



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARCELLA MARIA GOMES DAMASCENO

MÉTODO PRECIPITAÇÃO DE CALCITA INDUZIDA MICROBIANAMENTE EM
ARGAMASSAS DE REPARO

CRATEÚS - CE

2022

MARCELLA MARIA GOMES DAMASCENO

MÉTODO PRECIPITAÇÃO DE CALCITA INDUZIDA MICROBIANAMENTE EM
ARGAMASSAS DE REPARO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Heloína Nogueira da
Costa

CRATEÚS - CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D162m Damasceno, Marcella Maria Gomes.

Método Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente em Argamassas de Reparo/Marcella

Damasceno. – 2022.

62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Argamassa Reparo. 2. Construção Civil. 3. Biocimentação. 4. MICP. 5. Sporosarsina pasteurii. I. Título.

CDD 620

MARCELLA MARIA GOMES DAMASCENO

MÉTODO PRECIPITAÇÃO DE CALCITA INDUZIDA MICROBIANAMENTE EM
ARGAMASSAS DE REPARO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, Campus Crateús, como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 29 / 11 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimunda Moreira da Franca
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

À todas as pessoas que me ajudaram a chegar
até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha família que me ajudou e não mediu esforços em todos os momentos dessa jornada. Obrigada por todo incentivo, amor, dedicação, zelo e especialmente por colocarem minha educação como prioridade máxima. Obrigada por compreenderem as ausências e distâncias durante todo esse tempo.

As minhas irmãs Ingrydh Damasceno e Stefanny Damasceno por sempre me instruírem da melhor maneira na minha vida pessoal, acadêmica e profissional. Obrigada por facilitarem minha caminhada de diversas formas e por todo amor e cuidado comigo.

Ao meu namorado João Victor por sempre estar à disposição para contribuir na minha formação, sempre acreditando em mim, me incentivando e apoiando, com todo carinho e paciência. Obrigada por dividir a vida comigo.

Aos meus colegas Vitória Régia e Samuel Siqueira que estiveram junto a mim durante toda a graduação me lembrando todos os dias o significado de amizade verdadeira e segurando a barra comigo em vários momentos.

À Prof. Dr. Heloína Nogueira da Costa, por toda sua experiência e sabedoria compartilhada de maneira tão generosa e paciente, por sua tranquilidade e confiança em mim. Minha eterna gratidão e respeito.

Ao ReAtive, grupo de estudo e pesquisa que me auxiliou em toda aprendizagem e desenvolvimento do meu projeto. Compartilhando conhecimentos e dificuldades para conseguirmos realizar este trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora, Raimunda Moreira da Franca e Thiago Fernandes da Silva, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Por fim, meu último agradecimento é para mim mesma, que sempre me dediquei ao máximo durante toda minha graduação, fazendo o melhor que pude, e hoje me sinto realizada por ter conseguido chegar até aqui e alcançar um grande sonho na minha vida, minha profissionalização.

“A ciência nunca resolve um problema
sem criar pelo menos outros dez”.

(George Bernard Shaw)

RESUMO

Os processos biotecnológicos ganham espaço em um cenário que se têm grande procura por infraestrutura e um acelerado crescimento urbano. Nesse contexto, destaca-se a biocimentação, que é um processo microbiológico de precipitação do carbonato de cálcio (MICP) que favorece melhorias nas propriedades dos materiais cimentícios e é considerada uma solução verde para garantir um produto alternativo e otimizado de suma importância na construção civil. As argamassas de reparo autocicatrizante é um exemplo de material que tem ganhado visibilidade com o uso dessa tecnologia. Portanto, o objetivo desse trabalho é realizar um levantamento e analisar a literatura disponível sobre argamassas de reparo produzidas com o método de Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP). A metodologia de busca seguiu um procedimento extensivo e sistemático usando as principais bases de dados/editoras científicas, são elas: ScienceDirect, Web of Science, ResearchGate, Taylor and Francis, Springer e o Google Acadêmico. Com o uso de combinações de palavras – chaves, selecionou-se 35 artigos. Analisando os artigos agrupou-se os resultados em diferentes métodos de obtenção das argamassas reparo e as principais propriedades trabalhadas. Nesse sentido, a argamassa reparo é desenvolvida com adição de bactérias que realizam o trabalho de promover a cicatrização de fissuras e a melhoria das propriedades físico-mecânicas. Através de uma base de dados a pesquisa mostrou que a resistência à compressão, a permeabilidade a água e a cicatrização de fissuras, são as principais propriedades consideradas para a aplicação do método MICP nas argamassas reparo e com as análises realizadas observou-se resultados favoráveis na utilização do tratamento bacteriano. Além disso, constatou-se que dentre os métodos de obtenção de argamassa de reparo, existem dois processos diferentes: reparo externo, que faz a cicatrização aplicando uma solução bacteriana diretamente nas fissuras da argamassa e o reparo interno, que introduz na própria mistura da argamassa a solução bacteriana, ou seja, uma argamassa autocicatrizante. O reparo externo é mais discutido do que o reparo interno nos trabalhos base, tendo como, a principal bactéria utilizada no processo a *Sporosarsina pasteurii*. Sendo assim, a metodologia MICP é promissora, no entanto, maiores investigações devem ser realizadas para alcançar condições de aplicações em larga escala.

Palavras-chave: argamassa reparo, construção civil, biocimentação, MICP, *sporosarsina pasteurii*.

ABSTRACT

Biotechnological processes gain space in a scenario where there is a great demand for infrastructure and accelerated urban growth. In this context, biocementation stands out, which is a microbiological process of calcium carbonate precipitation (MICP) that favors improvements in the properties of cementitious materials and is considered a green solution to guarantee an alternative and optimized product of paramount importance in civil construction. . Self-healing repair mortars are an example of a material that has gained visibility with the use of this technology. Therefore, the objective of this work is to carry out a survey and analyze the available literature on repair mortars produced with the Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) method. The search methodology followed an extensive and systematic procedure using the main scientific databases/publishers, namely: ScienceDirect, Web of Science, ResearchGate, Taylor and Francis, Springer and Google Scholar. With the use of keyword combinations, 35 articles were selected. Analyzing the articles, the results were grouped in different methods of obtaining repair mortars and the main properties worked on. In this sense, the repair mortar is developed with the addition of bacteria that carry out the work of promoting the healing of cracks and the improvement of the physical-mechanical properties. Through a database the research showed that the resistance to compression, the permeability to water and the healing of cracks, are the main properties considered for the application of the MICP method in the repair mortars and with the analyzes carried out it was observed favorable results in the use of bacterial treatment. In addition, it was found that among the methods of obtaining repair mortar, there are two different processes: external repair, which heals by applying a bacterial solution directly to the cracks in the mortar, and internal repair, which introduces it into the mortar mixture itself. the bacterial solution, that is, a self-healing mortar. External repair is more discussed than internal repair in basic works, having *Sporosarsina pasteurii* as the main bacteria used in the process. Therefore, the MICP methodology is promising, however, further investigations must be carried out to achieve conditions for large-scale applications.

Keywords: repair mortar, construction, biocementation, MICP, *sporosarsina pasteurii*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reações de precipitação de CaCO_3 realizadas por <i>Sporosarsina pasteurii</i>	20
Figura 2 - Colunas de areia cimentadas a base de MICP.	21
Figura 3 - Modelo esquemático resumindo o papel da urease na precipitação CaCO_3 mediada por micro-organismos.....	22
Figura 4 - Processo de precipitação de carbonato de cálcio pelas células bacterianas.....	22
Figura 5 - Morfologia de <i>S. pasteurii</i> sob microscopia eletrônica de varredura.	24
Figura 6 - Esquema de autocicatrização em bioconcreto.	27
Figura 7- Etapas do planejamento da pesquisa.....	29
Figura 8 - Esquema de combinações das palavras-chaves na busca.	29
Figura 9 - Amostras de argamassas preparadas.....	38
Figura 10 - Fluxogramas com as etapas executadas nos trabalhos.	39
Figura 11 - Reparos de trincas em diferentes rodadas de tratamentos MICP. (a) Na 8 ^a rodada; (b) Na 16 ^a rodada; (c) Na 24 ^a rodada.....	48
Figura 12 - Remediação de fissura de argamassa.....	49
Figura 13 - CaCO_3 grosseiro em forma de hexágono observado na superfície da amostra.	50
Figura 14 - Amostra de argamassa no processo de reparação de fissura.	51
Figura 15 - Amostra controle tratada com CaCl_2 (A) e uma amostra tratada com <i>Lysinibacillus sphaericus</i> e CaCl_2 (B).....	52
Figura 16 - Cicatrização de fissuras em amostras de argamassa microbiana com diferentes teores de incorporadores de ar.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadros 1 - Agentes biológicos e suas principais aplicações.	25
Quadros 2 - Artigos base para a Revisão Bibliográfica.....	31
Quadros 3 - Trabalhos analisados para a propriedade de Permeabilidade a água.	43
Quadros 4 - Trabalhos analisados para a propriedade de Cicatrização de Fissuras.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações de parâmetros utilizados para a obtenção das argamassas reparo.	35
Tabela 2 - Valores para resistência a compressão com e sem MICP.	42
Tabela 3 - Valores de permeabilidade do volume de vazios e taxa de absorção de água das amostras.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MICP	Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PICP	Precipitação de Calcita Induzida por Plantas

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	Ureia
NH_4	Amônio
CO_3	Carbonato de Cálcio
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2O	Água
NH_3	Amônia
H_2CO_3	Ácido Carbônico
HCO_3	Bicarbonato de Sódio
H	Hidrogênio
OH	Hidroxila
Ca_2	Cálcio
CaCl_2	Cloreto de Cálcio
NaHCO_3	Bicarbonato de Sódio
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sulfato de Amônio
NaCl	Cloreto de Sódio
MnSO_4	Sulfato de Manganês
NH_4Cl	Cloreto de Amônio
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Peroxido de Carbamida

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Delimitação do trabalho	16
1.4	Estrutura de trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Biocimento	17
2.2	Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP)	18
2.3	Principais agentes biológicos utilizados para produzir biocimento para a construção civil	23
2.4	Técnicas de recuperação de fissuras com o uso de MICP.....	25
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Fontes de dados e palavras chaves	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Obtenção de argamassas de reparo com o método MICP	34
4.2	Propriedades	41
4.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	41
4.2.2	<i>Permeabilidade a água</i>	43
4.2.3	<i>Cicatrização das fissuras</i>	46
4.3	Dificuldades encontradas e perspectivas futuras.....	54
5	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

As matérias-primas no setor da construção civil podem sofrer riscos de esgotamento, visto que, seu rápido desenvolvimento gera uma grande demanda por insumos. Portanto, a procura por novas tecnologias é um caminho necessário para que se consiga desenvolver maneiras para amenizar os efeitos adversos causados pela futura escassez de matérias-primas, além dos prejuízos ocasionados à natureza.

A construção civil busca por materiais e/ou técnicas sustentáveis e alternativas, visando suprir a grande necessidade por infraestrutura urbana. Dessa forma, a engenharia, juntamente com a ciência está avançando cada vez mais com a descoberta, a análise e o desenvolvimento dos processos biotecnológicos produzindo materiais construtivos por vias biológicas (IVANOV *et al.*,2015).

Nessa perspectiva, a biocimentação é um método considerado como uma solução verde para se obter um produto final alternativo e com características físico-mecânicas melhoradas. Essa tecnologia é ecologicamente correta e capaz de reduzir as emissões de carbono na produção de pastas cimentícias, colaborando com a diminuição da taxa de aquecimento global. Devido a este fato, o avanço e a aplicação dessas biotecnologias são imprescindíveis para viabilizar esse método. O termo biotecnologia é definido na área de geotecnia como o estudo de métodos microbiológicos em geomateriais (KHALEGUI; ROWSHANZAMIR,2019), destaca-se entre esses métodos a biomineralização, conceituada como o meio de formação de minerais por organismos vivos.

A biocimentação é um tipo comum de biomineralização, ou também conhecida como Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP) que se refere a formação de carbonato de cálcio na presença de células microbianas e suas atividades metabólicas (STOCKS-FISHER *et al.*, 1999). A MICP é um método biogeoquímico comum que ocorre de diferentes formas: ureólise, desnitrificação, amonificação, redução de sulfato, oxidação de metano e por meio da fotossíntese (MOUNTASSIR *et al.*, 2018). Segundo Dejong *et al.* (2010), o método mais usado e mais energeticamente eficaz dos processos conhecidos para a precipitação de carbonato de cálcio por bactérias é por meio da hidrólise da ureia (urease).

Nesse sentido, a biocimentação é uma opção considerada ecológica em comparação a outras técnicas, uma vez que, é realizada por microrganismos encontrados em abundância no meio ambiente.

A forte atividade enzimática (urease) de um tipo especial de bactéria denominada, *Sporosarcina pasteurii*, é a base do cimento ecológico. Esta linhagem bacteriana é eficiente na quebra da uréia $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ em amônio (NH_4) e carbonato (CO_3) resultando no produto final calcita (CaCO_3) em meio rico em cálcio. Conforme Torgal *et al.* (2015), a energia necessária para a obtenção de calcita por bactérias corresponde apenas a 10% da energia total necessária para se obter a mesma quantidade do cimento habitual.

A obtenção de argamassas de reparo com o uso do método MICP é uma das principais apostas na linha de desenvolvimento de novos materiais para a construção civil. Dentre eles, a argamassa, que é definida como uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes (cimento, cal), agregado miúdo (areias naturais e artificiais) e água (NBR 13281, 2005).

Os revestimentos de argamassa são capazes de desenvolver diferentes manifestações patológicas, entre elas, destaca-se a formação de trincas ou fissuras, os descolamentos e a desagregação da argamassa, que são acentuados por invasores externos como a água. Isso pode levar o revestimento ao seu estado-limite de serviço ou último, e, portando, o revestimento não mais apresenta funcionalidade para o qual foi projetado, tornando-se um risco a segurança do usuário. Nesse sentido, a utilização do método MICP para a obtenção das argamassas de reparo é uma alternativa considerável, uma vez que, é possível alcançar um material que em sua aplicação tenha características cicatrizantes, e com isso, um aumento da vida útil da argamassa.

Essa técnica é inovadora e vem sendo analisada há pouco mais de 20 anos. Contudo, no Brasil esta tecnologia é pouco discutida, sendo essencial a realização de estudos sobre essa temática. Nesse sentido, a pesquisa proposta neste trabalho traz uma revisão crítica da literatura disponível sobre este material inovador. Tendo espaço para análises e debates importantes, com um grande potencial de aplicação e com benefícios significativos para a sociedade. Diante desse contexto, busca-se agrupar, organizar e disponibilizar informações sobre os materiais produzidos com essa tecnologia conforme a literatura nacional e internacional.

1.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem por objetivo realizar uma análise da literatura disponível sobre argamassas de reparo produzidas com o método de Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP).

1.2 Objetivos Específicos

- Entender e caracterizar os métodos de obtenção das argamassas de reparo.
- Compreender as propriedades importantes para produção das argamassas.
- Analisar as limitações e desvantagens encontradas no desenvolvimento do material.

1.3 Delimitação do trabalho

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica da literatura sobre um novo conceito em biotecnologia inovadora utilizada para o desenvolvimento de um material sustentável, a argamassa reparo, através do método de Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP). Apresentando métodos de obtenção e principais propriedades deste material.

1.4 Estrutura de trabalho

A organização deste trabalho compreende-se nas seguintes etapas:

1. **Introdução.** esta parte determina o problema chave em questão, justificando a realização desse trabalho e contextualiza de forma a nortear o entendimento do estudo. Além disso, são expostos o objetivo geral e os objetivos específicos juntamente com a delimitação da pesquisa.
2. **Referencial Teórico.** tem por finalidade trazer um embasamento teórico de maneira mais detalhada mostrando conceituações sobre a biocimentação e o método MICP, assim como, os processos que envolvem o desenvolvimento desse material.
3. **Metodologia.** descreve as etapas da revisão desde a forma de coletar dados e o tratamento dos mesmos.
4. **Resultados e Discussão.** apresentam de maneira crítica resultados obtidos a partir de dados analisados, relacionando as propriedades e as variáveis encontrados na literatura.
5. **Conclusão.** formaliza-se uma síntese das observações essenciais obtidas na pesquisa, como também, uma análise da efetivação dos objetivos previstos.
6. **Referências Bibliográficas.** lista as fontes de pesquisa usadas para elaborar e efetivar a pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biocimento

A produção de cimento, que é um dos componentes básicos do concreto, causa extensos impactos ambientais. Segundo afirmam Achal *et al.* (2015) e Reis *et al.* (2017), em escala global, a produção de cimento consome aproximadamente 10-15% da energia industrial total e é responsável pela emissão de 5-8% de CO₂ antropogênico, ou seja, a produção de cimento é intensiva em energia e ambientalmente hostil. Em concordância com Choi *et al.* (2017), os materiais à base de cimento (argamassa e concreto) têm sido amplamente utilizados na construção e reparação de infraestruturas. Nesse contexto, diversas técnicas alternativas tem sido buscadas, como o MICP, que por precipitação de carbonato de cálcio produz o biocimento, como uma alternativa ambientalmente adequada, capaz de aumentar a durabilidade e resistência das estruturas de concreto, inclusive, proporcionando a restauração das mesmas (DHAMI; REDDY; MUKHERJEE, 2012; ANBU *et al.*, 2016).

O biocimento é um material considerado sustentável e renovável, obtido através de reações bioquímicas com atividade microbiana, resultando em uma mistura com características cimentícias e de propriedades modificadas pelo processo da biocimentação. Assim, a cimentação microbiana, ou a biocimentação, consiste na formação de um material aglutinante de partículas, devido a introdução de microrganismos e aditivos específicos (GARBIN, 2016). De acordo com Ivanov e Chu (2008), que usam como exemplo o solo, esse mecanismo aumenta a força e a propriedade de rigidez do mesmo pela ação dos microrganismos, de forma a melhorar suas propriedades e suas condições para uso e aplicação.

O biocimento pode ser usado na construção em concreto e/ou argamassa de reparo. Segundo Choi *et al.* (2017), o biocimento pode ser usado de maneira semelhante à do cimento comum para reduzir a condutividade hidráulica, bem como reparar fissuras no concreto.

Destaca-se que as estruturas de concreto são continuamente expostas a condições que comprometem sua integridade, uma delas é o intemperismo, que pode causar a formação de rachaduras e fissuras. Esses defeitos estruturais podem agravar o processo de deterioração da armadura de aço, pois permite que ocorra a entrada de substâncias potencialmente agressivas (como água, gases, líquidos não-aquosos e/ou íons), que em contato com o metal podem provocar reações físicas e/ou químicas que resultam em danos irreversíveis (DHAMI; REDDY; MUKHERJEE, 2012; OMOREGIE; GINJOM; NISSOM, 2018). Nesse sentido, o uso de

argamassas de reparo em estruturas de concreto é observado frequentemente para a manutenção da durabilidade das estruturas. Posto isto, o biocimento pode ser utilizado para produzir argamassas semelhante a argamassa de cimento Portland (CHOI *et al.*, 2017).

Apesar do biocimento apresentar vantagens, ele ainda não substitui completamente o cimento Portland. No entanto, possui um papel fundamental e de grande potencial na geração de materiais de construção sustentáveis, e seu estudo e desempenho nas pesquisas é promissor para que em futuras gerações se tenha opções de materiais menos agressivos ao meio ambiente.

2.2 Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP)

As biotecnologias empregadas na construção civil apresentam muitas vantagens quando comparado com processos de construção convencionais; portanto, sua implementação pode ocasionar benefícios econômicos e ambientais importantes (IVANOV; STABNIKOV, 2016). Nesse sentido, a biocimentação é uma inovação positiva que possui inúmeros privilégios ao se obter um material que têm características mecânicas aprimoradas e produzido de forma ecológica, favorecendo a utilização de insumos em abundância na natureza.

Segundo Achal *et al* (2015), o processo de biocimentação ou também conhecido como Precipitação de Calcita Induzida Microbianamente (MICP), consiste na precipitação de carbonato de cálcio em uma superfície por meio de processos biológicos. O método mais usado na biocimentação é o viabilizado a partir da enzima urease produzida através de bactérias que catalisam a hidrólise da ureia em amônio e carbonato (MAHAWISH *et al.*, 2017). Os microrganismos podem ser encontrados de maneira natural e em grandes quantidades na natureza.

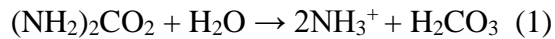
A triagem e a identificação dos microrganismos são um dos principais aspectos que acabam afetando a utilização de microrganismos na engenharia geotécnica, visto que, devem ser adequados para diferentes aplicações e ambientes, assim como, a biossegurança da aplicação, a otimização da atividade microbiana *in situ*, a estabilidade das propriedades após a biomodificação e pôr fim a relação custo-benefício. O último fator é considerado o mais importante para sua proliferação em larga escala (IVANOV; CHU, 2008).

A MICP é uma alternativa acessível e viável para a execução do processo de biocimentação. Muynck *et al*, (2010), ressaltam que existem uma ampla gama de bactérias qualificadas para realizar a síntese do carbonato de cálcio em diversos ambientes e condições. Da mesma forma, apresentam-se quatro mecanismos para promover a precipitação: via

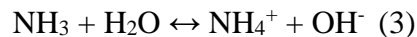
hidrólise da ureia, redução férrica, redução de sulfato e por desnitrificação (WANG *et al.*, 2017).

O método mais empregado na MICP é por meio da hidrólise da ureia normalmente desempenhado por bactérias produtoras da urease, que realizam a síntese da ureia na presença de gás carbônico e íons cálcio originando carbonato de cálcio, ou também conhecido como, biocimento (DE MUYNCK *et al.*, 2010). Na execução do processo, início e fim, acontecem cerca de cinco equações químicas. (KRAJEWSKA, 2018), como são descritas a seguir.

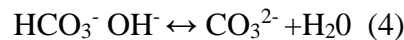
Primeiramente, na presença da água a ureia é sintetizada pela enzima e modificada para ácido carbônico e amônia (Equação 1).



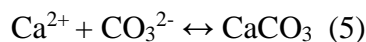
Os produtos da reação se dissociam em água e formam íons bicarbonato, amônio e hidróxido (Equação 2 e Equação 3).



A presença dos íons hidróxido causa um aumento no pH do meio e favorece para a formação de íons carbonato (Equação 4).

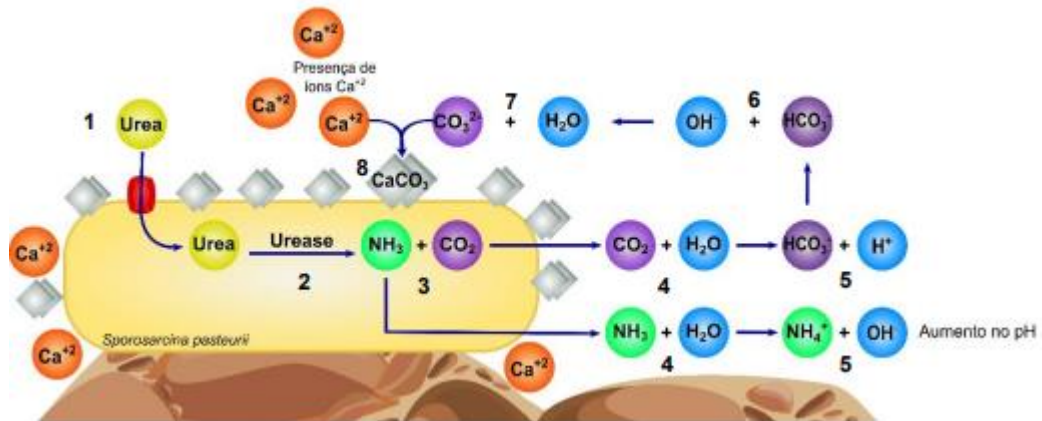


Com isso, a combinação de íons e a precipitação de carbonato de cálcio se dá na presença de Ca^{2+} (Equação 5).



É preciso salientar que uma boa disponibilidade de íons de Ca e CO_3 num ambiente calcinogênico é o fator mais importante para favorecer a precipitação de CaCO_3 (LEE, 2003). Na Figura 1 é possível visualizar as etapas das reações químicas de precipitação de CaCO_3 realizadas pela *Sporosarsina pasteurii*, uma das bactérias mais utilizadas no método MICP.

Figura 1 - Reações de precipitação de CaCO_3 realizadas por *Sporosarcina pasteurii*.

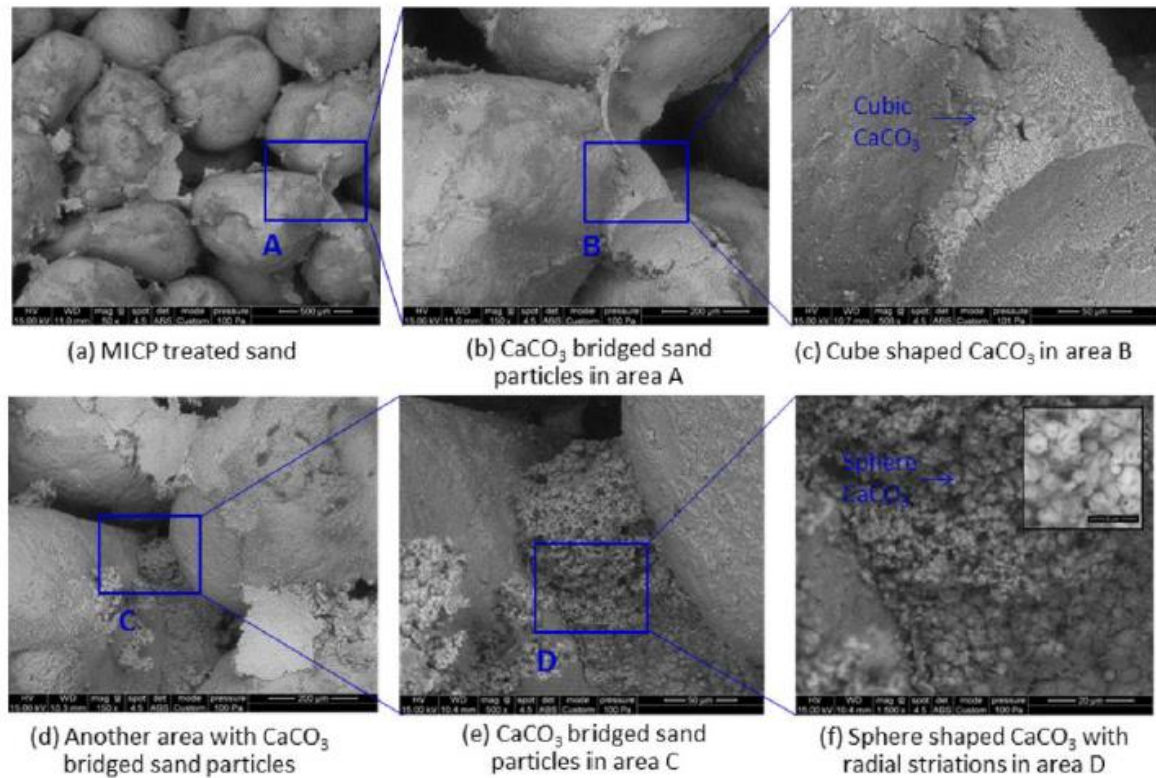


- (1) A ureia entra na célula a favor do gradiente de concentração (2); a urease hidrolisa a ureia em (3) amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2); (4) a NH_3 , em contato com a água, produz (5) amônio (NH_4^+) e íons hidróxido (OH^-); (5) o CO_2 , em contato com a água, forma íons bicarbonato (HCO_3^-); (6) com a elevação do Ph, o equilíbrio da reação é modificado, (7) levando à formação de íons carbonato (CO_3^{2-}); (8) a superfície da célula fica mais eletronegativa, atraindo íons de cálcio (Ca^{+2}) e resultando na precipitação de CaCO_3 .

Fonte: Moreno (2020).

Para De Muyneck *et al.* (2010), a MICP pode ocorrer de maneira induzida ou controlada. A produção de carbonato de cálcio, por bactérias é classificada como induzida devido ao mineral produzido depender largamente das condições ambientais. Os fatores que alteram diretamente a MICP são: a temperatura, o pH e a concentração de células bacterianas (KEYKHA *et al.*, 2017). De forma complementar, a Figura 2 mostra grãos de areia cimentados pelo processo MICP.

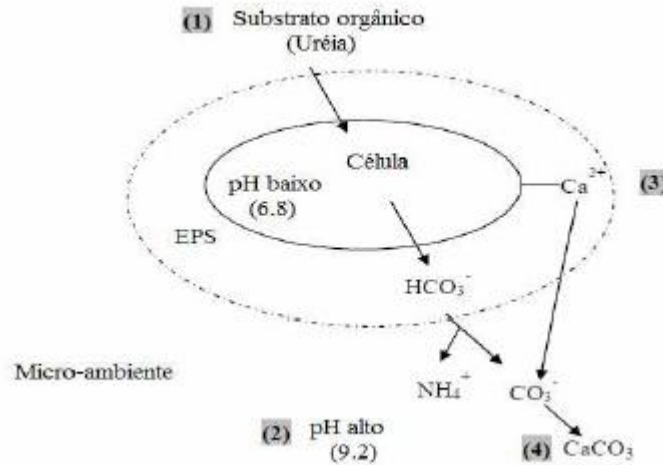
Figura 2 - Colunas de areia cimentadas a base de MICP.



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

As bactérias ureolíticas possuem os melhores resultados dentre organismos capazes de sintetizar a urease, em razão do curto período de tempo necessário para precipitar o CaCO_3 , assim como, em razão das grandes massas precipitadas de CaCO_3 (MOUNTASSIR *et al.*, 2018). Em conformidade com Achal *et al.* (2015) as bactérias usam o nutriente para gerar células, a ureia como substrato para hidrolisar e o cálcio como fonte de energia para formar o biomaterial. Na Figura 3 é possível observar o modelo esquemático resumindo o papel da urease na precipitação CaCO_3 mediada por microrganismos.

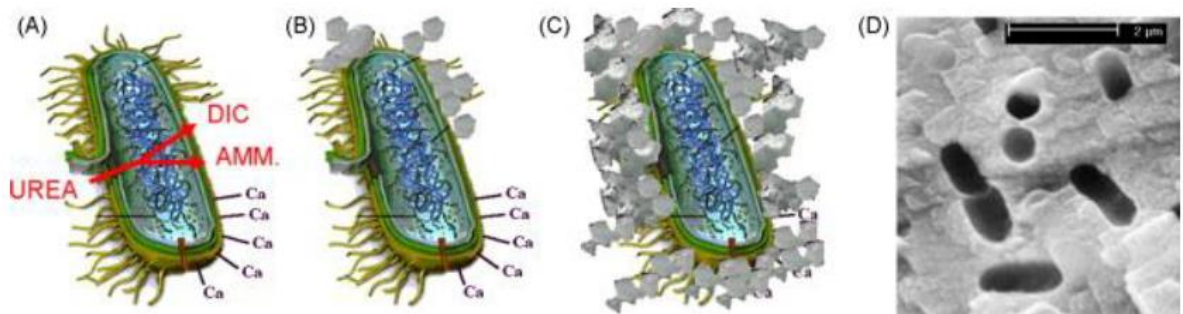
Figura 3 - Modelo esquemático resumindo o papel da urease na precipitação CaCO_3 mediada por micro-organismos.



- (1) hidrólise da ureia, (2) aumento da alcalinidade, (3) adsorção superficial de íons Ca^{2+} e (4) nucleação e crescimento do cristal. EPS significa substância polimérica extracelular
 Fonte: adaptado de AL-THAWADI, (2008).

As bactérias do grupo *Sporosarsina pasteurii* (*S. pasteurii*), são as mais aplicadas nas técnicas de biocimentação (ACHAL *et al.*, 2015). Atribui-se isso ao fato que esse gênero não é reprimido por altas concentrações de amônio, sendo aconselhável para processos biomediados, visto que, altas concentrações de ureia são hidrolisadas no procedimento. De forma ilustrativa, a biocimentação é representada na Figura 4.

Figura 4 - Processo de precipitação de carbonato de cálcio pelas células bacterianas.



Fonte: De Muyneck *et al.* (2010).

Na Figura 4 é possível observar uma representação simplificada dos eventos que ocorrem durante a precipitação de carbonato induzida por ureolítica. Os íons de cálcio na solução são atraídos para a parede celular bacteriana devido à carga negativa desta última. Com a adição de ureia às bactérias, carbono inorgânico dissolvido (DIC) e amônio (AMM) são liberados no microambiente da bactéria(A).

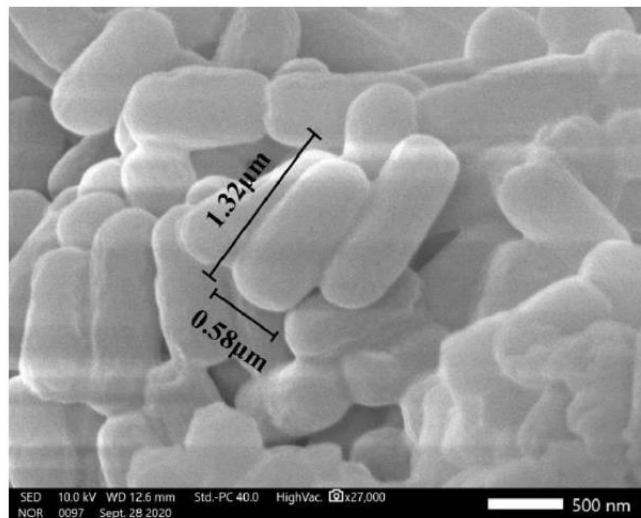
Na presença de íons de cálcio, isso pode resultar em uma supersaturação local e, portanto, precipitação heterogênea de carbonato de cálcio na parede celular bacteriana (B). Ao passar de um tempo, toda a célula fica encapsulada (C), limitando a transferência de nutrientes, resultando em morte celular. A imagem (D) apresenta as impressões de células bacterianas envolvidas na precipitação de carbonato. Em Hammes e Verstraete (2002) encontra-se uma representação mais aprofundada.

2.3 Principais agentes biológicos utilizados para produzir biocimento para a construção civil

A bactéria *Sporosarcina pasteurii* (anteriormente classificada como *Bacillus pasteurii*), pertence a ordem das Bacillales, e gênero das *Sporosarcina*. É uma bactéria Gram-positiva anaeróbia, alcalofílica, possui a forma de bastonete, capacidade de formar endósporos esféricos ou moderadamente ovoides. Crescem em ambientes básicos de pH 9-10, e a temperatura de 30°C, o crescimento é reduzido em temperaturas mais elevadas (GIBSON, 1935; DE VOS *et al.*, 2011; KAWASAKI, 2012; RAJASEKAR; MOY; WILKINSON, 2017).

As células de *S. pasteurii* possuem dimensões que variam de 0,5 a 1,2 µm de diâmetro por 1,3 a 4,0 µm de comprimento e geralmente apresentam motilidade, ou seja, facilidade de se mover (BUCHANAN; GIBBONS, 1974). De acordo com Ferris *et al.* (1996), a *Sporosarcina pasteurii*, trata-se de uma bactéria alcaloide com alta atividade enzimática de urease. A *S. pasteurii* usa ureia como fonte de energia e produz amônia, a qual aumenta o pH no ambiente, causando a precipitação de Ca^{2+} e CO_3^{2-} em $CaCO_3$ (KROLL, 1990). Na Figura 5 apresenta-se a morfologia de *S. pasteurii* sob microscopia eletrônica de varredura.

Figura 5 - Morfologia de *S. pasteurii* sob microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Chen *et al.* (2022).

A *Sporosarcina pasteurii* é o organismo mais utilizado para a precipitação de CaCO_3 , pois não é patogênico, produz elevada quantidade de precipitado em curtos períodos, apresenta alta atividade ureolítica, é resistente a altas concentrações de amônio, além disso é naturalmente encontrada no solo, mais precisamente na subsuperfície (HAMED *et al.*, 2017; MUJAH; SHAHIN; CHENG *et al.*, 2016a)

Por ser uma espécie caracterizada por apresentar células que não se agregam e que, portanto, possuem alta relação entre superfície e volume da célula, proporciona condições ideais para o início eficiente da precipitação de CaCO_3 (WHIFFIN, 2004; DEJONG; FRITZGES; NÜSSLEIN, 2006).

O processo de biocimentação está atrelado diretamente com a atividade microbiológica e sua capacidade ureolítica, ou seja, a atividade ureolítica bacteriana é essencial na precipitação de carbonato de cálcio. Logo, diferentes pesquisadores têm estudado diversos tipos de bactérias e seu comportamento no método da biocimentação.

Estudos feitos por DeJong *et al.*, (2009); Ivanov e Chu (2008) e Montoya (2012) apontaram o potencial de cimentação biológica das espécies de bactérias: *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Sporolactobacillus*, *Clostridium* e *Desulfotomaculum*. No entanto, para Hammes (2002) a *Sporosarcina pasteurii*, é a espécie que tem se mostrado com a melhor capacidade de servir as finalidades da engenharia civil, portanto, é a bactéria mais presente nos estudos sobre biocimentação.

No Quadro 1 são apresentados outros tipos de microrganismos, mostrando diferentes tipos de aplicações. O uso de cada tipo de bactéria foi avaliado por diferentes autores e seus melhores desempenhos variam de acordo com seu emprego.

Quadros 1 - Agentes biológicos e suas principais aplicações.

Aplicação	Agente Biológico	Referência
Argamassa de cimento e concreto	<i>Bacillus cereus</i>	Le Metayer – Leverel <i>et al.</i> (1999)
	<i>Bacillus sp. CT-5</i>	Achal <i>et al.</i> (2011)
	<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Achal <i>et al.</i> (2011)
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramachandran <i>et al.</i> (2001)
	<i>Shewanella</i>	Glosh <i>et al.</i> (2005)
Remediação de fissuras em concreto	<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Bang <i>et al.</i> (2001)
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramakrishnan (2007)
	<i>Bacillus pasteurii</i>	Ramachandran <i>et al.</i> (2001)
	<i>Bacillus sphaericus</i>	D Muynck <i>et al.</i> (20028)
	<i>Bacillus sphaericus</i>	De Belie <i>et al.</i> (2008)
Autocicatrização	<i>Bacillus cohnii</i>	Jonkers <i>et al.</i> (2007)
	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Jonkers <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Autor (2022).

Dessa forma, a aplicação do método de precipitação de calcita induzida juntamente com o uso de uma cultura bacteriana adequada faz com que o processo de biocimentação torne-se promissor, sobretudo, empregado a produtos cimentícios como o desenvolvimento das argamassas de reparo.

2.4 Técnicas de recuperação de fissuras com o uso de MICP

As estruturas de concreto apresentam problemas que podem ocasionar o aparecimento de fissuras. Essas manifestações patológicas podem ser causadas por cargas excessivas, práticas construtivas inadequadas, exposição a ambientes agressivos, retração no concreto, entre outros (BAUER, 2005). A existência de fissuras acaba reduzindo a vida útil da estrutura de concreto, e isso se deve ao fato da permeabilidade do concreto, que permite que a água e/ou a solução

agressiva adentrem com facilidade na estrutura por meio das fissuras, acarretando uma degradação a longo prazo da mesma.

Na busca de soluções para reverter esse problema, os materiais de reparo como epóxi e argamassas à base de cimento não retrátil ou expansivo foram amplamente utilizados para reparar as fissuras no concreto. Apesar dessas argamassas encontradas comercialmente possuírem boas propriedades mecânicas e resistência de aderência, existem implicações ambientais negativas motivadas pela produção desses materiais tornando-os preocupantes, principalmente, devido ao seu grau de toxicidade.

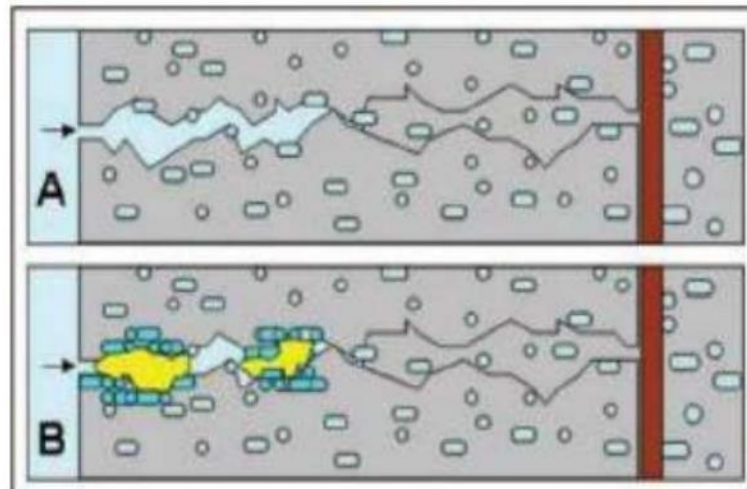
Em vista disso, o emprego do tratamento de rachaduras pelo método da MICP é uma das possibilidades para reparação alternativa e mais favorável ao meio ambiente. Para as aplicações do biocimento no concreto, dois métodos de reparo são sugeridos: o método de autocura, onde os materiais são incorporados ao concreto antes do aparecimento de fissuras, e o método de fechamento de fissuras, onde argamassas de reparo são aplicados nas fissuras presentes no concreto.

Além disso, o processo de MICP é uma técnica efetiva e ecologicamente correta que pode ser aplicada em diversas formas, incluindo a remediação de íons cálcio, radionucleotídeos e metais pesados, sequestro de CO₂, restauração de calcário em prédios históricos, bioestabilização de solos e taludes, biocimentação, proteção da superfície de argamassas e concreto, remediação de fissuras dentre outras aplicações (METAYER-LEVREL *et al.* 1999; AL-THAWADI, 2008; DE MUYNCK *et al.* 2010; PENG *et al.* 2010; ACHAL *et al.* 2012; PHILLIPS *et al.* 2012; ABO-EL-ENEIN *et al.* 2013).

A partir de um experimento de Choi *et al.* (2017), amostras de argamassa embebidas em determinada solução bacteriana e solução de ureia detectou-se, com 21 dias de tratamento, que a técnica de fechamento de fissura pode reduzir a largura da fissura em aproximadamente 80%. Achal *et al.* (2013) e Ramachandran *et al.* (2001), concluíram que a técnica MICP para diminuir fissuras pode melhorar tanto a resistência quanto a durabilidade da argamassa de cimento, e os cristais de calcita da bactéria agem como cimento, apresentando boa propriedade de ligação à areia.

Nessa perspectiva, o emprego do método de biocimentação nas argamassas reparo pode gerar um produto capaz de melhorar tanto a fissuração, como suas propriedades inerentes e fundamentais, como resistência à compressão e permeabilidade, obtendo estruturas com bons desempenhos e mais sustentáveis. Na Figura 6, pode-se observar a ação bacteriana na cura de um bioconcreto, isso mostra a capacidade de melhorias nos materiais cimentícios essenciais na construção civil.

Figura 6 - Esquema de autocicatrização em bioconcreto.



Fonte: Arnold (2011).

Conforme Bergh *et al.* (2021) as argamassas podem ser reparadas de dois modos principais: reparo interno e reparo externo, uma vez que, acontecem processos de autocura e de cura induzidas. No reparo interno, são introduzidas as bactérias na própria argamassa, e assim, quando uma fissura é desenvolvida a regeneração acontece de dentro para fora, fazendo com que a argamassa autorregenerativa faça o trabalho de preenchimento da mesma.

No reparo externo a argamassa habitual fissurada é embebida de uma solução bacteriana que fará o trabalho de biocimentação, com intervenção humana, para que o processo possa acontecer, e assim, a argamassa ser recuperada. Os dois métodos acontecem com a ação bacteriana, mas cada um apresenta dificuldades e vantagens na sua utilização.

Dessa forma, a biocimentação além de ser um método ecológico, pode ser empregado de diferentes maneiras, sendo assim, uma forma importante de reverter problemas na área da construção civil de maneira mais efetiva, a partir da reparação de danos, ou, ainda melhor, com sua prevenção e tratamento imediato devido a produção de argamassas autorregenerativas.

3 METODOLOGIA

Este estudo faz um levantamento através de uma literatura base para compreender, discutir, analisar e identificar pontos relevantes sobre o tema em questão, enfatizando seu potencial inovador e seu significativo impacto dentro da construção civil.

A pesquisa apresentou-se através do método conhecido como revisão bibliográfica da literatura, no qual, seguiu um procedimento extensivo e sistemático usando as principais bases de dados/editoras científicas.

A revisão bibliográfica é uma metodologia de pesquisa utilizada para recolher e para avaliar um determinado tópico (BIOLCHINI *et al.*, 2005). É uma forma de pesquisa que utiliza a literatura existente como fonte e aplica métodos explícitos e ordenados de busca, e expõe de forma resumida a metodologia da pesquisa e os resultados das evidências encontradas (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

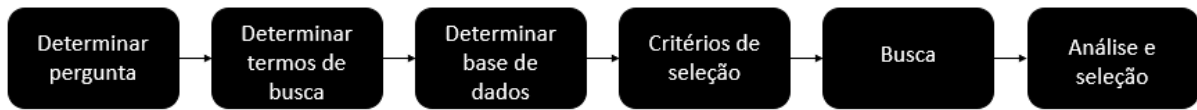
Além disso, a revisão bibliográfica é uma metodologia rigorosa que reúne materiais semelhantes de vários autores e realiza uma análise criteriosa. Ela é considerada uma pesquisa secundária, porque utiliza estudos primários para fazer a análise, em que, é possível verificar a amplitude dos estudos já realizados em relação ao assunto principal e ainda descobrir entrelinhas de pesquisa.

A revisão bibliográfica foi definida como método para este trabalho porque é apropriada para englobar os dados de um grupo de estudos. Ao demonstrar um resumo de um número de estudos sobre determinado tópico, é possível ampliar o conhecimento sobre determinado tema e assim ter diferentes percepções. O tema deste trabalho é relativamente novo, pouco explorado no Brasil e com um escasso conhecimento difundido.

3.1 Fontes de dados e palavras chaves

Para identificar artigos e estudos potenciais para esta revisão os artigos foram catalogados nas seguintes bases: ScienceDirect, Web of Science, ResearchGate, Taylor and Francis, Springer e o Google Acadêmico. O planejamento de pesquisa do material bibliográfico seguiu as etapas ilustradas na Figura 7.

Figura 7- Etapas do planejamento da pesquisa.



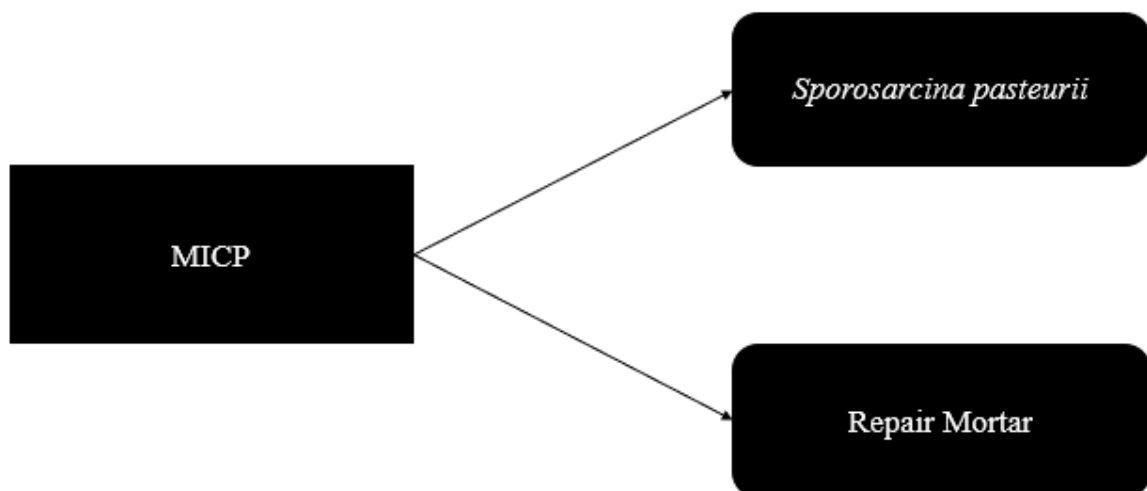
Fonte: Autor (2022).

A primeira etapa do planejamento de pesquisa foi a determinação de uma pergunta base para nortear o trabalho. Essa indagação foi formulada de um modo simples, claro e objetivo, moldada a partir das intenções propostas para a pesquisa, portanto, pensada de maneira cautelosa e estratégica.

Para o desenvolvimento principal do trabalho e dos resultados as palavras-chaves foram selecionadas, em um segundo momento, de forma que diminuísse a quantidade de artigos e só retornasse o que realmente a pesquisa se propõe. As palavras selecionadas foi uma combinação dos termos: *Sporosarcina pasteurii*, MICP e *repair mortar*, MICP.

Além disso, a pesquisa aconteceu em duas frentes por meio dos idiomas, primeiro com a pesquisa em inglês e posteriormente em português. A Figura 8 apresenta como funcionou a combinação das palavras-chaves. O objetivo da combinação das palavras foi para evidenciar a área de atuação.

Figura 8 - Esquema de combinações das palavras-chaves na busca.



Fonte: Autor (2022).

Realizou-se uma busca dentro de 6 plataformas, em que, as 5 primeiras foram através do Portal do Capes e de forma surpreendente a gama de publicações e periódicos encontrados foi um pouco inferior ao esperado por este ser um tema ainda muito novo e ainda em avanço. Contudo, os trabalhos encontrados apresentam uma base de pesquisa forte e com discussões relevantes sobre o tema.

A seleção dos estudos aconteceu com a análise nos títulos e resumos apresentados por cada artigo. Após esse o levantamento ainda foram avaliados os temas de maior relevância e que se encaixavam no objetivo deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados discutidos a seguir apresentam dois pontos principais: os métodos de obtenção e as principais propriedades estudadas das argamassas reparo. O primeiro deles faz um apanhado geral de como são obtidas as argamassas, explicando o processo de desenvolvimento assumido pelos autores das pesquisas selecionadas.

No segundo tópico são expostas as seguintes propriedades: resistência à compressão, permeabilidade e cicatrização de fissuras. Estas propriedades foram as mais debatidas nos trabalhos analisados e, por isso, as escolhidas para a discussão nos resultados. Comparando as amostras de controle e as amostras fissuradas, tratadas pelo método MICP, mostrou-se os benefícios do uso dessa técnica.

Ademais, é abordado mais um item que traz informações adicionais, como dificuldades encontradas e perspectivas futuras. Apresentam-se as dificuldades encontradas no método MICP e suas futuras inovações, como por exemplo, ser base para ampliações de novas aplicações e técnicas diferentes.

No Quadro 2 reuniu-se todos os artigos que foram base para o desenvolvimento deste trabalho apontando seus respectivos autores.

Quadros 2 - Artigos base para a Revisão Bibliográfica.

Nº	ARTIGO	AUTORES
1	Healing of Generated Cracks in Cement Mortar Using MICP.	Kulkarni <i>et al.</i> (2020)
2	A Experimental Study on Engineered Cementitious Composites (ECC) Incorporated with <i>Sporosarcina pasteurii</i> .	Chen <i>et al.</i> (2022)
3	Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium <i>Sporosarcina pasteurii</i> .	Ma <i>et al.</i> (2020)
4	Effect of Bacteria on Performance of Concrete/Mortar: A Review.	Saha <i>et al.</i> (2019)
5	Hydration and Microwave Curing Temperature Interactions of Repair Mortars.	Mangat <i>et al.</i> (2021)
6	Influence of native ureolytic microbial community on biocementation potential of <i>Sporosarcina pasteurii</i> .	Murugan <i>et al.</i> (2021)
7	Microbiologically Induced Calcite Precipitation Mediated by <i>Sporosarcina Pasteurii</i> .	Bhaduri <i>et al.</i> (2016)
8	Preparation and Characterization of Electromagnetic-Induced Rupture Microcapsules for Self-Repairing Mortars.	Li <i>et al.</i> (2022)
9	Repair Mortar for Structural Sustainability.	Deepak <i>et al.</i> (2016)

10	Rethinking the formulation of (patch) repair mortars.	Arito <i>et al.</i> n.d.
11	Repair mortars for masonry bridges.	Pavía n.d.
12	Amélioration des propriétés mécaniques des sols par biocimentation: étude mécanique et microstructurale.	Dadda <i>et al.</i> (2019)
13	Ureolytic MICP-Based Self-Healing Mortar under Artificial Seawater Incubation.	Sun <i>et al.</i> (2021)
14	Biocalcifying Potential of Ureolytic Bacteria Isolated from Soil for Biocementation and Material Crack Repair.	Leeprasert <i>et al.</i> (2022)
15	Comparison of Microbially Induced Healing Solutions for Crack Repairs of Cement-Based Infrastructure.	Bergh <i>et al.</i> (2021)
16	Insights into the Current Trends in the Utilization of Bacteria for Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation.	Chuo <i>et al.</i> (2020)
17	The Application of <i>Lysinibacillus sphaericus</i> for Surface Treatment and Crack Healing in Mortar.	Farrugia <i>et al.</i> (2019)
18	Development of Autonomous-Healing Mortar Using <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .	Aimi <i>et al.</i> (2021)
19	Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method.	Jongvivatsakul <i>et al.</i> (2019)
20	Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing.	Intarasontron <i>et al.</i> (2021)
21	The adaptability of <i>Sporosarcina pasteurii</i> in marine environments and the feasibility of its application in mortar crack Repair.	Fu <i>et al.</i> (2022)
22	Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation Method.	Choi <i>et al.</i> (2017)
23	Elaboration biphasic calcium phosphate nanostructured powders.	Dalmônico <i>et al.</i> (2015)
24	Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using <i>Bacillus pasteurii</i> and <i>Bacillus sphaericus</i> .	Nasser <i>et al.</i> (2022)
25	Evaluation of crack healing potential of cement mortar incorporated with blue-green microalgae.	Srinivas M <i>et al.</i> (2021)
26	Preliminary study on repairing tabia cracks by using microbially induced carbonate precipitation.	Liu <i>et al.</i> (2020)
27	Preliminary approach to bio-based surface healing of structural repair cement mortars.	Bergh <i>et al.</i> (2020)
28	Crack sealing evaluation of self-healing mortar with <i>Sporosarcina pasteurii</i> : Influence of bacterial concentration and air-entraining agent.	Chen <i>et al.</i> (2021)

29	A performance study of high-strength microbial mortar produced by low pressure grouting for the reinforcement of deteriorated masonry structures.	Yang <i>et al.</i> (2013)
30	Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP): Review from an Engineering Perspective.	Pacheco <i>et al.</i> (2022)
31	Alternative nutrient sources for biotechnological use of <i>Sporosarcina pasteurii</i> .	Cuzman <i>et al.</i> (2015)
32	Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar.	Abo-El-Enein <i>et al.</i> (2013)
33	Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation.	Abo-El-Enein <i>et al.</i> (2012)
34	Bioprecipitação de carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas e suas aplicações.	Reis <i>et al.</i> (2017)
35	Análise de desenvolvimentos no domínio dos materiais de construção autoreparadores.	De <i>et al.</i> n.d.

Fonte: Autor (2022).

4.1 Obtenção de argamassas de reparo com o método MICP

A análise dos artigos listados na Tabela 1 apontou diferentes procedimentos de obtenção de argamassas de reparo que são explanados e discutidos abaixo apontado suas particularidades e semelhanças. Na Tabela 1 encontra-se o resumo das principais características das argamassas produzidas.

Tabela 1 - Informações de parâmetros utilizados para a obtenção das argamassas reparo.

Nº	Traço da Argamassa	Tipo de cimento	Bactérias	Composição dos nutrientes	Dimensão dos corpos de prova	Autores
1	1:3:0,4	Cimento Portland	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	20 gramas de ágar e 4 gramas de pó de ágar 250 ml de água destilada pH foi ajustado entre 7 e 7,5	Moldes cilíndricos (45 mm de diâmetro / 90 mm de altura)	Kulkarni <i>et al.</i> (2020)
2	1:3:2	Cimento Portland	<i>Bacillus sphaericus</i>	NaHCO ₃ (2,12 g/l), ureia (10 g/l).	Moldes cúbicos (15cm)	Jongvivatsakul <i>et al.</i> , (2019)
3	1:3:0,5	Cimento Portland	<i>Bacillus sphaericus</i>	ureia (10 g/L), NaHCO ₃ (2,12 g/L), caldo nutriente (3 g/L), extrato de levedura (20 g/L)	Moldes cúbicos (50mm)	Intarasoontron <i>et al.</i> (2021)
4	1:2,5:0,4	Cimento Portland	<i>Sporosarsina Pasteurii</i>	extrato de levedura (20g), (NH ₄) ₂ SO ₄ (10g), solução de tampão Tris (0,13M) (pH = 9,0)	Moldes cilíndricos (50 mm de diâmetro / 100 mm de altura)	Choi <i>et al.</i> (2017)

5	1:3:0,45	Cimento Portland	<i>Bacillus pasteurii</i> e <i>Bacillus sphaericus</i>	Subcultivada: extrato de levedura (10 g/L), NaCl (5 g/L), peptona (10 g/L), ureia esterilizada por filtração (20 g/L), Cultivada: MnSO ₄ ·2H ₂ O (0.01 g/L)	Moldes cúbicos	Nasser <i>et al.</i> (2022)
6	1:3:0,46	Cimento Portland	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	extrato de levedura (10 g/l), NaCl (5 g/l), CaCl ₂ (25 mm) ureia (20 g/l) O pH = 6,5 por 1 N HCl.	Moldes de polegada cúbica	Abo – El – Enein <i>et al.</i> (2012)
7	1:3:0,5	Cimento Portland	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	caldo nutriente 4 g, NH ₄ Cl 10 g, NaHCO ₃ 2,15 g, uréia 20 g, água destilada 100 mL	Moldes Prismáticos (40 mm / 40 mm / 160 mm)	Bergh <i>et al.</i> (2020)
8	1:0,36:0,3	Cimento Portland	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Tris 130 mM (pH 9,0), 10 g/L CO(NH ₂) ₂ e 20 g/L extrato de levedura	Moldes Prismáticos (40 mm / 40 mm / 160 mm)	Chen <i>et al.</i> (2021)

9	1:3:0,85	Cimento Portland	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	sistema de caldo Medium 295 suplementado com ureia	Moldes Prismáticos (40 mm / 40 mm / 160 mm)	Farrugia <i>et al.</i> (2019)
10	1:0,45:0,25	Cimento Portland	<i>Bacillus</i>	-	Moldes Prismáticos (40 mm / 40 mm / 160 mm)	Sun <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Autor (2022).

A partir de observações feitas na literatura identificou-se que existem duas formas principais de produção das argamassas de reparo usando o método MICP. 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), Intarasontron *et al.* (2021) e Farrugia *et al.* (2019), foi realizado o método de aplicação de uma solução bacteriana em amostras de argamassas fissuradas, na qual, a atuação da biocimentação nas rachaduras fazia com que elas se regenerassem, este procedimento é conhecido por reparo externo.

O reparo externo usa, geralmente, uma argamassa convencional, na qual, os materiais que compõem esta mistura cimentícia são: cimento Portland, areia de leito de rio e água destilada. Nas pesquisas esse método é o que mais se destaca, uma vez que, foi o ponto de partida para o descobrimento dessa técnica aplicada as argamassas e por ser mais fácil experimentalmente seu desenvolvimento. A Figura 9 apresenta os corpos de prova produzidos com amostras de argamassas desenvolvidas por alguns dos autores.

Figura 9 - Amostras de argamassas preparadas.



Fonte: Kulkarni *et al.* (2020).



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



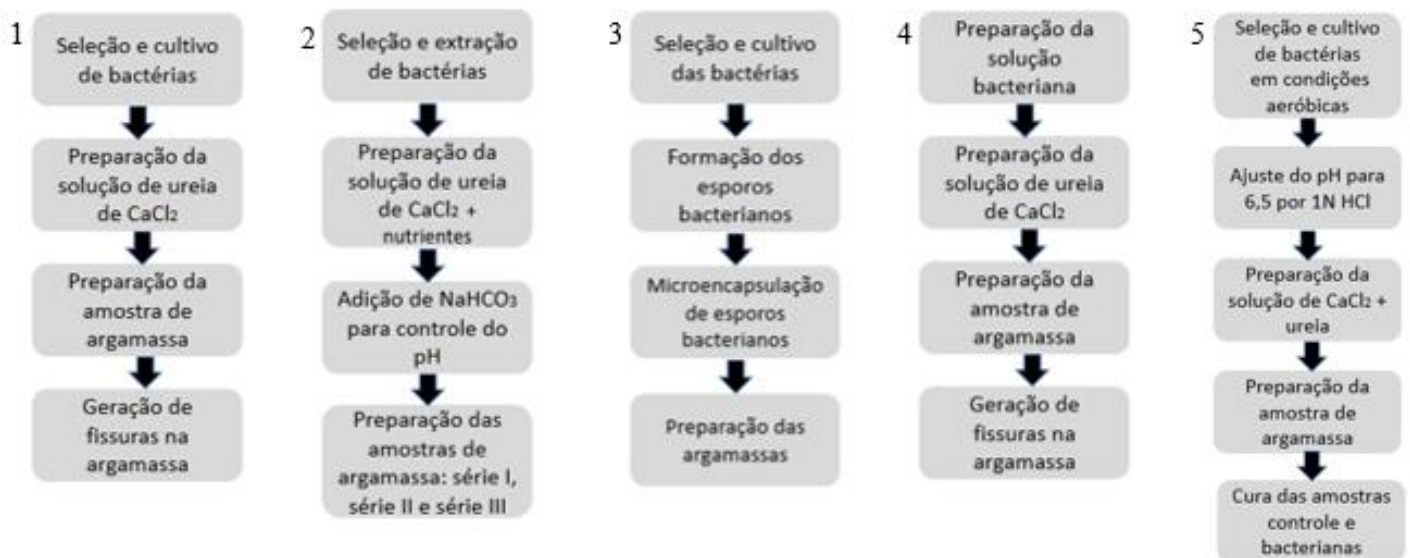
Fonte: Bergh *et al.* (2020).

Na maior parte dos trabalhos os corpos de prova de argamassas foram submetidos a processos de fabricação de fissuras, através de tensões geradas nos blocos. As amostras passavam pelo mecanismo de autoclavagem, visando esterilizar todo o meio que entraria em contato com o processo de biocimentação. Para a cura dessas fissuras induzidas, preparava-se uma solução bacteriana cultivada em um caldo de nutrientes, na 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 (CaCl_2) e ureia.

Chegando ao fim do tratamento MICP e, portanto, a regeneração das fissuras, testes físicos-mecânicos eram feitos para avaliar propriedades desses materiais, por exemplo, a resistência à compressão e a permeabilidade a água das amostras. Normalmente, as amostras eram divididas em mistura de controle, amostra trincada e amostra trincada tratada com MICP, para que assim, pudesse ser feito comparativos entre os resultados encontrados, buscando-se comprovar a eficácia do tratamento.

Os fluxogramas abaixo facilitam o processo de entendimento que foi realizado para a obtenção das argamassas. Cada um dos fluxogramas está numerado para a identificação do trabalho que está estabelecido na Tabela 3.

Figura 10 - Fluxogramas com as etapas executadas nos trabalhos.



(1) Kulkarni *et al.* (2020), (2) Jongvivatsakul *et al.*, (2019), (3) Intarasoontron *et al.* (2021), (4) Choi *et al.* (2017), (5) Nasser *et al.* (2022).

Fonte: Autor (2022).

Outra forma identificada nas bases de pesquisa foi a produção de argamassas autorregenerativas, denominado de reparo interno, conforme apresenta a pesquisa Nasser *et al.* (2022). Neste método 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.

As argamassas do método de reparo interno, na maior parte dos casos, são produzidas tendo como diferencial a mistura do cimento Portland, areia e água com os microrganismos durante o processo de moldagem e em alguns estudos de adição de materiais de reforço, como fibras. Após a cura das pastas cimentícias são induzidas as fissuras para dar início ao processo de autocicatrização.

Nessa perspectiva, como informação adicional, o estudo feito por Li *et al.* (2022) desenvolve uma forma parecida de obtenção da mistura da argamassa de reparo através de microcápsulas de ruptura eletromagnética, na qual, foram preparadas usando o método de dispersão por fusão com nanopartículas de Fe_3O_4 , com casca de cera de polietileno e resina epóxi como agente de reparo.

As microcápsulas apresentam vantagens de alta adaptabilidade ambiental e rápida velocidade de reparo. No entanto, nem sempre as microcápsulas rompem em razão da sua localização dentro da pasta cimentícia, por esse motivo os nanomateriais magnéticos foram incorporados ao material da casca para que assim fosse possível com que as microcápsulas consigam romper com uma maior facilidade e em qualquer posição devido o estímulo de um campo magnético.

Sendo assim, a proposta de Li *et al.* (2022) apesar de não fazer uso do método MICP traz uma informação importante quando introduz o campo magnético como solução para o rompimento das microcápsulas, uma vez que, o trabalho de Intarasontron *et al.* (2021) ao comparar os dois tipos de reparo mostrou que o reparo externo foi mais eficaz que o reparo interno, na qual, pode ser influência da ruptura das microcápsulas, mostrando que o reparo interno possui algumas dificuldades a serem contornadas.

O reparo interno, além de ter um custo mais elevado por fazer uso de tecnologias mais avançadas, em geral, seus resultados se apresentaram inferiores aos do reparo externo. Isso foi comprovado na pesquisa de Intarasontron *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.

Dessa forma, conclui-se que existem diversos modos de obtenção das argamassas de reparo usando o método da MICP e, outros métodos com diferentes abordagens. No entanto, os procedimentos propõem argamassas de reparo com melhorias físico-mecânicas constatadas. Além disso, foi possível perceber que os autores utilizaram diferentes bactérias e até

comparações entre elas para elaborar estudos mais completos a partir do progresso da linha de pesquisa.

Os estudos apresentados trouxeram pontos convergentes durante a execução de todo o processo de obtenção das argamassas, porém, sempre com detalhes inovadores e novas técnicas no cultivo aplicadas nas diferentes bactérias empregadas, assim como, nos valores de referência usados e nas misturas cimentícias.

4.2 Propriedades

As propriedades analisadas: resistência à compressão, permeabilidade à água, cicatrização de fissuras, passaram por testes físico-mecânicos, na qual, foi produzida, em corpos de prova, fissuras para que fosse possível colocar em ação o tratamento realizado pelo método da MICP. Dessa forma, as propriedades são apresentadas fazendo um comparativo entre amostras de controle e amostras tratadas por biocimentação.

4.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade indispensável da argamassa. Ela é a medida de resistência aos esforços compressivos podendo sofrer influências que afetam no seu desempenho, como por exemplo, a quantidade de água adicionada a sua mistura.

Essa propriedade foi analisada em 4 trabalhos sendo posteriormente compilada para avaliação e comparação de seus resultados encontrados. Dessa forma, com a verificação dos trabalhos foi detectado o aumento da resistência à compressão quando aplicado o método da MICP em relação as amostras de controle.

Os artigos analisados para a propriedade de resistência à compressão das argamassas foram retirados de plataformas distintas. Os valores de resistência encontrados em cada estudo foram analisados comparativamente, buscando tendências e divergências. A Tabela 2 a seguir mostra os valores de acordo com cada trabalho analisado para a resistência a compressão.

Tabela 2 - Valores para resistência a compressão com e sem MICP.

Nº	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO COM MICP (MPa)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SEM MICP (MPa)	PERCENTUAL	DIAS	AUTORES
1	25,5	19,8	28,78%	28	Abo-El-Enein <i>et al.</i> (2013)
2	24,7	17,3	42,77%	20	Jongvivatsakul <i>et al.</i> (2019)
3	52,1	44,5	17,07%	28	Bergh <i>et al.</i> (2020)
4	50	34	47,05%	28	Nasser <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 4 mostra os valores de referência para cada estudo avaliado fazendo um comparativo entre os valores de resistência à compressão com e sem o tratamento da MICP. Os resultados mostram que em determinados intervalos de tempo com a aplicação do procedimento realizado por microrganismos os valores de resistência à compressão tendem a aumentar, ou seja, apontam resultados positivos ao uso do método de biocimentação.

Os valores de resistência apresentados na Tabela 4, sem o tratamento da MICP, correspondem a amostras de controle com fissuras que foram induzidas. Com isso, notou-se um aumento de tensão nas fissuras e uma queda da resistência à compressão. Após o tratamento com as bactérias a resistência tendeu ao crescimento de seus valores, devido ao preenchimento das fissuras com o material regenerador.

De acordo com Nasser *et al.* (2022) é comparado em concentrações diferentes duas bactérias: *Bacillus pasteurii* e *Bacillus sphaericus*. Os testes de resistência são realizados para ambas, porém, a resistência descrita na Tabela 4 é para a *B. pasteurii* com concentração de 0,5%.

O valor de resistência com o tratamento feito com a bactéria *B. sphaericus* a 0,5% é de aproximadamente 55 MPa, ou seja, em relação à amostra controle apresenta-se um aumento na resistência após o período de 28 dias. Dessa forma, o artigo mostra que as diferentes bactérias

proporcionam às argamassas diferentes resultados, nesses casos, ocorreu o aumento da resistência à compressão.

Sendo assim, as soluções à base de bactérias aplicadas externamente melhoraram a resistência à compressão dos materiais cimentícios. Esta foi uma descoberta determinante, visto que, mostrou que as soluções bacterianas podem, de fato, não apenas selar, como também recuperar o material, ou seja, restabelecer suas propriedades mecânicas.

4.2.2 Permeabilidade a água

A propriedade em questão é indispensável quando se fala de argamassa e concreto, visto que, as misturas cimentícias sofrem à ação da água que adentram pelos poros do material endurecido. A permeabilidade à água pode afetar outras propriedades físicas, químicas e mecânicas das pastas cimentícias e, portanto, pode modificar resultados, como os de resistência à compressão.

No Quadro 5 são apresentados os artigos catalogados para avaliação desta propriedade, com o intuito de mostrar o quanto as amostras analisadas absorvem água em seu interior. Destaca-se que, com a utilização do método de precipitação de carbonato de cálcio a propriedade sofreu impactos com resultados favoráveis, visto que a permeabilidade a água diminuiu.

Quadros 3 - Trabalhos analisados para a propriedade de Permeabilidade a água.

Nº	ARTIGO	AUTORES
1	Healing of Generated Cracks in Cement Mortar Using MICP.	Kulkarni <i>et al.</i> (2020)
2	Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method.	Jongvivatsakul <i>et al.</i> (2019)
3	Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation Method.	Choi <i>et al.</i> (2017)
4	Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar.	Abo-El-Enein <i>et al.</i> (2013)

5	Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using <i>Bacillus pasteurii</i> and <i>Bacillus sphaericus</i> .	Nasser <i>et al.</i> (2022)
---	--	-----------------------------

Fonte: Autor (2022).

O trabalho de Kulkarni *et al.* (2020), testou algumas propriedades, e entre elas a permeabilidade foi analisada. As amostras de argamassa sofreram um desgaste para a geração das fissuras e, com isso, foram realizados os testes físico-mecânicos nos corpos de prova.

O estudo testou dezesseis amostras, visando encontrar a eficácia na reparação das rachaduras usando o tratamento MICP 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.

Foram apresentadas todas as respostas que as amostras apresentavam a cada oito rodadas. Na oitava rodada, as amostras fissuradas já apresentavam uma redução média de 60% na permeabilidade. Na 16^o rodada e na 24^o rodada foram reduzidos, 25% e 14%, respectivamente. Isso aponta que o percentual de cicatrização das trincas é mais rápido até a 8^a rodada, diminuindo após isso.

No entanto, a redução máxima na 24^o rodada em relação ao início, ficou na faixa de 73% a 85%, isso indica que não foi possível obter 100% de redução na permeabilidade, em vista da não cicatrização de todas as rachaduras.

Dessa forma, amostras com fissuras mais largas terão uma maior taxa de diminuição da permeabilidade em comparação com fissuras finas, devido uma maior quantidade de solução de MICP poder penetrar com facilidade através de rachaduras mais largas e serem depositados CaCO₃.

Nesse sentido, o estudo de Jongvivalsakul *et al.* (2019) mostra a permeabilidade medida em função da profundidade de penetração da água na amostra de argamassa. Fissuras foram abertas em amostras e mediu-se a profundidade, logo em seguida, usou o método MICP para o tratamento das fissuras e mediu novamente a quantidade de penetração da água da amostra. Os valores obtidos para penetração das 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, o artigo mostra que a estanqueidade da amostra de argamassa fissurada é melhorada em razão da formação de CaCO₃.

No trabalho de Choi *et al.* (2017), a permeabilidade à água das amostras reparadas foi testada usando o método de carga constante após as amostras terem sido submetidas a cada 7 ciclos de MICP e tratamento de água (ou seja, em 7, 14 e 21 ciclos).

A redução da permeabilidade, assim como no trabalho anterior, sofreu uma mudança rápida no primeiro ciclo (7° rodada). Nas rodadas seguintes os valores de permeabilidade continuaram caindo, ou seja, mais áreas de rachaduras foram cicatrizadas.

Na 21° rodada de tratamento MICP, a capacidade de permeabilidade dessas amostras reduziu para 3 ordens inferior à permeabilidade dessas amostras antes da reparação MICP, início do tratamento.

Choi *et al.* (2017) ainda apresenta um tratamento feito por água, na qual, ocorre a hidratação do cimento. O tratamento mostra que as amostras de argamassa tiveram uma pequena cicatrização autógena de fissuras sob a água, sendo mais efetivo para amostras com pequenas fissuras.

A pesquisa realizada por Abo – El – Enein *et al.* (2013), apresenta informações adicionais que agregam a esta propriedade ao analisar a absorção de água em fissuras. As amostras com células bacterianas apresentaram uma menor absorção em relação a amostra controle, esse resultado é atribuído a biomassa bacteriana e ao processo de biocimentação.

Por fim, no estudo de Nasser *et al.* (2022), também foi comprovado que, com o tratamento bacteriano nas amostras fissuradas a taxa de absorção de água diminuiu em relação às amostras controle. Concluiu-se, então, que a MICP preencheu os poros da argamassa com calcita e, portanto, a absorção de água foi diminuindo.

A Tabela 3 apresenta os valores de permeabilidade à água e absorção de água de amostras de duas espécies de bactérias em relação a amostra de controle.

Tabela 3 - Valores de permeabilidade do volume de vazios e taxa de absorção de água das amostras.

	AMOSTRA CONTROLE	AMOSTRA B. PASTEURII	AMOSTRA B. SPHAERICUS
(a)	14%	10,5%	8,6%
(b)	$1,43 \cdot 10^{-7} \text{m/s}^{1/2}$	$0,24 \cdot 10^{-7} \text{m/s}^{1/2}$	$0,4 \cdot 10^{-7} \text{m/s}^{1/2}$

(a) permeabilidade do volume de vazios (a) e a taxa de absorção de água (b).

Fonte: Autor (2022).

Nasser *et al.* (2022) destaca a comparação de resultados entre duas bactérias distintas nas mesmas condições em relação a amostra controle. Dessa forma, a comparação com bactérias diferentes amplia o método da MICP facilitando o desenvolvimento de novas formas de aplicação e promovendo a exploração da gama de opções de materiais bioativos.

De acordo, com a Tabela 6 pode ser visto que o volume de vazios diminui após o processo de biocimentação e conseqüentemente a taxa de absorção de água tende a cair, assim, aumentando as propriedades físico-mecânicas do compósito.

Os estudos mostraram que as amostras bacterianas apresentaram resultados eficazes em relação a penetração da água, uma vez que, pelo método da MICP foi possível diminuir a quantidade de água absorvidas nas amostras.

4.2.3 Cicatrização das fissuras

A fissuração do concreto é uma das manifestações patológicas mais comuns na construção civil. As fissuras podem ocorrer em diversos elementos estruturais, tais como: vigas, pilares, lajes, entre outros.

Essas manifestações patológicas podem surgir devido à ocorrência de tensões de tração acima da capacidade de resistência do concreto. Dessa forma, é necessária a busca por alternativas de remediação dessas manifestações, de maneira eficiente e economicamente viável.

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.

O Quadro 7 mostra estudos que fizeram o processo de cura de fissuras através do método de precipitação de calcita induzida. As fissuras foram feitas em corpos de prova, na qual, foi avaliado a eficácia da regeneração das mesmas através da ação bacteriana.

Quadros 4 - Trabalhos analisados para a propriedade de Cicatrização de Fissuras.

Nº	ARTIGO	AUTORES
1	Healing of Generated Cracks in Cement Mortar Using MICP.	Kulkarni <i>et al.</i> (2020)
2	Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method.	Jongvivatsakul <i>et al.</i> (2019)
3	Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method.	Choi <i>et al.</i> (2017)
4	Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing.	Intarasontron <i>et al.</i> (2021)
5	The adaptability of <i>Sporosarcina pasteurii</i> in marine environments and the feasibility of its application in mortar crack repair.	Fu <i>et al.</i> (2022)
6	Microbially-Induced-Calcite-Precipitation (MICP): A biotechnological approach to enhance the durability of concrete using <i>Bacillus pasteurii</i> and <i>Bacillus sphaericus</i> .	Nasser <i>et al.</i> (2022)
7	Preliminary approach to bio-based surface healing of structural repair cement mortars.	Bergh <i>et al.</i> (2020)
8	Crack sealing evaluation of self-healing mortar with <i>Sporosarcina pasteurii</i> : Influence of bacterial concentration and air-entraining agent.	Chen <i>et al.</i> (2021)
9	The Application of <i>Lysinibacillus sphaericus</i> for Surface Treatment and Crack Healing in Mortar.	Farrugia <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autor (2022).

No trabalho de Kulkarni *et al.* (2020), com o tratamento MICP, as fissuras artificiais foram gradualmente curadas ao longo do número de rodadas do

procedimento. A cicatrização varia com a porcentagem de precipitação de CaCO_3 . Na Figura 11 é possível observar a recuperação das fissuras ao longo do tempo. Além disso, é destacado que não acontece a recuperação total das fissuras internas, apesar da precipitação de uma quantidade suficiente de CaCO_3 .

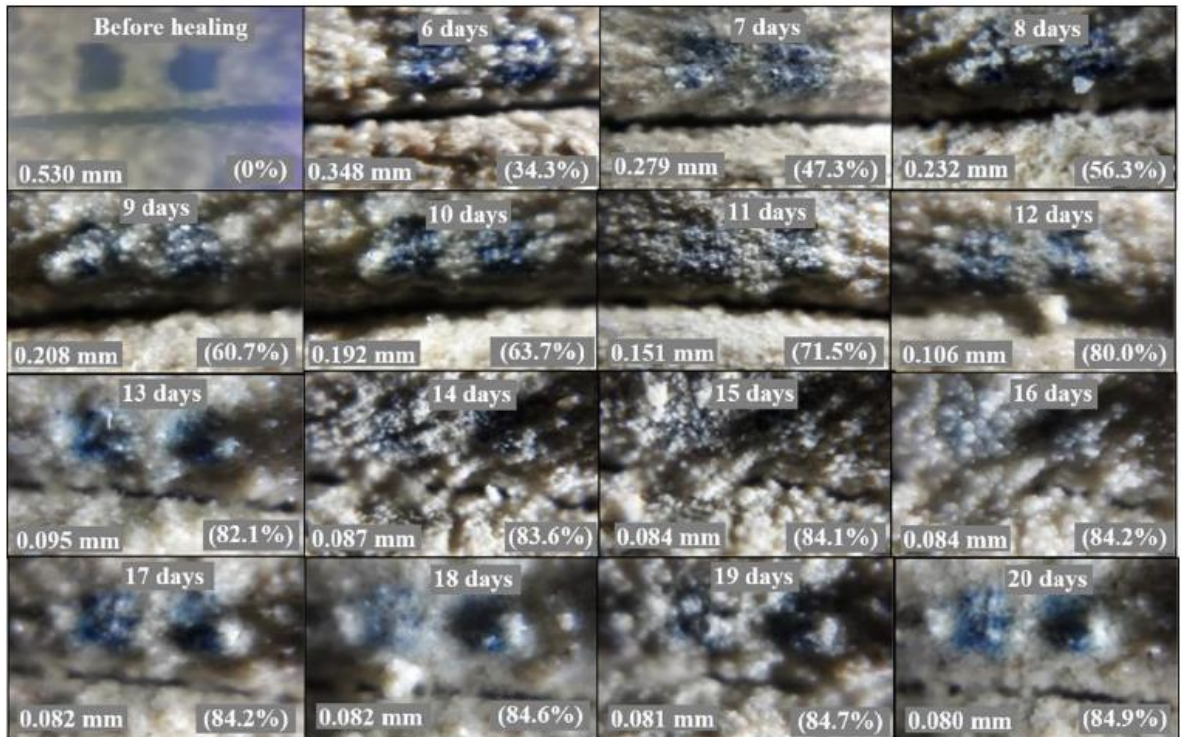
Figura 11 - Reparos de trincas em diferentes rodadas de tratamentos MICP. (a) Na 8ª rodada; (b) Na 16ª rodada; (c) Na 24ª rodada.



Fonte: Kulkarni *et al.* (2020).

Para reafirmar que o tratamento MICP funciona na remediação de fissuras, o trabalho de Jongvivatsakul *et al.* (2019), mostra através de um software de processamento de imagem a regeneração das rachaduras e são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Remediação de fissura de argamassa.

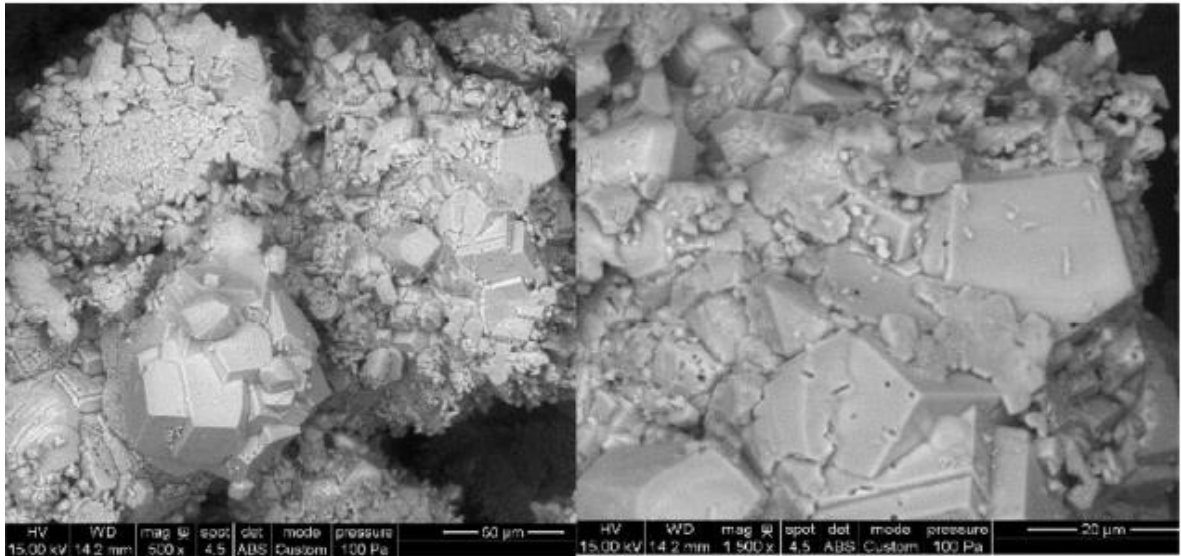


Fonte: Jongvivatsakul *et al.* (2019).

A remediação só foi notória a partir do 6º dia, visto que, primeiro aconteceu a absorção do agente de cura pelos poros do cimento, ou seja, só pôde ser observado quando a estrutura do poro foi preenchida com CaCO_3 precipitado. Além disso, a imagem apresenta que no 14º dia é atingido uma cura de 84% e, que a partir de então, é quase insignificante o aumento da regeneração da fissura, chegando ao 20º dia com apenas 85% de cura.

Assim como foi dito no trabalho de Kulkarni *et al.* (2020) que as superfícies internas das rachaduras não estavam em 100% cobertas com CaCO_3 precipitado, no estudo de Choi *et al.* (2017) foi apontado a mesma afirmativa. Segundo Choi *et al.* (2017), a tecnologia MICP cicatrizou as amostras gradualmente com um número crescente de ciclos de tratamentos. Na Figura 13 é possível observar o CaCO_3 em forma de hexágono na superfície de uma fissura.

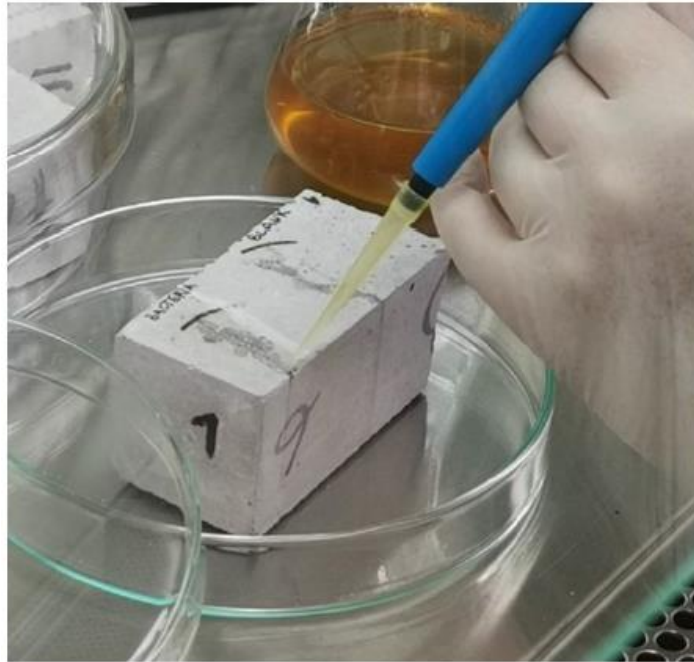
Figura 13 - CaCO_3 grosseiro em forma de hexágono observado na superfície da amostra.



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

Na pesquisa desenvolvida por Bergh *et al.* (2020), são apresentados os testes realizados para cicatrização de fissuras induzidas em amostras de argamassas, na qual, cada amostra apresenta duas fissuras. Na primeira fissura é colocado uma injeção de solução bacteriana e a segunda coloca-se água destilada estéril. Isso foi feito para comparar visualmente as diferenças na precipitação de carbonato sem cultura bacteriana na amostra. A Figura 14 mostra este procedimento.

Figura 14 - Amostra de argamassa no processo de reparação de fissura.

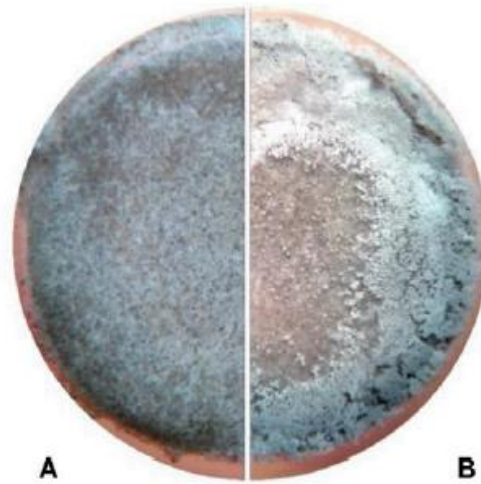


Fonte: Bergh *et al.* (2020).

Os resultados mostraram que a cicatrização bacteriana reduziu a espessura da fissura entre 20% e 40%. No entanto, as fissuras que foram tratadas com água não mostraram redução observável das larguras. Isso constata que a cicatrização autógena ocorreu em algumas das fissuras, mas não é sistemática.

Assim como, nas demais análises feitas pelo método de reparo externo descritas na Figura 15 a investigação de Farrugia *et al.* (2019) também comprovou a cicatrização de fissuras através da biocimentação. O estudo, bem como os outros, relatou que ciclos repetidos de tratamento são eficazes em aumentar a quantidade de deposição de CaCO_3 . Na Figura 15 nota-se a comparação entre uma amostra de controle tratada apenas com CaCl_2 (A) e uma amostra tratada com a bactéria e CaCl_2 (B).

Figura 15 - Amostra controle tratada com CaCl_2 (A) e uma amostra tratada com *Lysinibacillus sphaericus* e CaCl_2 (B).

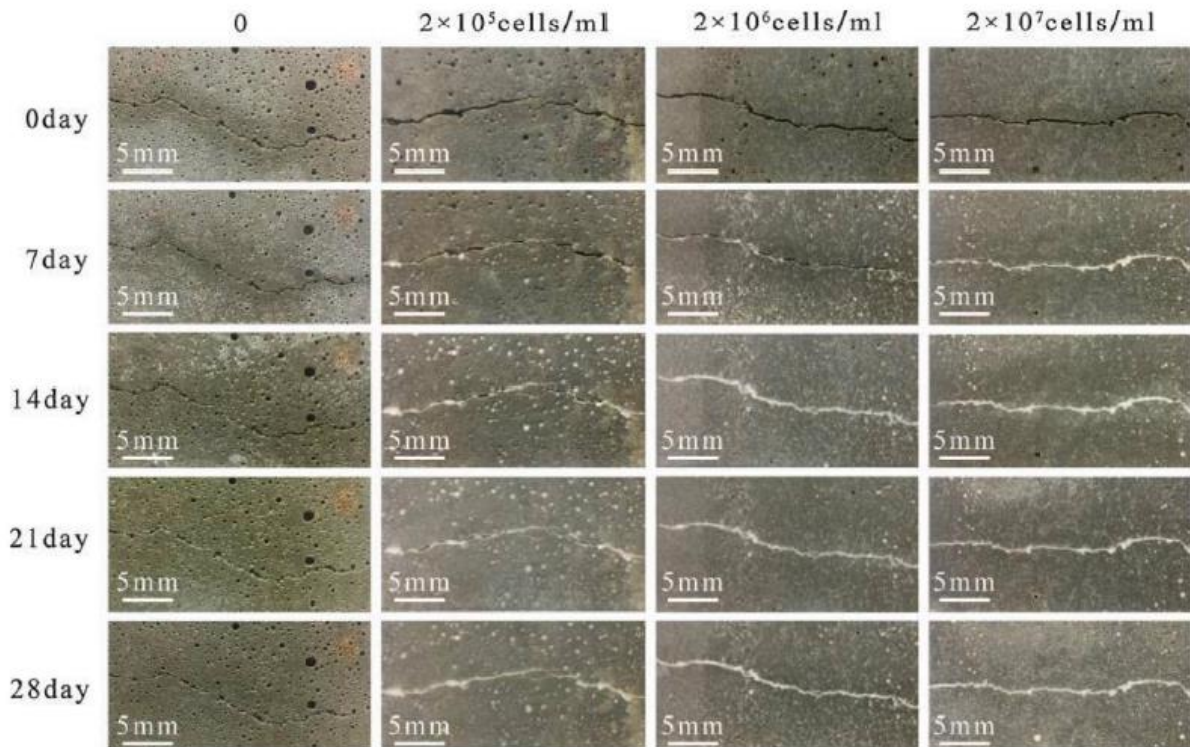


Fonte: Farrugia *et al.* (2019).

Segundo a investigação de Intarasontron *et al.* (2021), o tratamento MICP ajuda a curar argamassas fissuradas e recuperar propriedades de resistência relevantes. Foi feito um comparativo, em relação ao desempenho, de células vegetativas bacterianas MICP e esporos bacterianos microencapsulados. Os dois métodos foram eficazes na recuperação das fissuras, porém, a atividade ureolítica e a formação de carbonato de cálcio das células vegetativas são maiores que os esporos, pois uma célula vegetativa são uma forma ativa e normal de crescimento e funcionamento de bactérias, enquanto um esporo é inativo e não cresce.

No estudo desenvolvido por Chen *et al.* (2021), foi utilizado ar incorporado para produzir uma argamassa autorregenerativa. A argamassa com “fissuras simuladas” foi recuperada de maneira eficaz, na qual, foi visto que o uso de ar incorporado exerceu uma influência significativa na velocidade de selagem das fissuras. Durante 28 dias de incubação, as vigotas de argamassa foram todas curadas com solução bacteriana e foram observadas precipitações na cor branca preenchendo as fendas. A Figura 16 mostra o resultado.

Figura 16 - Cicatrização de fissuras em amostras de argamassa microbiana com diferentes teores de incorporadores de ar.



Fonte: Chen *et al.* (2021).

De forma similar, Nasser *et al.* (2022) produziu uma argamassa autorregenerativa que através da precipitação de carbonato de cálcio, recupera o desempenho mecânico da argamassa ao seu estado original. No entanto, seu trabalho não apresentou o uso de um mecanismo de proteção para os microrganismos como os demais trabalhos sobre o método de reparo interno. Ainda assim, apresentou resultados favoráveis em relação as propriedades físico-mecânicas e, a cicatrização de fissuras foi eficiente.

Complementando esta discussão, no trabalho de Fu *et al.* (2022), é desenvolvido uma argamassa autocicatrizante testada, principalmente, em água salgada, com o objetivo de explorar a adaptabilidade de *S. pasteurii* em ambiente marinho e a viabilidade de sua biomineralização para reparo de fissuras em argamassas. O trabalho conclui que tanto a água doce como a água do mar podem induzir a precipitação de carbonato de cálcio, porém, na água doce acontece uma maior regeneração das fissuras.

Por fim, vale salientar que todos os estudos aqui 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, recuperando as

fissuras, na maioria dos casos, em grandes proporções e fazendo com que as condições físico-mecânicas fossem melhoradas.

4.3 Dificuldades encontradas e perspectivas futuras

A MICP é um processo mais complexo e mais lento que os métodos químicos, visto que a atividade microbiana depende de muitos fatores ambientais, incluindo temperatura, pH, concentrações de doadores e aceptadores de elétrons, concentrações e taxas de difusão de nutrientes e metabólitos (DHAMI *et al.*, 2013).

A biocimentação promovida pela MICP, também demonstra desafios a serem superados, dado que, o processo MICP comumente carece de grandes quantidades de cloreto de cálcio como fonte de cálcio, que é caro e desfavorável ambientalmente. No entanto, esforços têm sido feitos para desenvolver fontes alternativas de cálcio, por exemplo, uma precipitação de calcita induzida por plantas (PICP) que utiliza feijão-de-porco reativo à urease e hidróxido de cálcio e/ou nitrato de cálcio para cimentação da areia (CHOI *et al.*, 2017).

O campo da biomineralização tem potencial em vários setores, porém, é necessário somar esforços, envolvendo especialistas de diversas áreas, para abordar as principais questões de pesquisa e desenvolvimento necessárias para aplicações em escala comercial (DHAMI *et al.*, 2013).

Segundo Jonkers *et al.* (2010), outro fator importante é a escolha do microrganismo a ser utilizado no processo de biomineralização, visto que a bactéria deve ser resistente a ambientes alcalinos (alcalinofílicos) como o concreto, possuindo capacidade de formar esporos e assim ser capaz de sobreviver às condições ambientais adversas. Além disso, não pertencer ao grupo de microrganismos patogênicos que causem riscos à saúde das pessoas e do meio ambiente.

Avulta-se que a bactéria tem vida útil curta quando embutida no concreto/argamassa. Isso indica que a eficácia a longo prazo do mecanismo de autocicatrização ainda deve ser investigada com maior aprofundamento (WANG *et al.*, 2017). Muynck *et al.* (2010) também alertam para outro aspecto importante, que é a otimização da quantidade necessária de ureia para evitar excesso na emissão de amônio, uma vez que, produção de íons amônio através da atividade ureolítica resulta na emissão de óxidos de nitrogênio na atmosfera.

De modo geral, é possível observar que biocimentação pelo método MICP ainda é incipiente, necessitando de estudos mais aprofundados, considerando o maior número de fatores e variáveis interferentes no processo de produção e de aplicação, principalmente, das argamassas de reparo. Contudo, as pesquisas já realizadas apresentam resultados significativos,

apontando grandes chances de se obter materiais sustentáveis capazes de substituir parcialmente os cimentos convencionais.

5 CONCLUSÃO

O método de desenvolvimento deste trabalho, revisão bibliográfica, mostrou pontos fundamentais para o entendimento das técnicas de obtenção e propriedades das argamassas modificadas pelo tratamento bacteriano. Com isso, foi possível se observar as diferentes composições das argamassas reparo e as principais propriedades avaliadas com seus resultados e características melhoradas na aplicação do método MICP.

Na composição das argamassas foi utilizado pelos autores diversas cepas bacterianas. Além disso, a utilização dos nutrientes mostrou-se parecida na maioria das pesquisas com pequenas diferenças nas substâncias empregadas. Na produção das argamassas o cimento foi o mesmo usado por todos os trabalhos, com traços distintos. Também se observa uma semelhança no método de preparo da própria argamassa.

Em relação as propriedades destacadas, a resistência à compressão comparou os resultados obtidos de amostras de controle com os obtidos de amostras fissuradas que foram recuperadas pelo tratamento MICP. Essas análises mostraram que a resistência à compressão após a aplicação da técnica bacteriana aumentou em valores significativos.

Os autores que analisaram a permeabilidade à água descreveram que os resultados com o tratamento de biocimentação nas fissuras das amostras diminuíram a penetração da água com a precipitação do carbonato de cálcio, fazendo assim, um trabalho de vedação nos corpos de prova devido ao preenchimento das fissuras.

A última propriedade avaliada, cicatrização de fissuras, retratou com clareza a evolução da ação do agente reparador através do fechamento das rachaduras. Torna-se perceptível a cura das amostras quando os poros já estão completamente preenchidos por CaCO_3 e assim começa a regeneração da fissura. Os trabalhos apresentaram porcentagens de diminuição das espessuras das fissuras elevadas nos dois métodos de reparo estudados.

Por isso, as propriedades mecânicas são de suma importância durante a vida útil de edificações e mostra-se uma grande necessidade de se remediar os problemas que afetam a durabilidade dessas estruturas. Dessa maneira, o uso de medidas sustentáveis e alternativas no emprego das resoluções desses problemas é algo primordial.

Por fim, conclui-se que esse método se mostra promissor e deve ser investigado com maior profundidade, a fim de obter-se um material comercialmente acessível, para que a inovação tenha espaço e solucione problemas comumente vistos e de uma maneira menos agressiva ao meio ambiente, promovendo a redução do impacto negativo do setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABO-EL-ENEIN S. A., ALI A. H., FATMA N., TALKHAN H. A., ABDEL-GAWWAD
Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of
cement mortar. *HBRC Journal* 9:36-40, 2013.
- ABO-EL-ENEIN, 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.hbrcj.2013.02.001>
- ABO-EL-ENEIN, 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.hbrcj.2012.10.004>
- ACHAL V., PAN X., ZHANG D. Bioremediation of Strontium (Sr) contaminated aquifer
quartz sand based on carbonate precipitation induced by Sr resistant *Halomonas* sp.
Chemosphere 89:764-768, 2012.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; KUMARI, D.; ZHANG, Q. Biomineralization for
sustainable construction – A review os processes and applications. *Earth-Science Reviews*, v.
148, p. 1- 17, 2015.
- AL-THAWADI S. M., High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating
locally isolated ureolytic bacteria. Dissertation, Murdoch University, 2008.
- ANBU, P.; KANG, C. H.; SHIN, Y. J.; SO, J. S. Formations of calcium carbonate minerals
by bacteria and its multiple applications. Springerplus, v. 5, p. 250, 2016.
- ARNOLD, D. Concreto auto-regenerativo. *Tecnologia Emergente*, 39-43. 2011.
- BAUER, E. (Ed.). Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. Brasília:
IEM-Unb/Sinduscon-dF, 2005.
- 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>
- BIOLCHINI, J.; MIAN, P. G.; CANDIDA, A.; NATALI, C. Systematic Review in Software
Engineering. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.
- BUCHANAN, R. E.; GIBBONS, N. E. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*:
Williams & Wilkins, Baltimore, Maryland, 1974, v.8. CaCO₃." *Soil Biol. Biochem.*, v. 31, n.
11, p. 1563-1571, 1999.

- CHEN, B., DU, L., YUAN, J., SUN, X., PATHIRAGE, M., SUN, W., & FENG, J. (2022). A 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. 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*, v. 5, n. 6, p. 5183–5190, 5 jun. 2017.
- CHOI, S. G., WANG, K., WEN, Z., & CHU, J. (2017). Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method. *Cement and Concrete Composites*, 83, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.013>
- 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 VOS, P.; GARRITY, G.; JONES, D.; KRIEG, N. R.; LUDWIG, W.; RAINEY, F. A.; SCHLEIFER, K.-H.; WHITMAN, W. B. *Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 3: The Firmicutes*: Springer Science & Business Media, 2011, v.3.
- DEJONG, J. T.; FRITZGES, M. B.; NÜSSLEIN, K. Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 11, p. 1381-1392, 2006.
- DEJONG, J. T.; MORTENSEN, B. M.; MARTINEZ, B. C.; NELSON, D. C. Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 197-210, 2010.
- DEJONG, JT et al. “Upscaling de biomediate melhoria do solo.” *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egipto, 2009.
- DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MUKHERJEE, A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Front. Microbiol*, v.4, a.314, p.01-13. 2013.
- DHAMI, N. K.; REDDY, S. M.; MUKHERJEE, A. Biofilm and microbial applications in biomineralized concrete. In: (Ed.). *Advanced topics in Biomineralization*: InTech, 2012.
- 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>
- FERRIS, F.G. et al. Bacteriogenic mineral plugging. *Can J Petrol Technol*, v. 35, p. 56-61, 1996.

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, Gregório Rigo. Estudo de biocimentação em solo arenoso. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

GIBSON, T. An Investigation of the *Bacillus pasteurii* Group: III. Systematic Relationships of the Group. *Journal of Bacteriology*, v. 29, n. 5, p. 491- 502, 1935.

HAMED KHODADADI, T.; KAVAZANJIAN, E.; VAN PAASSEN, L.; DEJONG, J. Bio-Grout Materials: A Review. In: *Grouting 2017*, 2017, p.1- 12.

HAMMES, F. E.; VERSTRAETE, W. Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology*, v.1, p. 3-7, 2002.

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. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 7, n. 2, p. 139-153, 2008.

IVANOV, V.; CHU, J.; STABNIKOV, V. Basics of construction microbial biotechnology. In: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*, 2015, p. 21-56.

IVANOV, V.; STABNIKOV, V. Basic concepts on biopolymers and biotechnological admixtures for eco-efficient construction materials. In: *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*, 2016, p. 13-35.

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>

KAWASAKI, K. H. A. Electro-Biogrouting and Its Challenges. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 7, p. 1196-1204, 2012.

KEYKHA, H. A.; ASADI, A.; ZAREIAN, M. Environmental factors affecting the compressive strength of microbologically induced calcite precipitation treated soil. *Geomicrobiology Journal*, v. 34, n. 10, p. 889-894, 2017.

KHALEGHI, M.; ROWSHANZAMIR, M. A. Biologic improvement of a Sandy soil using single and mixed cultures: A comparison study. *Soil and Tillage Research*, v. 186, p. 112-119, 2019.

KRAJEWSKA, B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. *Journal of Advanced Research*, v. 13, p. 59-67, 2018.

KROLL, R. G. *Microbiology of extreme environments*, McGraw- Hill, New York, 1990.

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/cej-2020-03091500>

LEE, Y. N. Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *Journal of Microbiology*,

LE-METAYER-LEVREL G., CASTANIER S., ORIAL G., LOUBIÈRE J. F., PERTHUISOT J. P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sediment Geol*, 1999. 126:25-34.

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>

MAHAWISH, A.; BOUAZZA, A.; GATES, W. P. Improvement of Soft Soils Using Bio-Cemented Sand Columns. In: Wu W., Yu HS. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 2018, p. 822-825.

MONTOYA, B. M. 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.

MORENO, Ariane Maria Rizzoli, 1993-M843p2020 Produção de urease por *Sporosarcina pasteurii* ATCC 11859 em resposta a condições de crescimento e seu potencial para estabilização de solos / Ariane Maria Rizzoli Moreno. – Viçosa, MG, 2020.

MOUNTASSIR, G. El.; MINTO, J. M.; VAN PAASSEN, L. A.; SALIFU, E.; LUNN, R. J. Applications of Microbial Processes in Geotechnical Engineering. *Advances in Applied Microbiology*, v. 104, p. 39-91, 2018.

MUJAH, D.; SHAHIN, M. A.; CHENG, L. 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, 2016a.

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. Microbially Induced Carbonate Precipitation Via Ureolysis Process: A Mini-Review. *Transactions on Science and Technology*, v.5, n. 4, p. 245-256, 2018.

PENG Y. L., ZHAO H. Z., YANG Q. Z., ZONG Z. Progress in microbial and enzyme immobilization of carbon dioxide. *Cheme Bioeng* 27:10–13, 2010.

PHILLIPS A. J., LAUNCHNOR E., ELDRING J., ESPOSITO R., MITCHELL A. C. Potential CO₂ leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation. *Environ Sci Tech* 47:142–149, 2012.

RAJASEKAR, A.; K.S. MOY, C.; WILKINSON, S. MICP and Advances towards Eco-Friendly and Economical Applications, v.78, p. 012016, 2017.

REIS, L.; RODRIGUES, A.; SOARES, R.; ARAÚJO, R.; VIEIRA, J. Bioprecipitação de carbonato de cálcio por bactérias ureolíticas e suas aplicações, v.14, p. 860-881, 2017.
S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, S.S. Bang, Remediation of concrete using micro-organisms, *ACI Mater. J.* 98 (2001) 3–9.

SAMPAIO, R.; MANCINI, M. Estudos De Revisão Sistemática: Um Guia Para Síntese Criteriosa Da Evidência Científica. *Revista brasileira fisioterapia*, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

STOCKS-FISHER, S.; GALINAT, J. K.; BANG, S. S. “Microbiological precipitation of Torgal FP, Labrincha JA, Diamanti MV, Yu CP, Lee HK. 2015. *Biotechnologies and biomimetics for civil engineering*. Springer.v. 41, n. 4, p. 345-348, 2003.

V. ACHAL, A. MUKERJEE, M.S. REDDY, Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 1–5.

VAN DER 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>

WANG, Z.; ZHANG, N.; CAI, G.; JIN, Y.; DING, N.; SHEN, D. Review os ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP). *Marine Georesources & Geotechnology*, v. 35, n. 8, p. 1135-1146, 2017.

WHIFFIN, V. S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement. Tese de Doutorado - Murdoch University, Perth, Australia, 2004.