brasil

Heloína Nogueira da Costa

<https://orcid.org/0000-0001-9960-2383>

Universidade Federal do Ceará / Cratêus [CE] Brasil

Thiago Fernandes da Silva

<https://orcid.org/0000-0002-4364-9921>

Universidade Federal do Ceará / Cratêus [CE] Brasil

Raimunda Moreira Franca

<https://orcid.org/0000-0001-8660-9316>

Universidade Federal do Ceará / Cratêus [CE] Brasil

RESUMO

A aplicação de biotecnologias em materiais cimentícios configura uma oportunidade de inovação e sustentabilidade à indústria da construção civil. A obtenção de argamassas de reparo com o uso do método de Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP) é uma das principais apostas nessa temática. No entanto, essa abordagem ainda é pouco difundida, visto que é um tema recente e em desenvolvimento. Portanto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura sobre o método MICP em argamassas de reparo. Após a identificação do tema, iniciou-se a sequência metodológica com o estabelecimento dos critérios de busca e amostragem, seguida da definição das informações de interesse, avaliação crítica dos estudos selecionados e interpretação e apresentação dos resultados. Os principais métodos identificados foram: o reparo externo, com uso mais frequente e resultados mais consistentes; e interno (autorregeneração). Verificou-se que há uma tendência de aumento na resistência à compressão e de diminuição da permeabilidade à água de argamassas tratadas com MICP. Além disso, a formação de carbonato de cálcio pelos agentes biológicos atua como reparador de fissuras. Por fim, identificou-se que a principal dificuldade para o domínio da técnica é a alta complexidade dos processos biológicos, visto que envolve uma diversidade de fatores ambientais. Entretanto, a técnica se mostra promissora e seu desenvolvimento agrega inovação e baixo impacto ambiental.

PALAVRAS-CHAVE

Biocimentação. Atividade microbiana. Reparo interno. Autorregeneração.

Microbially induced calcite precipitation in repair mortars: an integrative literature review

ABSTRACT

The application of biotechnologies in cementitious materials represents an opportunity for innovation and sustainability in the civil construction industry. Obtaining repair mortars using the Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) method is one of the main prospects on this topic. However, this approach is still not propagated, as it is a recent and developing thematic. Therefore, this article has the purpose of realizing an integrative literature review on the MICP method in repair mortars. After identifying the theme, the methodological sequence began with the establishment of search and sampling criteria, followed by the definition of the information of interest, critical evaluation of the selected studies and interpretation and presentation of results. The main methods identified were: external repair, with more frequent use and consistent results; and internal (self-regeneration). It was verified that there is a tendency to increase the strength pressure and decrease the water permeability of mortars treated with MICP. In addition, the formation of calcium carbonate by biological agents acts as a fissure repairer. Finally, it was identified that the greatest difficulty reported in the literature is related to the high complexity of biological processes since it involves various environmental factors. However, the technique shows promise and its development adds innovation and low environmental impact.

KEYWORDS

Biocementation. Microbial activity. Internal repair. Self-regeneration.

1. Introdução

A construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais. No entanto, essa alta demanda gera preocupações quanto ao esgotamento das matérias-primas para o setor. É crescente a busca por novas tecnologias que configurem alternativas sustentáveis para a indústria da construção, tendo em vista a redução do passivo ambiental dessa atividade.

Dessa forma, o desenvolvimento da biotecnologia aplicada à indústria da construção civil configura uma oportunidade de ganho produtivo, inovação e sustentabilidade. Portanto, a biocimentação surge como uma solução para se obter um produto final alternativo e com características físico-mecânicas melhoradas. Além disso, a biotecnologia construtiva utiliza materiais e processos de baixo impacto ambiental capaz de diminuir as emissões de carbono, assim, reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A biocimentação é conceituada como o meio de formação de minerais por organismos vivos. Uma das técnicas mais difundidas na construção civil é a Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente ou *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), que envolve a produção e a deposição de minerais de carbonato de cálcio por bactérias, em condições ambientais específicas (Jiang *et al.*, 2022). Yu *et al.* (2023) afirmam que as aplicações potenciais desta técnica na engenharia civil vêm se expandindo, reafirmando a necessidade de novos estudos.

Com o uso da técnica MICP é possível obter argamassas com capacidade de autorregeneração. Isso configura uma nova abordagem para o desenvolvimento de materiais para a construção civil. Vale salientar que argamassa é um compósito amplamente empregado em revestimentos de parede, piso e recuperação de trincas e fissuras em elementos estruturais de concreto armado, isto é, argamassa de reparo. Geralmente, é composta por cimento Portland, areia natural e água (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2005). Também pode conter mais de um aglomerante, como a cal, e fazer uso de aditivos químicos e adições minerais.

A incorporação do método MICP em argamassas de reparo é considerada uma alternativa viável e inovadora. Estudos desenvolvidos há pouco mais de 20 anos afirmam que é possível reparar fissuras por meio de processos biológicos, e aumentar a vida útil dos elementos construtivos (Kulkarni *et al.*, 2020). Contudo, nos últimos anos, tem-se intensificado o interesse pelo entendimento dos processos biológicos da MICP (Rollankanti & Srinivasu, 2022; Gebru *et al.*, 2021) e as principais aplicações na engenharia (Pacheco *et al.*, 2022).

Estudos de Al-Salloum *et al.* (2017) trazem abordagens generalizadas com foco nas diversas possibilidades de aplicações e nos agentes biológicos. Esse tema traz diversos segmentos a serem explorados com maior aprofundamento, como métodos de obtenção dos compósitos modificados com microrganismos, assim como, seu desempenho físico, mecânico e relacionado à durabilidade (Jonkers *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2017).

Trata-se de um tema recente e em desenvolvimento, com registro da primeira aplicação na área de geotecnia (Stocks-Fischer *et al.*, 1999). Destaca-se que uma das técnicas científicas que podem auxiliar na obtenção de informações criteriosas e atualizadas sobre essa tecnologia construtiva, com nível de criticidade científica elevada, é a revisão integrativa da literatura.

Este artigo objetiva realizar uma revisão integrativa da literatura sobre o método de Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP) em argamassas de reparo, diante da aplicação promissora de biotecnologia na indústria da construção civil.

2. Biocimentação

O processo de biocimentação corresponde à formação de um material que promove a aglutinação de partículas pela introdução de microrganismos e aditivos específicos (Garbin, 2016). Utiliza-se o MICP, geralmente, para gerar CaCO_3 e provocar a cimentação microbiana das partículas de areia ou de outros agregados (Yu *et al.*, 2023).

O biocimento vem sendo difundido e utilizado na produção de concretos e argamassas para construção civil. Para Choi *et al.* (2017), pode-se utilizar este material aglomerante de forma similar ao cimento convencional, tal qual, para reparar fissuras em estruturas de concreto. Essas fissuras podem acelerar a deterioração das armaduras de aço internas na estrutura, assim como permitir a intrusão de substâncias agressivas (como água carregada de íons, gases, líquidos não-aquosos), que, em contato com o material metálico, podem promover reações físico-químicas que resultam em danos onerosos para reparos ou, muitas vezes, irreversíveis (Dhami *et al.*, 2012; Omoregie *et al.*, 2018).

Dentre as técnicas de biocimentação, a Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP) tem se destacado como uma alternativa ambientalmente adequada, capaz de aumentar a durabilidade e resistência das estruturas de concreto, inclusive, proporcionando a restauração das mesmas (Dhami et al., 2012; Anbu et al., 2016).

A Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP) é uma tecnologia ambientalmente adequada que aplica microrganismos e reagentes químicos a processos biológicos para produzir carbonato mineral. Essa substância pode ser uma solução eficiente em termos de energia, economia e sustentabilidade para os desafios ambientais e da engenharia (Fouladi *et al.*, 2023). A seleção do microrganismo é um dos fatores mais importantes para a adequação da técnica à diferentes aplicações, tendo em vista a biossegurança, a atividade microbiana, a estabilidade das propriedades obtidas, principalmente, a relação custo-benefício (Ivanov & Chu, 2008).

Muitas bactérias são adequadas para a síntese do carbonato de cálcio. Contudo, os mecanismos utilizados para promover a precipitação podem variar a depender do microrganismo, sendo os principais: via hidrólise da ureia, redução férrica, redução de sulfato e por desnitrificação (Wang et al., 2017; Muynck et al., 2010).

As bactérias produtoras da urease são geralmente as mais empregadas no método MICP, promovendo assim a hidrólise da ureia (Muynck et al., 2010). O carbonato de cálcio biomediado (CaCO_3) é produzido devido à reação entre bactérias produtoras de urease com nutrientes e ureia. A bactéria ureolítica se combina com a ureia durante o processo reacional, convertendo a ureia nos íons amônio e carbonato, e a precipitação de CaCO_3 está associada à adição de sais de cálcio (Choi et al., 2017). Na execução do processo, do início ao fim, ocorrem cerca de cinco reações químicas (Krajewska, 2018), que estão descritas nas equações constantes no Quadro 1.

Quadro 1. Equações das reações químicas do processo de biocimentação.

1.	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$
2.	$\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
3.	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$
4.	$\text{HCO}_3^- \cdot \text{OH}^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
5.	$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{CaCO}_3$

Fonte: Autores (2023).

Primeiramente, a ureia é sintetizada na presença de água pelas enzimas de urease, e modificada para ácido carbônico e amônia (Equação 1). Então, os produtos dessa reação são dissociados na presença de água, formando os íons bicarbonato, amônia e hidróxido mediado pela bactéria *Sporosarcina pasteurii* (Equações 2 e 3). Consequentemente, a presença de hidróxido aumenta o pH do meio e promove a formação de carbonato (Equação 4). No passo seguinte, a combinação de íons e a precipitação de carbonato de cálcio é realizada na presença de Ca^{2+} (Equação 5) (Lee, 2003).

O principal microrganismo utilizado na técnica MICP é a bactéria *Sporosarcina pasteurii*, que não é patogênico e, em períodos reduzidos, é capaz de grande produção de precipitado, devido à alta atividade ureolítica (Hamed et al., 2017; Mujah et al., 2016). Além disso, é encontrada no solo, o que caracteriza a facilidade de acesso, e tem alta resistência ao amônio.

Outras bactérias também são reportadas na literatura com possível uso na bioicimentação, como: *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Sporolactobacillus*, *Clostridium* e *Desulfotomaculum* (DeJong et al., 2009; Ivanov et al., 2015; Montoya, 2012). Contudo, a *Sporosarcina pasteurii* é a bactéria mais utilizada para materiais cimentícios, como argamassas e concretos (Hammes & Verstraete 2002). No trabalho Damasceno et al. (2022) é possível obter um maior detalhamento da técnica MICP.

Para as aplicações do biocimento no concreto, dois métodos de reparo são sugeridos: o método de autocura (autorregeneração), também denominado de reparo interno, onde as bactérias são incorporadas ao concreto ou na argamassa antes do aparecimento de fissuras; e o método de fechamento de fissuras, também denominado de reparo externo, onde argamassas de reparo são aplicados nas fissuras presentes no concreto (Bergh et al., 2020).

Conforme Damasceno et al. (2022), o emprego do método de biocimentação nas argamassas de reparo pode reduzir a fissuração, e melhora a resistência à compressão e permeabilidade, obtendo estruturas com bons desempenhos e mais sustentáveis.

3. Metodologia

Este trabalho foi realizado por meio de uma revisão integrativa de literatura, tendo em vista compreender, analisar, discutir e evidenciar – com elevado rigor científico – estudos que evidenciem os principais métodos de tratamento com o método MICP em argamassas de reparo e as principais propriedades melhoradas nas argamassas tratadas com MICP. Tal pesquisa pode enfatizar o potencial inovador e seu significativo impacto dentro da indústria da construção civil. Para construção metodológica da referida revisão, seguiram-se recomendações de Mendes et al. (2008), conforme mostrado na Figura 1.

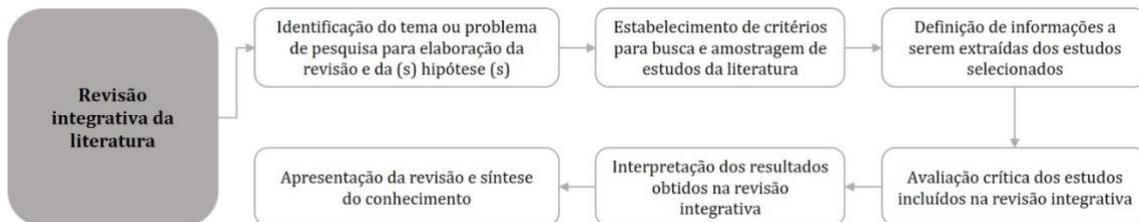


Figura 1. Etapas da revisão integrativa. Fonte: adaptado de Mendes, Silveira & Galvão (2008).

Os trabalhos selecionados para esta revisão integrativa são resultados de pesquisas primárias de caráter qualitativo. Para varredura dos trabalhos, foram utilizadas como critérios de busca as palavras “*Sporosarcina pasteurii*” e “*repair mortar*”, ambas associadas à abreviação MICP. As pesquisas ocorreram nos idiomas inglês e português, nas seguintes bases científicas de pesquisa: *ScienceDirect*, *Web of Science*, *ResearchGate*, *Taylor and Francis*, *Springer* e Google Acadêmico.

Os critérios para seleção de estudos relevantes, obtidos nas bibliotecas científicas, foram os seguintes:

- O artigo avalia o objeto de estudo;
- O artigo foi publicado em revistas científicas ou periódicos;
- O artigo foi publicado em periódico revisado por pares;
- O artigo foi publicado a partir de 2010.

Os artigos científicos que não atenderam aos critérios definidos foram excluídos desta revisão, tendo em vista manter a qualidade da presente análise. Também foram excluídos estudos repetidos ou traduções de artigos, tendo em vista trazer a quantidade real e relevância dos estudos.

Após o refinamento da pesquisa, a análise do conteúdo foi realizada pela leitura detalhada dos artigos para verificação da similaridade e relevância destes conteúdos ao objeto do estudo. Em seguida, as pesquisas foram analisadas conforme ilustrado na Figura 2, iniciando pela análise do uso do método MICP em argamassas de reparo e, por conseguinte, verificando o comportamento das principais propriedades dessas argamassas.

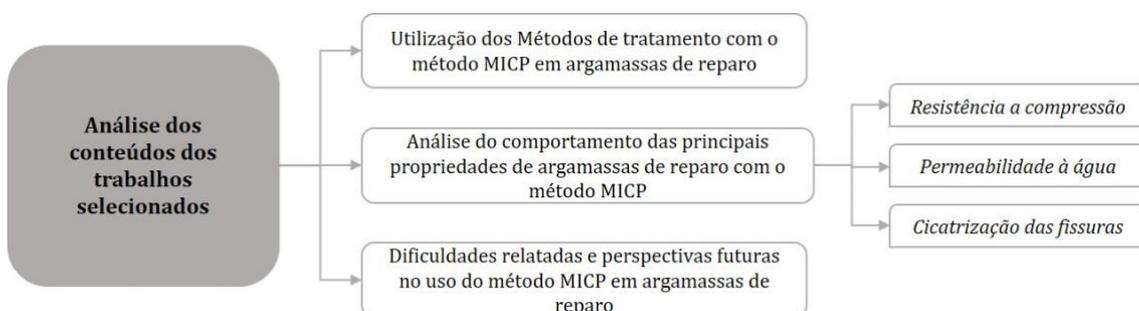


Figura 2. Análise dos artigos obtidos na revisão integrativa. Fonte: Autores (2023).

Ao final deste trabalho, estão discutidas as principais dificuldades relatadas pelos autores dos trabalhos selecionados acerca do uso do MICP em argamassas de reparo e foram traçadas perspectivas em relação ao uso dessa biotecnologia para o melhoramento de desempenho das propriedades desse produto na construção civil.

4. Resultados e discussão

No banco de dados gerado, foram contabilizados 34 artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais para análise minuciosa dos conteúdos. Ver Quadro 2.

Quadro 2. Trabalhos analisados para elaboração dos resultados.

Principais enfoques	Autores	Principais enfoques	Autores
Cicatrização de Fissuras por MICP	Kulkarni et al. (2020)	Efeito das bactérias no desempenho do concreto/argamassa	Saha et al. (2019)
	Leeprasert et al. (2022)		Chuo et al. (2020)
	Jongvivatsakul et al. (2019)		Farrugia et al. (2019)
	Chuo et al. (2020)		Aimi et al. (2021)
	Srinivas M et al. (2021)	Reparo interno (autorregeneração)	Li et al. (2022)
	Intarasoontron et al. (2021)		Sun et al. (2021)
	Choi et al. (2017)		Bergh et al. (2021)
	Abo-El- Enein et al. (2012)		Gomes et al. (2013)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> em compósitos cimentícios	Chen et al. (2022)	Argamassa de reparo com uso de biocimentação	Deepak et al. (2016)
	Fu et al. (2022)		Yang e Chen (2013)
	Cuzman et al. (2015)		Bergh et al. (2020)
	Murugan et al. (2021)		Nasser et al. (2022)
	Bhaduri et al. (2016)		Mangat et al. (2021)
	Bhaduri et al. (2016)		Pacheco et al. (2022)
	Reis et al. (2017)		Melhoria de propriedades por biocimentação.
Liu et al. (2020)			
Melhoria de propriedades por biocimentação	Abo-El- Enein et al. (2013)		

Fonte: Autores (2023).

Após a análise crítica dos trabalhos apresentados no Quadro 2, evidenciou-se os estudos que abordaram os principais métodos de tratamento com o método MICP em argamassas de reparo e as principais propriedades melhoradas nas argamassas tratadas com MICP.

4.1. MÉTODOS DE TRATAMENTO POR MICP EM ARGAMASSAS DE REPARO

Com base no levantamento da literatura identificou-se duas formas principais tratamento de argamassas de reparo usando o método MICP: método de reparo externo e método de reparo interno.

Nos trabalhos de Kulkarni et al. (2020), Jongvivatsakul et al. (2019), Choi et al. (2017), Abo-El-Enein et al. (2012), Bergh et al. (2020), Intarasoontron et al. (2021) e Farrugia et al. (2019), foi utilizado o método de reparo externo, que consiste na aplicação de uma solução bacteriana em amostras de argamassas fissuradas, na qual, a atuação da biocimentação nas rachaduras promove a sua regeneração.

Os fluxogramas da Figura 3 simplificam os processos de obtenção das argamassas produzidas pelo método de reparo externo para cada estudo destacado.

Este método, utiliza uma argamassa convencional composta de cimento Portland, areia de leito de rio e água destilada. É o método mais utilizado, principalmente por sua maior facilidade de execução. Na maioria dos estudos, as fissuras são geradas através de tensões nos corpos de prova, isto é, intencionalmente. Os mesmos passam pelo mecanismo de autoclavagem, visando esterilizar todo o meio que entraria em contato com o processo de biocimentação.

Para a cura das fissuras induzidas, prepara-se uma solução bacteriana cultivada em um caldo de nutrientes, no qual, posteriormente as bactérias eram extraídas através de um processo de centrifugação para a composição de uma mistura final que comumente era constituída de cloreto de cálcio (CaCl₂) e ureia. Após a regeneração das fissuras, testes físicos-mecânicos são feitos para avaliar propriedades desses materiais.

No método de reparo interno, também denominado de argamassas autorregenerativas (Nasser et al., 2022), as remediações de fissuras acontecem no interior da própria argamassa. Em quase todos os casos a regeneração é facilitada por mecanismos que protegem as bactérias para assegurar que elas possam ter espaço para agir. Os

estudos de Chen et al. (2021), Sun et al. (2021), apresentam este método através de ar incorporado e Intarasoontron et al. (2021) através de microcápsulas.

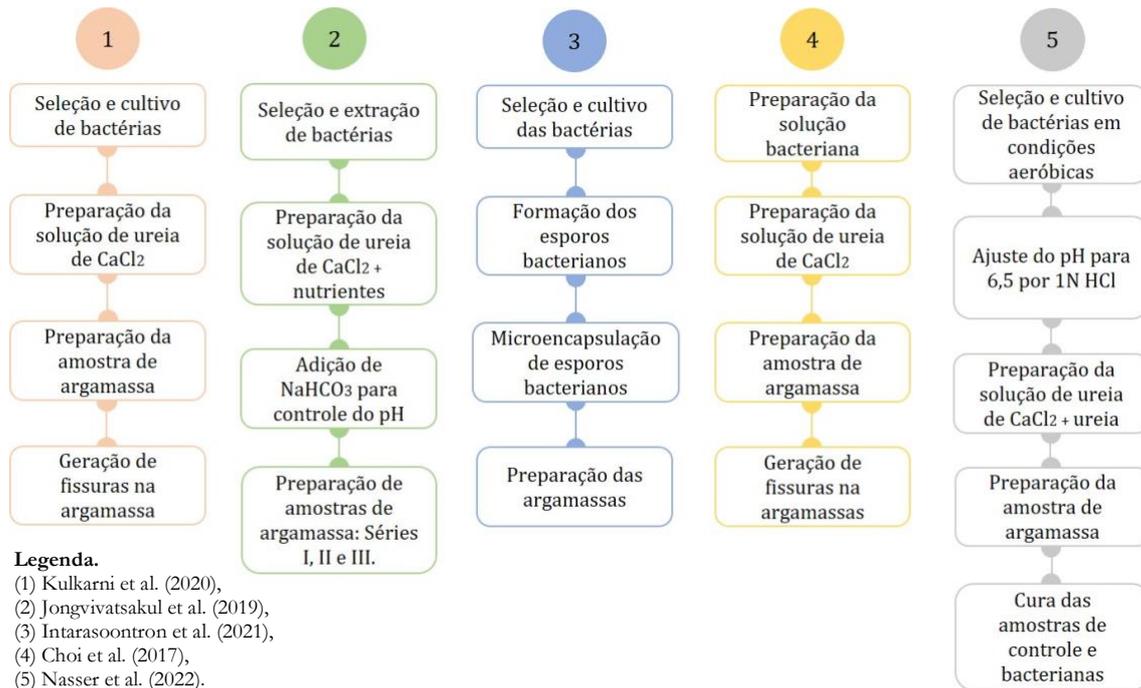


Figura 3. Fluxogramas das etapas de obtenção de argamassas com uso do método de reparo externo. Fonte: elaboração dos próprios autores.

Os componentes da argamassa no reparo interno são: cimento Portland, areia e água contendo os microrganismos. Em alguns estudos há a adição de materiais de reforço, como fibras (Bergh et al., 2020). Após a cura, são induzidas as fissuras para dar início ao processo de autocicatrização. O reparo interno, além de ter um custo mais elevado devido ao uso de tecnologias mais avançadas, geralmente, apresenta resultados inferiores aos do reparo externo. Isso foi comprovado na pesquisa de Intarasoontron et al. (2021), devido a diferença na atividade metabólica das bactérias, pois uma célula vegetativa pelo método de gotejamento externo tem uma forma ativa e normal de crescimento e funcionamento, agindo imediatamente em contato com os nutrientes, enquanto um esporo inativo microencapsulados não cresce e precisa ser reanimado após receber os nutrientes.

4.2. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS TRATADAS COM O MÉTODO MICP

A resistência à compressão, a permeabilidade à água e a cicatrização de fissuras são as principais propriedades avaliadas em argamassas de reparo tratadas pelo método MICP. Geralmente, são avaliadas por meio de estudo comparativo entre amostras de controle e amostras tratadas por biocimentação.

4.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A literatura apontou, conforme vários autores, que há um aumento da resistência à compressão das argamassas submetidas ao tratamento com MICP em relação as amostras de controle. Esse comparativo pode ser visualizado na Figura 4.

Nos trabalhos de Abo-El-Enein et al. (2013), Nasser et al. (2022) e Bergh et al. (2020), os resultados são obtidos aos 28 dias, enquanto, no trabalho de Jongvivatsakul et al. (2019) foi obtido aos 20 dias. As argamassas de controle são aquelas sem o tratamento da MICP. As argamassas MICP receberam o tratamento com as bactérias e apenas o último não apresentou aumento na resistência, com redução de 17,1%, os demais apresentaram um aumento: o primeiro de 42,8%, o segundo de 28,8% e o terceiro de 47% em relação às de controle, devido ao preenchimento das fissuras com o material regenerador.

É importante salientar que no trabalho de Nasser et al. (2022) é comparado em concentrações duas bactérias: *Bacillus pasteurii* e *Bacillus sphaerirrus*. Os testes de resistência são realizados para ambas, porém, a resistência descrita na Figura 4 é para a *B. pasteurii* a 0,5%. O valor de resistência com o tratamento com a bactéria *B.*

sphaericus a 0,5% é de cerca de 50 MPa, portanto, com aumento mais representativo na resistência à compressão. Dessa forma, observa-se que diferentes bactérias proporcionam diferentes resultados às argamassas.

4.2.2. PERMEABILIDADE À ÁGUA

As misturas cimentícias sofrem à ação da água que adentram pelos poros do material endurecido. Este processo denominado de permeabilidade à água é diretamente relacionado à durabilidade dos materiais e pode afetar outras propriedades físicas, químicas e mecânicas dos mesmos.

Conforme os estudos de Kulkarni et al. (2020), Jongvivatsakul et al. (2019), Choi et al. (2017), Abo-El-Enein et al. (2013) e Nasser et al. (2022), a permeabilidade das argamassas diminui quando tratadas com o método MICP.

Kulkarni et al. (2020) testaram dezesseis amostras, avaliando o período de cura em relação à largura da fissura. As amostras passaram por vinte e quatro rodadas de tratamento MICP, cada rodada com duração 24h. Na oitava rodada, as amostras fissuradas já apresentavam uma redução média de 60% na permeabilidade. Na 16ª rodada e na 24ª rodada foram reduzidos, 25% e 14%, respectivamente. Isso aponta que o percentual de cicatrização das trincas é mais rápido até a 8ª rodada, diminuindo após isso. Comportamento similar foi observado por Choi et al. (2017), que verificaram a redução mais acentuada da permeabilidade até a 7ª rodada, utilizando o método de carga constante.

O estudo de Jongvivatsakul et al. (2019) mostra a permeabilidade medida em função da profundidade de penetração da água na amostra. Os valores obtidos para penetração da água nas amostras com fissuras foram de 10,8 cm para a amostra controle e da amostra tratada com MICP foi de 8,6 cm. Dessa forma, a estanqueidade da amostra de argamassa fissurada é melhorada em razão da formação de CaCO_3 .

Nasser et al. (2022) destacam a comparação de resultados entre duas bactérias distintas nas mesmas condições, em relação à amostra controle. Na Tabela 1, observa-se os resultados de permeabilidade do volume de vazios e taxa de absorção de água.

Tabela 1. Valores de permeabilidade do volume de vazios e taxa de absorção de água das amostras.

	Amostra controle ($\text{m/s}^{1/2}$)	Amostra B. Pasteurii ($\text{m/s}^{1/2}$)	Amostra B. Sphaericus ($\text{m/s}^{1/2}$)
Taxa de absorção de água	14%	10,5%	8,6%
Permeabilidade do volume de vazios	$1,43 \cdot 10^{-7}$	$0,24 \cdot 10^{-7}$	$0,4 \cdot 10^{-7}$

Fonte: Autores (2023).

Ainda na Tabela 1, verifica-se que o volume de vazios diminui após o processo de biocimentação, consequentemente, a taxa de absorção de água tende a cair, aumentando as propriedades físico-mecânicas do compósito. Esse fenômeno também foi observado por Abo-El-Enein et al. (2013), que apontam que as amostras com células bacterianas apresentam uma menor absorção de água em função da biomassa bacteriana e ao processo de biocimentação.

4.2.3. CICATRIZAÇÃO DAS FISSURAS

A fissuração em compósitos cimentícios é uma das manifestações patológicas mais comuns na construção civil. Geralmente, surgem devido à ocorrência de tensões de tração acima da capacidade de resistência do elemento construtivo.

O processo de cicatrização das fissuras pelo método da MICP proporciona a formação da substância carbonato de cálcio, que faz o papel de um agente reparador de fissuras encontradas em argamassas e concreto.

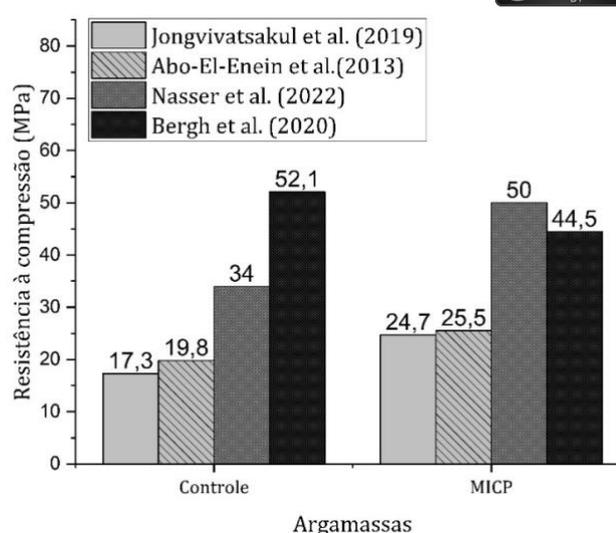


Figura 4. Resistência à compressão de argamassas de controle x MICP. Fonte: Autores (2023).

A avaliação da eficácia da regeneração de fissuras por meio da ação bacteriana foi investigada nos estudos de Kulkarni et al. (2020), Jongvivatsakul et al. (2019), Choi et al. (2017), Intarasoontron et al. (2021), Fu et al. (2022), Nasser et al. (2022), Bergh et al. (2020), Chen et al. (2021), Farrugia et al. (2019), que apontam que a cicatrização das fissuras ocorre gradualmente com a aplicação crescente de ciclos de tratamentos.

Segundo Kulkarni et al. (2020), a cicatrização varia com a porcentagem de precipitação de CaCO_3 . No entanto, é destacado que não acontece a recuperação total das fissuras internas. Jongvivatsakul et al. (2019) complementam que nas primeiras etapas, até o 6º dia de aplicação do MICP, ocorre a absorção do agente de cura nos poros do cimento.

A partir desse período é que a estrutura do poro é preenchida com CaCO_3 precipitado. A partir do 14º dia, mais de 80% da fissura é regenerada. Na Figura 5, observa-se a evolução da cicatrização das fissuras ao longo dos ciclos de rodadas de aplicação.



Figura 5. Evolução da cicatrização de fissuras até a 8ª rodada de tratamento. Fonte: Adaptado de Kulkarni et al. (2020).

O CaCO_3 em forma de hexágono na superfície de uma fissura pode ser observado na Figura 6. Os testes de regeneração de fissuras por MICP, geralmente, são comparados com amostras de controle e tratadas. Bergh et al. (2020) utilizaram uma injeção de solução bacteriana e água destilada estéril. A cicatrização bacteriana reduziu a espessura da fissura entre 20% e 40%. No entanto, nas fissuras tratadas com água constatou-se a cicatrização autógena em algumas fissuras, contudo, esse fenômeno não é sistemático. Por outro lado, Farrugia et al. (2019) realizaram a comparação entre uma amostra de controle tratada apenas com CaCl_2 e uma amostra tratada com a bactéria e CaCl_2 , observando alterações na superfície da fissura.

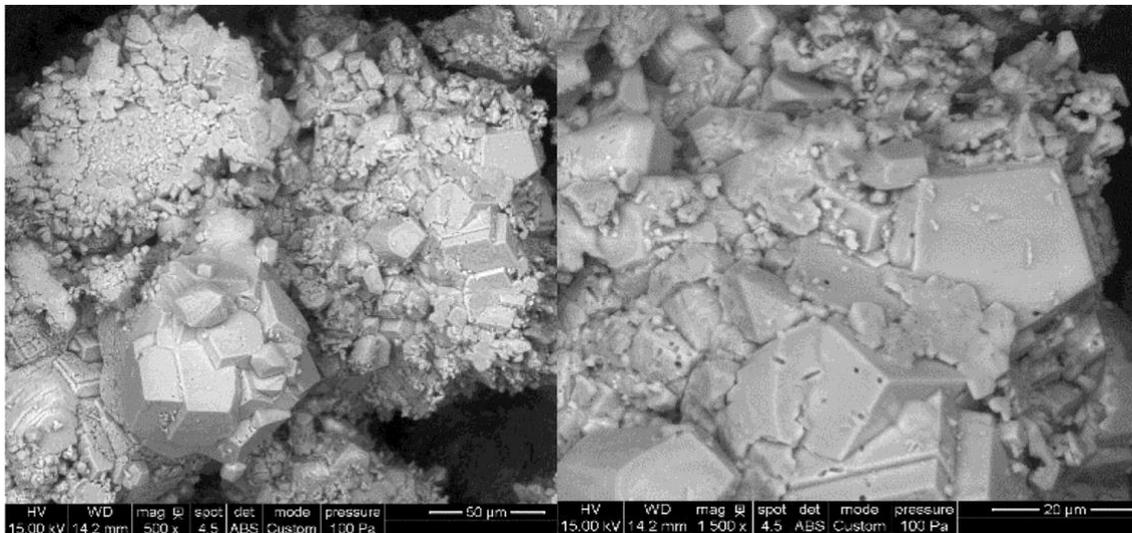


Figura 6. CaCO_3 observado na superfície da amostra. Fonte: Choi et al. (2017).

Intarasoontron et al. (2021) realizaram estudo comparativo, em relação ao desempenho, de células vegetativas bacterianas MICP e esporos bacterianos microencapsulados. Os dois métodos foram eficazes na recuperação das fissuras. No entanto, a atividade ureolítica e a formação de carbonato de cálcio das células vegetativas são maiores que os esporos, pois a célula vegetativa é uma forma ativa, e possível de crescimento e funcionamento de bactérias, enquanto um esporo é inativo e não cresce.

Nos estudos realizados por Chen et al. (2021), Nasser et al. (2022) e Fu et al. (2022) foram produzidas argamassas autorregenerativas, com uso do método do reparo interno. Na argamassa produzida por Chen et al. (2021) foi utilizado ar incorporado e as fissuras foram recuperadas de maneira eficaz. Durante 28 dias de

incubação, as amostras foram todas curadas com solução bacteriana e foram observadas precipitações na cor branca preenchendo as fendas. Além disso, constatou-se que o uso de ar incorporado exerceu uma influência significativa na velocidade de selagem das fissuras.

A recuperação do desempenho mecânico da argamassa ao seu estado original através da precipitação de carbonato de cálcio foi observada por Nasser et al. (2022). Enquanto, na investigação de Fu et al. (2022) foi testado o uso de água salgada, com o objetivo de explorar a adaptabilidade de *S. pasteurii* em ambiente marinho. Com isso, os autores concluíram que é viável a cicatrização de fissuras com a água doce, assim como, com água do mar. Contudo, a primeira é mais propícia maiores índices de regeneração das fissuras.

Todos os estudos mencionados garantiram que ocorresse a cicatrização de fissuras, através do método de reparo externo e interno, com diferentes microrganismos e aplicações. Portanto, o tratamento MICP mostra-se eficiente, na recuperação das fissuras, na maioria dos casos, em grandes proporções, além de propiciar que as condições físico-mecânicas sejam melhoradas.

4.3. DESAFIOS E PERSPECTIVAS

O método MICP é considerado sustentável, além de oferecer vantagens, como a disponibilidade dos microrganismos. No entanto, vale considerar dois fatores importantes para aplicações comerciais dessa tecnologia: o domínio da técnica e o custo.

A vasta complexidade do processo é um fator limitador para o domínio da técnica, visto que inúmeros fatores influenciam na atividade microbiana, incluindo temperatura, pH, tipos de nutrientes, tipos de bactérias, entre outros (Dhami et al., 2013). Somado a isso, o custo da tecnologia MICP pode variar dependendo de fatores como a escala do projeto, o tipo de substrato a ser tratado e o tipo de microrganismos e aditivos químicos utilizados. Além disso, o custo pode ser influenciado pela localização geográfica e disponibilidade de recursos, custos de mão de obra e custos de equipamentos (Fouladi et al., 2023).

Para aplicações em compósitos cimentícios, como argamassas e concretos, é necessário o conhecimento sobre a compatibilidade do microrganismo, ou seja, a capacidade de produzir esporos ao longo do tempo, no interior dos poros desses materiais, geralmente, alcalinos (alcalinofílicos) (Jonkers et al. 2008; Wang et al., 2017). Além disso, a falta de controle da formação de subprodutos de amônia do processo MICP pode ter um efeito prejudicial ao meio ambiente, resultando na emissão de óxidos de nitrogênio na atmosfera, devido a atividade ureolítica (Muyneck et al. 2010).

Novas formas de aplicações também são sugeridas, como a injeção de fissuras em concretos e argamassas. Nessa abordagem, os precipitados minerais são transferidos para a estrutura com o método MICP, isso torna a tecnologia adequada para uso em edifícios tombados (Nagy et al., 2023).

A tecnologia MICP pode capturar dióxido de carbono da atmosfera e convertê-lo em carbonato de cálcio, que é armazenado permanentemente como um mineral sólido. Esse processo ajuda a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a combater as mudanças climáticas (Castainer *et al.*, 1999).

Para Damasceno et al., (2022), o método MICP ainda é incipiente, e são necessárias investigações mais aprofundadas. Muitos fatores interferem no processo, o que dificulta a aplicação. Contudo, é uma tecnologia promissora e sustentável que pode contribuir significativamente para a construção civil.

5. Conclusão

As principais contribuições do levantamento realizado foram:

- Os principais métodos de tratamento de argamassas de reparo usando o método MICP são o método de reparo externo e o método de reparo interno (autorregeneração). O primeiro apresenta maior consenso entre os pesquisadores e resultados mais consistentes;
- Há uma tendência no aumento da resistência à compressão das amostras após a aplicação dos ciclos de tratamento de reparo por MICP;
- A permeabilidade é reduzida nas amostras tratadas, devido a diminuição da penetração da água com a precipitação do carbonato de cálcio, que preenche as fissuras, vedando o local;
- A cicatrização das fissuras pelo método da MICP proporciona a formação da substância carbonato de cálcio, que faz o papel de um agente reparador de fissuras encontradas em

argamassas e concreto. Esse processo ocorre com a aplicação crescente dos ciclos de tratamentos.

- A principal dificuldade encontrada para o domínio da técnica é a complexidade do processo de recuperação pela MICP, visto que a atividade microbiana depende de muitos fatores ambientais. Além disso, o custo poder ser variável a depender da localidade e dos insumos utilizados, somado a isso, deve-se levar em consideração a necessidade de mão de obra especializada e a compatibilidade com o substrato a ser recuperado. Todos esses fatores ainda são desafios a serem superados para que a técnica alcance escalas de aplicação comercial.

Contudo, o método da MICP se mostra promissor e deve ser investigado com maior profundidade a fim de obter-se um material comercialmente acessível. Isso pode permitir a solução de problemas de uma maneira menos agressiva ao meio ambiente, promovendo a redução dos impactos negativos do setor da construção civil.

5.1. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes.

6. Referências

- Abo-El-Enain, S. A., Ali, A. H., Talkhan, F. N., & Abdel-Gawwad, H. A. (2012). Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation. *HBRC Journal*, 8(3), 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.02.001>
- Abo-El-Enain, S. A., Ali, A. H., Talkhan, F. N., & Abdel-Gawwad, H. A. (2013). Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. *HBRC Journal*, 9(1), 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2012.10.004>
- Al-Salloum, Y. et al. (2017). Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation – A review. *Construction and Building Materials*, v. 154, pp. 857-876.
- Aimi, M. A. R. M., Hamidah, M. S., Kartini, K., Hana, H. N., Khalilah, A. K., & Schlangen, E. (2021). Development of autonomous-healing mortar using *Geobacillus stearothermophilus*. *ACI Materials Journal*, 118(1), 3-11. <https://doi.org/10.14359/51700895>.
- Anbu, P., Kang, C. H.; Shin, Y. J., & So, J. S. (2016). Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *Springerplus*, v. 5, p. 250.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005). *NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Bergh, J. M. van der, Miljević, B., Šovljanski, O., Vučetić, S., Markov, S., Ranogajec, J., & Bras, A. (2020). Preliminary approach to bio-based surface healing of structural repair cement mortars. *Construction and Building Materials*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118557>
- Bergh, J. M. V., Miljević, B., Vučetić, S., Šovljanski, O., Markov, S., Riley, M., Ranogajec, J., & Bras, A. (2021). Comparison of microbially induced healing solutions for crack repairs of cement-based infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/su13084287>
- Bhaduri, S., Debnath, N., Mitra, S., Liu, Y., & Kumar, A. (2016). Microbiologically induced calcite precipitation mediated by *Sporosarcina pasteurii*. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(110). <https://doi.org/10.3791/53253>.
- Bergh, J. M., Miljević, B., Vučetić, S., Šovljanski, O., Markov, S., Riley, M., Ranogajec, J., & Bras, A. (2021). Comparison of microbially induced healing solutions for crack repairs of cement-based infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/su13084287>
- Castanier, S., Métayer-levrel, G., & Perthuisot, J. P. (1999). Carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology*, 126(1).
- Chen, B., Du, L., Yuan, J., Sun, X., Pathirage, M., Sun, W., & Feng, J. (2022). An Experimental Study on Engineered Cementitious Composites (ECC) Incorporated with *Sporosarcina pasteurii*. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050691>
- Chen, B., Sun, W., Sun, X., Cui, C., Lai, J., Wang, Y., & Feng, J. (2021). Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent. *Process Biochemistry*, 107, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.001>

- Choi, S. G. et al. (2017, 5 jun.) Sustainable Biocement Production via Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation: Use of Limestone and Acetic Acid Derived from Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(6), 5183-5190.
- Chuo, S. C., Mohamed, S. F., Setapar, S. H. M., Ahmad, A., Jawaid, M., Wani, W. A., Yaqoob, A. A., & Ibrahim, M. N. M. (2020). Insights into the current trends in the utilization of bacteria for microbially induced calcium carbonate precipitation. *Materials*, 13(21), 1-28. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13214993>
- Cuzman, O. A., Richter, K., Wittig, L., & Tiano, P. (2015). Alternative nutrient sources for biotechnological use of *Sporosarcina pasteurii*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(6), 897-906. <https://doi.org/10.1007/s11274-015-1844-z>
- Dadda, A., Emeriault, F., Geindreau, C., Esnault-Filet, A., & Garandet, A. (2019). Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation: étude mécanique et microstructurale. *Revue Française de Géotechnique*, 160, 4. <https://doi.org/10.1051/geotech/2020008>
- Damasceno, M. M., Costa, H. N., & Franca, R. M. (2022). *Método de precipitação de calcita induzida microbialmente em argamassa de reparo*. In: Meio Ambiente e Sustentabilidade: pesquisa, reflexões e diálogos emergentes, 3a ed., Editora Amplla, 2022. DOI: 10.51859/amplla.mas2407-21
- Deepak, H., Joy, S., & Vasugi, V. (2016). *Repair Mortar for Structural Sustainability*. Disponível em: <https://sciresol.s3.us-east-2.amazonaws.com/IJST/Articles/2016/Issue-25/Article31.pdf>
- Dejong, J. T. et al. (2009). Upscaling de biomediate melhoria do solo. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egito, 2009.
- Dhami, N. K., Reddy, S. M., & Mukherjee, A. (2012). *Biofilm and microbial applications in biomineralized concrete*. In: (Ed.). Advanced topics in Biomineralization: InTech, 2012.
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Front. Microbiol*, v.4, a.314, pp.01-13
- Farrugia, C., Borg, R. P., Ferrara, L., & Buhagiar, J. (2019). The application of *Lysinibacillus sphaericus* for surface treatment and crack healing in mortar. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00062>
- Fouladi, A. S., Arulrajah, A., Chu, J., & Pibulsuk, S. H. (2023). Application of microbially induced calcite precipitation (MICP) technology in construction materials: a comprehensive review of waste stream contributions. *Construction and Building Materials*, v. 388, 131546.
- Fu, Q., Wu, Y., Liu, S., Lu, L., & Wang, J. (2022). The adaptability of *Sporosarcina pasteurii* in marine environments and the feasibility of its application in mortar crack repair. *Construction and Building Materials*, 332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127371>
- Garbin, G. R. (2016). *Estudo de biocimentação em solo arenoso*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, Brasil.
- Gebru, A. K., Gebremicael, T. & Gebretinsae, K. H. (2021). Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review. *Chemical Engineering Science*, v. 238, p. 116610.
- Gomes, S., Pacheco Torgal, F., & Camões de Azevedo, A. (2013). Análise de desenvolvimentos no domínio dos materiais de construção auto-reparadores. *Engenharia Civil (UM)*, n.47, pp. 19-30.
- Hamed Khodadadi, T., KAvazanjian, E., Van Paassen, L. & Dejong, J. (2017). *Bio-Grout Materials: A Review*. In: Grouting 2017, pp.1-12.
- Hammes, F. E. & Verstraete, W. (2002). Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology*, v.1, pp. 3-7.
- Intarasoontron, J., Pungrasmi, W., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., & Likitlersuang, S. (2021). Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing. *Construction and Building Materials*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124227>
- Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 139-153.
- Ivanov, V., Chu, J., & Stabnikov, V. (2015). Basics of construction microbial biotechnology. *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*, 2015, pp. 21-56.

- Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W., & Likitlersuang, S. (2019). Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Construction and Building Materials*, 212, 737-744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035>
- Jiang, N. J., Wang, Y., Chu, J., Kawasaki, S., Tang, C., Cheng, L., Du, Y., Shashank, B. S., Singh, D. N., Han, X. & Wang, Y. (2022). Bio-mediated soil improvement: An introspection into processes, materials, characterization and applications. *Soil Use Manag.*, 38 (1), pp. 68-93, 10.1111/SUM.12736
- Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2008). *Development of a bacteria-based self healing concrete*. London: Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-47535-8, 2008.
- Krajewska, B. (2018). Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. *Journal of Advanced Research*, v. 13, pp. 59-67.
- Kulkarni, P. B., Nemade, P. D., & Wagh, M. P. (2020). Healing of generated cracks in cement mortar using MICP. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(4), 679-692. <https://doi.org/10.28991/ccj-2020-03091500>.
- Leeprasert, L., Chonudomkul, D., & Boonmak, C. (2022). Biocalcifying Potential of Ureolytic Bacteria Isolated from Soil for Biocementation and Material Crack Repair. *Microorganisms*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050963>
- Lee, Y. N. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *Journal of Microbiology*.
- Li, E., Du, W., Zhuang, R., Ba, M., Yuan, L., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2022). Preparation and Characterization of Electromagnetic-Induced Rupture Microcapsules for Self-Repairing Mortars. *Materials*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/ma15103608>
- Liu, S., Yu, J., Peng, X., Cai, Y., & Tu, B. (2020). Preliminary study on repairing tabia cracks by using microbially induced carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118611>
- Mangat, P. S., Abubakri, S., Grigoriadis, K., & Starinieri, V. (2021). Hydration and Microwave Curing Temperature Interactions of Repair Mortars. *Recent Progress in Materials*, 03(04), 1-1. <https://doi.org/10.21926/rpm.2104040>.
- Mendes, K. D. S., Silveira, R. C. C. P. & Galvão, C. M. (2008). Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto Enfermagem*, 17(4), 758-64.
- Montoya, B. M. (2012). *Bio-mediated soil improvement and the effect of cementation on the behavior, improvement, and performance of sand*. California, Tese. 252 p. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. University of California. 2012.
- Mujah, D., Shahin, M. A. & Cheng, L. (2016). State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. *Geomicrobiology Journal*, 34(6), 524-537.
- Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, v. 36, pp. 118-136.
- Murugan, R., Suraishkumar, G. K., Mukherjee, A., & Dhami, N. K. (2021). Influence of native ureolytic microbial community on biocementation potential of *Sporosarcina pasteurii*. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00315-5>
- Nagy, B., & Kustermann, A. (2023). Rehabilitation of Porous Building Components and Masonry by MICP Injection Method. *Buildings*, 13(5), 1273. <https://doi.org/10.3390/buildings13051273>
- Nasser, A. A., Sorour, N. M., Saafan, M. A., & Abbas, R. N. (2022). Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using *Bacillus pasteurii* and *Bacillus sphaericus*. *Heliyon*, 8(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09879>
- NBR 13281: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.
- Omoregie, A. I., Ginjom, I., & Nissom, P. (2018). Microbially Induced Carbonate Precipitation Via Ureolysis Process: A Mini-Review. *Transactions on Science and Technology*, 5(4), 245-256.
- Pacheco, V. L. et al. (2022). *Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP): Review from an Engineering Perspective*. v.1 pp. 2379-2396.
- Reis, L., Rodrigues, A., Soares, R., Araújo, R., & Vieira, J. (2017). *Bioprecipitação de carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas e suas aplicações*, v.14, pp. 860-881.
- Rollankanti, R. C., & Srinivasu, K. (2022). Effect of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) method on the Enhancement of Infrastructure Durability and Sustainability – A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, pp. 1608-1613.



Saha, P., & Sikder, A. (2019). Effect of Bacteria on Performance of Concrete/Mortar: A Review Sustainable Material View project. In: *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* (Issue 7). <https://www.researchgate.net/publication/334626974>.

Srinivas M, K., Alengaram, U. J., Ibrahim, S., Phang, S. M., Vello, V., Jun, H. K., & Alnahhal, A. M. (2021). Evaluation of crack healing potential of cement mortar incorporated with blue-green microalgae. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102958>

Stocks-Fischer S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Precipitação microbiológica de CaCO₃. *Solo Biol Biochem*, v.31, pp.1563-1571.

Sun, X., Chen, J., Lu, S., Liu, M., Chen, S., Nan, Y., Wang, Y., & Feng, J. (2021). Ureolytic MICP-based self-healing mortar under artificial seawater incubation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094834>

Yang, Z., & Cheng, X. (2013). A performance study of high-strength microbial mortar produced by low pressure grouting for the reinforcement of deteriorated masonry structures. *Construction and Building Materials*, 41, 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.055>

Yu, X., Chu, J., Wu, S., & Wang, K. (2023). Production of biocement using steel slag. *Construction and Building Materials*, v.383, 2023.

Wang, Z., Zhang, N., Cai, G., Jin, Y., Ding, N., & Shen, D. (2017). Review os ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP). *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(8), 1135-1146.