UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES
PROGRAMA INTEGRADO EM BIOTECNOLOGIA

DEORLAN DOS SANTOS BARBOSA

DIRETRIZES DO USO DE BACTÉRIAS PARA BIOMINERALIZAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO

Mogi das Cruzes, SP
2024

DEORLAN DOS SANTOS BARBOSA

DIRETRIZES DO USO DE BACTÉRIAS PARA BIOMINERALIZAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO

Dissertação apresenta ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Mogi das Cruzes para obtenção do título de Mestre na Área de Biotecnologia, orientado pela Dra. Tatiane Faustino de Moraes.

Mogi das Cruzes, SP

2024

Ficha catalográfica
Universidade de Mogi das Cruzes - Biblioteca Central

Barbosa, Deorlan dos Santos
B238d Diretrizes do uso de bactérias para biomineralização de fissuras no concreto / Deorlan dos Santos Barbosa. -- Mogi das Cruzes, SP: Universidade de Mogi das Cruzes, 2024.
68 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) -- Universidade de Mogi das Cruzes, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Tatiane Faustino de Moraes.

1. Biomineralização 2. Bactérias/metabolismo 3. Concreto 4. Bactérias Gram-Positivas I. Moraes, Tatiane Faustino de II. Universidade de Mogi das Cruzes III. Título

CDD 620.136

Elaborada por Maria Cristina Alves Silva Xavier – CRB-8/10077

ATAS

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM BIOTECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES

Às quinze horas do dia nove de agosto de dois mil e vinte e quatro, pela Universidade de Mogi das Cruzes, realizou-se a defesa de dissertação intitulada: "DIRETRIZES DO USO DE BACTÉRIAS PARA BIOMINERALIZAÇÃO DE FISSURAS NO CONCRETO", para obtenção do grau de mestre pelo(a) candidato(a) **Deorlan dos Santos Barbosa**. Tendo sido o número de créditos alcançados pelo(a) mesmo(a) no total de 48 (quarenta e oito), a saber: 24 unidades de crédito em disciplinas de pós-graduação e 24 unidades de crédito no preparo da dissertação, o(a) aluno(a) perfaz assim os requisitos para obtenção do grau de mestre. A comissão examinadora estava constituída dos senhores professores doutores: Tatiane Faustino de Moraes, e Wagner Alves de Souza Judice da Universidade de Mogi das Cruzes, e André Luiz Gonçalves Scabbia, do Instituto de Pesquisa e Tecnologias. Sob a presidência da primeira, como orientadora da dissertação. A sessão pública da defesa da dissertação foi aberta pela senhora presidenta da comissão que apresentou o(a) candidato(a). Em seguida o(a) candidato(a) realizou uma apresentação oral da dissertação. Ao final da apresentação da dissertação, seguiram-se as arguições pelos membros da comissão examinadora. A seguir a comissão, em sessão secreta, conforme julgamento discriminado por cada membro, considerou o(a) candidato(a)

Aprovado por Unanimidade
(aprovado(a) /reprovado(a)) (unanimidade/maioria)

Mogi das Cruzes, 09 de agosto de 2024.

Comissão Examinadora	Julgamento
ANDRE LUIZ GONCALVES SCABBIA:10547810873 Assinado de forma digital por ANDRE LUIZ GONCALVES SCABBIA:10547810873 Dados: 2024.08.09 16:42:01 -03'00' Prof. Dr. André Luiz Gonçalves Scabbia	Aprovado aprovado(a) / reprovado(a)
gov.br Documento assinado digitalmente WAGNER ALVES DE SOUZA JUDICE Data: 09/08/2024 17:44:13-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br Prof. Dr. Wagner Alves de Souza Judice	Aprovado aprovado(a) / reprovado(a)
Moraes Profª Drª Tatiane Faustino de Moraes	Aprovado aprovado(a) / reprovado(a)

RESUMO

A biomineralização é o processo pelo qual os organismos formam minerais a partir de uma atividade celular, dependendo de condições físico-químicas necessárias e ideais para que o processo ocorra. Um dos processos de biomineralização mais comuns é a biodeposição. A biodeposição utiliza microrganismos capazes de precipitar carbonato de cálcio, calcificando a superfície onde esses microrganismos são depositados e criando uma camada protetora. Este estudo partiu de um levantamento bibliográfico que forneceu a base de dados para a aplicação de ferramentas de tomada de decisão para o desenvolvimento de um produto biotecnológico a base de biomineralização. No capítulo 1, o artigo aborda uma aplicação comum do processo de biomineralização utilizando microorganismos no contexto do bioconcreto, relatando, com base em dados da literatura, as vantagens dessa tecnologia e o funcionamento do processo de carbonatação mediado por bactérias gram-positivas capazes de regenerar fissuras em estruturas de concreto. No segundo é apresentado uma análise detalhada para a seleção dos potenciais espécies bactérias que realizam o processo de biomineralização. Com o apoio da literatura e pela ferramenta para tomada de decisão (Ishikawa) foi possível revelar sugestões de espécies e associá-las ao processo microbiano. Este processo envolve o uso de microorganismos capazes de regenerar fissuras em estruturas de concreto através da produção natural de $CaCO_3$, considerando uma alternativa sustentável e promissora ao combate de fissuras em concreto. Com base nesse entendimento, surge a hipótese de desenvolver bioprodutos que possam reduzir o uso excessivo de materiais industriais.

Palavras-chave: biomineralização; bioconcreto; fissuras; bactérias.

ABSTRACT

Biomineralization is the process by which organisms form minerals through cellular activity, depending on the necessary and ideal physicochemical conditions for the process to occur. One of the most common biomineralization processes is biodeposition. Biodeposition utilizes microorganisms capable of precipitating calcium carbonate, calcifying the surface where these microorganisms are deposited and creating a protective layer. This study was based on a bibliographic survey that provided the database for the application of decision-making tools for the development of a biotechnological product based on biomineralization. In chapter 1, the article discusses a common application of the biomineralization process using microorganisms in the context of bioconcrete, reporting, based on literature data, the advantages of this technology and the functioning of the carbonation process mediated by gram-positive bacteria capable of regenerating cracks in concrete structures. The second chapter presents a detailed analysis for selecting potential bacterial species involved in the biomineralization process. With the support of the literature and the decision-making tool (Ishikawa), it was possible to identify and associate species with the microbial process. This process involves the use of microorganisms capable of regenerating cracks in concrete structures through the natural production of $CaCO_3$, offering a sustainable and promising alternative for combating concrete fissures. Based on this understanding, the hypothesis emerges that bioproducts could be developed to reduce the excessive use of industrial materials.

Keywords: biomineralization; bioconcrete; cracks, bacteria.

SUMÁRIO

1 Introdução 6

2 Objetivos 7

2.1 Objetivo Geral 7

2.2 Objetivos Específicos 7

3 Escopo 8

4 Capítulos 9

4.1.1 Capítulo 1 9

Bioconcreto: uma revisão da sua aplicação no fechamento de fissuras. 9

4.1.2 Capítulo 2 25

Diretrizes do uso de bactérias para biomineralização de fissuras no concreto. 25

5 Considerações finais 68

Referências 69

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção é uma das mais antigas e importantes criações da civilização, desempenhando um papel crucial na economia brasileira e contribuindo significativamente para o PIB. Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto, uma mistura de cimento, água, areia e brita que, ao se hidratar, forma uma pasta fluida que pode ser moldada em qualquer formato e que ganha resistência mecânica à compressão durante o processo de cura.

No entanto, o concreto pode desenvolver fissuras sob tração, comprometendo sua durabilidade ao permitir a entrada de substâncias corrosivas (MÂNICA, 2019). A indústria cimentícia também é responsável por 7% das emissões globais de dióxido de carbono, destacando a necessidade de soluções sustentáveis. O bioconcreto, que utiliza bactérias para regenerar o material, surge como uma solução promissora. Essas bactérias produzem carbonato de cálcio ($CaCO_3$) através de reações metabólicas, preenchendo fissuras e prolongando a vida útil do concreto por meio do processo de biomineralização (KOGA, 2020). Além de ser ambientalmente sustentável, essa tecnologia é econômica, reduzindo os custos de manutenção e reparos e aumentando a durabilidade das estruturas.

A biomineralização é o processo pelo qual os organismos formam minerais a partir de uma atividade celular, dependendo de condições físico-químicas necessárias e ideais para que o processo ocorra. Esse processo é dividido em dois tipos: a mineralização biologicamente induzida, onde os organismos são depositados acidentalmente e interagem com o meio e suas condições ambientais, resultando em um processo metabólico; e a mineralização biologicamente controlada, na qual o organismo controla a atividade celular, sintetizando minerais de forma característica, de acordo com sua espécie, independentemente das condições ambientais (ALMEIDA, 2018).

As aplicações da biomineralização no aumento da durabilidade de materiais de construção podem ser divididas em dois processos principais: a biodeposição e a biocimentação. A biodeposição envolve a deposição de uma camada protetora com propriedades de consolidação e impermeabilização, entre outras, enquanto a biocimentação envolve a geração de um ligante induzido biologicamente (DE MUYNCK; DE BELIE; VERSTRAETE, 2010). A biodeposição utiliza microrganismos capazes de precipitar carbonato de cálcio, calcificando a superfície onde esses microrganismos são depositados e criando uma camada protetora. Essa técnica é estudada principalmente para a proteção e recuperação de monumentos históricos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar as diretrizes que estabelecem as bactérias mais adequadas para serem empregadas no desenvolvimento de um bioproduto capaz de regenerar fissuras em estruturas de concreto, por meio do processo de biomineralização.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho compreendem as seguintes etapas:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente da literatura existente sobre o uso de bactérias no fechamento de fissuras no concreto, com ênfase especial no processo de biomineralização como método principal de regeneração.
- Fazer uma análise de riscos detalhada, examinando potenciais bactérias que colaborem no processo de biomineralização.
- Analisar a associação de bactérias que possam promover o processo de biomineralização em estruturas de concreto.

3 ESCOPO

A dissertação está organizada em dois capítulos, apresentados sob a forma de artigos científicos. O primeiro artigo, intitulado “Bioconcreto: uma revisão da sua aplicação no fechamento de fissuras”, foi publicado na “Revista Científica UMC” da Universidade de Mogi das Cruzes. Este artigo aborda uma das aplicações mais comuns do processo de biomineralização utilizando micro-organismos, especificamente no contexto do bioconcreto. Com base em dados obtidos na literatura, são relatadas as vantagens dessa tecnologia e o funcionamento do processo de carbonatação, mediado por bactérias gram-positivas capazes de regenerar fissuras em estruturas de concreto.

No capítulo 2 é apresentado o manuscrito do artigo intitulado “Diretrizes do Uso de Bactérias para Biomineralização de Fissuras no Concreto”, com o intuito de ser submetido após a finalização dos objetivos propostos por este trabalho, na periódico científico “Ambiente Construído” a qual é patrocinada pela a Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Neste capítulo é apresentada uma análise detalhada para a seleção das potenciais espécies de bacterianas e depois associá-las, com o principal objetivo de realizarem o processo de biomineralização, o qual envolve o uso de microorganismos capazes de regenerar fissuras em estruturas de concreto através da produção natural de $CaCO_3$.

4 CAPÍTULOS

4.1.1 Capítulo 1

Bioconcreto: uma revisão da sua aplicação no fechamento de fissuras.

Deorlan dos Santos Barbosa

Tatiane Faustino de Moraes

Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes-SP-Brasil.

RESUMO

Objetivo: Esta revisão analisa o processo de auto-cicatrização do bioconcreto através do fechamento de fissuras. **Métodos:** Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma revisão da literatura utilizando os bancos de dados CAPES, SCIELO e Google Acadêmico. Os artigos escolhidos discutem estudos relacionados ao bioconcreto, os quais identificam possíveis bactérias aplicáveis na produção e promovem uma análise do processo de auto-cicatrização de fissuras. Após uma análise e organização dos dados, 22 artigos foram escolhidos para compor esta revisão. **Revisão Bibliográfica:** O concreto é o material mais utilizado na construção civil por apresentar alta durabilidade, resistência mecânica e impermeabilidade, além de boa performance no processo de moldagem. No entanto, ele é vulnerável aos agentes externos, e assim, o surgimento de patologias como fissuras podem ocorrer em sua estrutura. Desta forma, o bioconcreto foi desenvolvido para promover o processo de auto-cicatrização através da ação de bactérias em sua constituição. Este processo ocorre quando as bactérias do bioconcreto são ativadas ao entrarem em contato com a água, que entra nas fissuras formadas. Tais fissuras são preenchidas por meio de precipitação de $CaCO_3$, produzido metabolicamente pelas bactérias. **Conclusão:** O uso do bioconcreto quando aplicado na construção civil, surge como uma alternativa mais sustentável e promissora para abordar questões patológicas relacionadas a fissuras no concreto.

Palavras-chave: concreto; bioconcreto, fissuras, auto-cicatrização, bactérias.

[1] Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes-SP-Brasil.

*E-mail:deorlanbarbosa@gmail.com.

[2] Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes, SP, Brasil.

Deorlan dos Santos Barbosa - ORCID - 0009-0009-8587-2791

Tatiane Faustino de Moraes - ORCID - 0009-0007-3404-6479

ABSTRACT

Objective: This review analyzes the process of self-healing in bioconcrete through crack closure. **Methods:** For the development of this study, a literature review was conducted using research databases. For the development of this study, a literature review was conducted using the CAPES, SCIELO, and Google Scholar databases. The selected articles discuss studies related to bioconcrete, identifying possible bacteria applicable in production and analyzing the self-healing process of cracks. After analyzing and organizing the data, 22 articles were chosen to compose this review. **Literature Review:** Concrete is the most widely used material in civil construction due to its high durability, mechanical strength, impermeability, and good performance in the molding process. However, it is susceptible to external agents, and the occurrence of pathologies such as cracks may affect its structure. Thus, bioconcrete was developed to promote the self-healing process through the action of bacteria in its composition. This process occurs when the bacteria in bioconcrete are activated upon contact with water that enters the formed cracks. These cracks are filled through the precipitation of $CaCO_3$, metabolically produced by the bacteria. **Conclusion:** The use of bioconcrete when applied in civil construction emerges as a more sustainable and promising alternative to address pathological issues related to concrete fissures.

Keywords: concrete, bioconcrete, fissures, self-healing, bacteria.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção é considerada uma das mais antigas e importantes criações da civilização. É um mercado que cresce significativamente no Brasil, desempenhando um papel fundamental na economia brasileira, contribuindo de forma significativa para o Produto Interno Bruto (PIB) do país. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [1], o setor representou cerca de 4,5% do PIB em 2021, demonstrando sua relevância para o desenvolvimento nacional. Conforme os dados da Câmara Brasileira da Industria da Construção (CBIC) a evolução do setor da construção civil indicou um crescimento de 1,5% do PIB da construção até julho de 2023 [2].

A indústria da construção civil desempenha um papel importante nas gerações de empregos no país. De acordo com os dados do Ministério do Trabalho, durante o primeiro quadrimestre do ano de 2023 a construção civil superou todos os setores na geração de empregos com carteira assinada no Brasil[3].

Dessa forma o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias destinados à construção civil se tornam necessários. Sabe-se que os recursos naturais são limitados, e que exige necessidade de cada vez mais utilizarmos saídas para melhorias e menos impactos ambientais e gastos financeiros desnecessários.

Um dos materiais mais utilizados e de grande importância para a indústria da construção civil é o concreto, uma mistura de cimento, água, areia e brita. Ao entrar em contato com a água, essa composição se converte em uma pasta fluida. Essa consistência fluida permite a aglomeração das partículas de agregados, possibilitando ao material moldar-se em qualquer formato desejado. À medida que o concreto inicia o processo de desidratação, a mistura entra na fase de cura ou endurecimento, resultante da reação irreversível entre a água e o cimento, conferindo-lhe resistência mecânica à compressão. Essa característica torna o concreto um material de alto desempenho estrutural, adequado para diversos ambientes de exposição [4].

No entanto, quando submetido a uma tração, o concreto pode apresentar fissuras ou até mesmo apresentar falhas na estrutura reduzindo sua durabilidade [5]. O surgimento de fissuras, por exemplo, possibilita a entrada de substâncias corrosivas no concreto, como a água, causando sua degradação. Outros aspectos preocupantes relacionados ao concreto referem-se aos seus impactos ambientais e econômicos. A indústria cimentícia, por exemplo, contribui com 7% das emissões globais de dióxido de carbono, e a tendência é que essa proporção aumente ao longo dos anos [6]. Essa realidade justifica a pesquisa por novas soluções biotecnológicos através do uso de bactérias em concreto, visando diminuir a necessidade de reparos e manutenção em

edificações e obras de infraestrutura. Esse enfoque é especialmente relevante para regiões e países em desenvolvimento, nos quais o ritmo de expansão da infraestrutura é significativo.

Quando se incorpora bactérias ao processo de produção do concreto, resulta no chamado bioconcreto. Esse termo refere-se a uma solução biotecnológica que impulsiona a regeneração do material, também reconhecido como "concreto auto curável". Essa inovação, originária da interseção entre microbiologia e engenharia civil, visa preencher fissuras através da produção de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), precipitado por reações metabólicas das bactérias prolongando a vida útil do concreto através da auto-cicatrização [7].

Além de ser auto-cicatrizante, o bioconcreto é reconhecido como uma tecnologia ambientalmente sustentável, uma vez que envolve o uso de bactérias. Essa tecnologia também é considerada mais econômica, evitando os custos associados à manutenção dos reparos convencionais favorecendo a extensão da durabilidade do concreto. Com isso, o objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre o fechamento de fissuras em bioconcreto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma revisão da literatura utilizando os bancos de dados da CAPES, SCIELO e Google Acadêmico. Os termos de busca utilizados foram "concreto" "bioconcreto" e "fissuras", resultando em 98 artigos. Posteriormente, realizou-se uma filtragem dos artigos disponíveis gratuitamente em português e inglês. Critérios de exclusão foram aplicados a artigos que não exploravam o tema das bactérias no bioconcreto e àqueles que não abordavam o processo de auto-cicatrização. Os artigos escolhidos discutem estudos relacionados ao bioconcreto, os quais identificam possíveis bactérias aplicáveis na produção e promovem uma análise do processo de auto-cicatrização de fissuras. Após uma análise e organização dos dados, 22 artigos foram escolhidos para compor esta revisão. A coleta de dados foi realizada durante o período de junho de 2023.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, produzido a partir do uso de um meio cimentante. Em sua mistura se utiliza geralmente cimento hidráulico junto com água, agregados e aditivos. Após a mistura e solidificação, o resultado é um concreto com potencial para ter alta durabilidade, alta resistência mecânica e alta impermeabilidade [8].

A mistura que compõe o concreto pode possuir vários insumos como por exemplo o uso de pozolanas naturais e industriais, que são materiais aglomerantes, como cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa, polímeros, agregados de concreto reciclado, aditivos e fibras.

O concreto pode ser preparado por meio de vibrações por impacto para homogeneizar os insumos que compõe a mistura. Em seguida esta mistura é submetida a um aquecimento e posteriormente sofre uma prensagem a vácuo. A mistura é autoclavado, e curado a vapor, para seguir no processo de extrusão o qual será moldado [9].

O cimento, geralmente hidráulico é o principal insumo na mistura do concreto, um composto seco e pulverulento, que com a adição de água, desenvolve propriedades aglomerantes resultando em reações químicas que ocorrem na composição, também chamadas de reações de hidratação [5].O cimento hidráulico é composto de clínquer, união de argila, calcário e produtos químicos os quais alguns destes são o gesso no processo de pega, escória que permite o aumento da sua durabilidade e argila pozolânica na impermeabilização do concreto [9].

Outros materiais importantes para a confecção do concreto são os agregados os quais cerca de 70% da composição é constituída de areia ou pedra em sua fabricação[10]. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) descreve que os agregados, os quais compõem o concreto, devem ser grãos de minerais duros, compactos e estáveis, devendo eliminar substâncias que possam afetar a hidratação, o endurecimento do cimento, a durabilidade e seu aspecto visual externo. Além disso, a ABNT acrescenta que deve haver uma distribuição granulométrica determinada, devendo atender aos limites impostos do controle de substâncias nocivas.

Com a finalidade de aumentar a resistência do concreto, reduzir o custo, bem como acrescentar ganhos expressivos à sua funcionalidade e vida útil, os agregados garantem menor retração na cura o que consequentemente leva ao menor aparecimento de fissuras no concreto [11]. O concreto como todo material é vulnerável aos agentes físicos, químicos e biológicos, e assim, o surgimento de patologias como as fissuras podem ocorrer em sua estrutura causando alterações significativas nas condições físicas do concreto como por exemplo a diminuição das propriedades mecânicas [12].

As fissuras são as patologias mais comuns nas estruturas de concreto, podendo ser identificadas por uma abertura na superfície do concreto. Essas manifestações podem ocorrer devido à ocorrência de tensões de tração acima da capacidade de resistência da estrutura e podem surgir tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto. Outras causas, tais como retração plástica térmica ou químicas internas do concreto nas primeiras idades podem ocasionar a presença de fissuras [12]. Segundo Zazarini [13] as fissuras podem ocorrer em diversas formas estruturais, como: vigas, pilares, lajes e outros elementos construtivos.

A busca por alternativas para resolver os problemas de fissuras no concreto, de forma eficiente e economicamente viável, se faz necessário uma vez que reparos em concreto, necessitam de tempo e mão de obra, gerando muitas vezes, gasto exuberantes [14]. Nesse contexto, com o auxílio da biotecnologia, há métodos de substituição do concreto convencional pelo bioconcreto, o qual é considerado mais sustentável, sem diminuir a resistência e durabilidades das estruturas em concreto.

De acordo com Freitas *et al* [12], o bioconcreto também chamado de "concreto auto-curável", consiste na mistura de concreto e bactérias produtoras de calcário, sendo que esse concreto é composto pelos mesmos componentes do concreto convencional, com a adição das bactérias, as quais podem estar encapsuladas, geralmente em argilas, ou adicionadas diretamente ao concreto.

Segundo Brito *et al*.[15] a bactéria presente no concreto pode ser ativada com o objetivo de promover o processo de auto-cicatrização do concreto. O processo de auto-cicatrização se dá a partir do momento em que as bactérias inativas ou em estado de hibernação presentes no concreto são ativadas ao entrarem em contato com a água, que entra nas fissuras formadas. Tais fissuras são preenchidas e seladas por meio de precipitação de cálcio ($CaCO_3$), produzido pelos microorganismos presentes no concreto [12].

Desta forma o processo se repete sucessivamente conforme o aparecimento de outras fissuras ocorrem no concreto. Vijay *et al*.[16] afirmam que quando o concreto sofre uma fissuração, as bactérias produzem o calcário que reestrutura a abertura formada e para manter as bactérias dormentes até que uma outra fissura apareça, essas são geralmente encapsuladas em partículas de argila expandida com lactato de cálcio, assim quando uma nova fissura surgir, as capsulas se rompem e as bactérias novamente em contato com a água e se alimentando do lactato de cálcio reagem e produzem mais calcário, que por sua vez preenche os espaços das fissuras e as fecham.

As bactérias que se destacam em produzir carbonato de cálcio em bioconcreto são as bactérias consideradas gram-positivas que conseguem se reproduzir em ambientes secos e alcalinos. A Tabela 1 mostra exemplos de bactérias utilizadas por diferentes pesquisadores para estudar materiais cimentícios [20].

Tabela 1: Inserção de bactérias em concreto

Bactéria	Mecanismo	Referências
Bacillus cereus	Degradação de ureia ou ácido úrico	(MONDAL; DAS; KUMAR CHAKRABORTY, 2017)
Bacillus holodurans	Conversão metabólica de compostos orgânicos	(KUNAL; SIDDIQUE; RAJOR, 2014)
Bacillus megaterium	Conversão metabólica de compostos orgânicos	(ANDALIB *et al.,* 2016)
Bacillus pasteurii	Degradação de ureia ou ácido úrico	(QIAN *et al.,* 2010)
Bacillus pseudofirmus	Conversão metabólica de compostos orgânicos	(SHARMA *et al.,* 2017)
Bacillus subtilis	Degradação de ureia ou ácido úrico	(FENG *et al.,* 2021; MONDAL; DAS; KUMAR CHAKRABORTY, 2017)
Saposarcina pasteurii	Degradação de ureia ou ácido úrico	(ABO-EL-ENEIN *et al*., 2013)

Fonte: Santos *et al* [20]

Algumas bactérias, conhecidas como ureolíticas, possuem a capacidade de sintetizar e liberar enzimas denominadas ureases, as quais desencadeiam a hidrólise da ureia. Esse processo resulta na produção de íons, como amônia (NH_4^+), gerando energia essencial para a sobrevivência celular, e carbonato (CO_3^{2-}), que se combina posteriormente com íons Ca^{2+} para formar cristais de calcita [17]. A hidrólise da ureia constitui o método convencional para realizar a Precipitação de Carbonato Induzida por Micro-organismos (MICP, do inglês *Microbial-Induced Carbonate Precipitation*). Os íons Ca^{2+} se ligam à parede celular, carregada negativamente, e, em seguida, os íons CO_2^- se agregam aos anteriores em um processo químico que, apesar de resultar na morte da célula, gera $CaCO_3$ [17].

A formação de precipitação por meio da ureólise implica a síntese da enzima urease através do metabolismo bacteriano, resultando na produção de amônia (NH_3) e carbono inorgânico dissolvido (CID), conforme indicado pela Equação 1.

$$(NH_2)_2CO + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2 \text{ (Equação 1)}$$

Esse processo provoca um aumento na alcalinidade nas células bacterianas, conforme demonstrado nas Equações 2 e 3.

$$2NH_3 + 2H_2O \longleftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad \text{(Equação 2)}$$

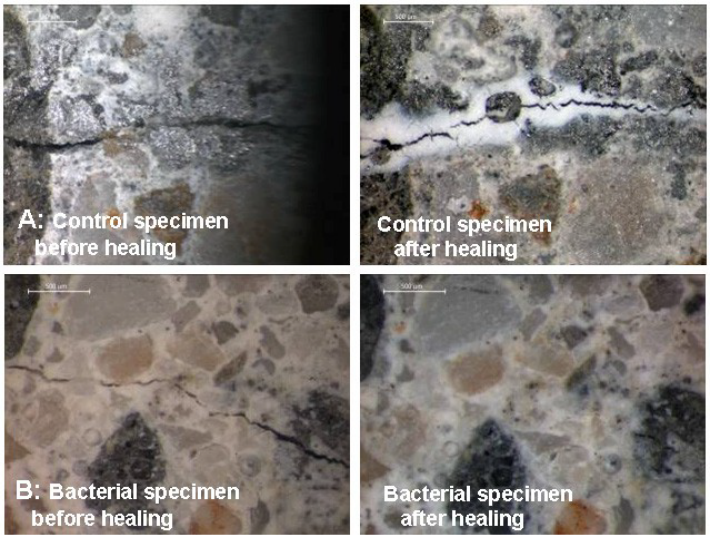
$$CO_2 + 2OH^- \longleftrightarrow HCO^-_3 + OH \longleftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O \quad \text{(Equação 3)}$$

Além disso, na presença de uma fonte de cálcio, o carbonato formado na superfície das células bacterianas reage com os íons cálcio presente no concreto, precipitando carbonato de cálcio, conforme descrito pela Equação 4 [20].

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \longleftrightarrow CaCO_3 \quad \text{(Equação 4)}$$

Um dos pesquisadores que se aprofundou nos estudos das bactérias em bioconcreto foi Hendrik Marius Jonkers. Em um dos seus estudos[14], Jonkers utilizou bactérias do gênero *Bacillus* das espécies *pseudofirmus* e *cohnii* em solução de lactato de cálcio imobilizadas em partículas de argila expandida para incorporar ao concreto convencional, substituindo 50% dos agregados utilizados. Dessa maneira, os esporos bacterianos tiveram a sua vida prolongada conseguindo produzir metabolicamente carbonato de cálcio promovendo o fechamento das fissuras conforme ilustrado na Figura 1.

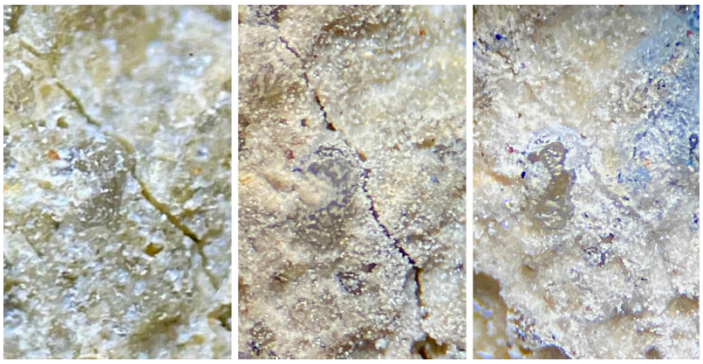
Figura 1: Cicatrização de fissuras com bactérias e meio de cultivo. (A) Controle (B) Bactéria.



Fonte: JONKERS *et al.* [14]

Zakrzevski [10] realizou o mesmo procedimento, mas com o uso de outra espécie de bactéria, a *Bacillus subtilis*. Na Figura 2 é possível a visualização da formação do carbonato de cálcio na fissura do concreto, ocorrendo a selagem completa da abertura da fissura, através da presença de cristais, o que comprova a existência de carbonato de cálcio no concreto.

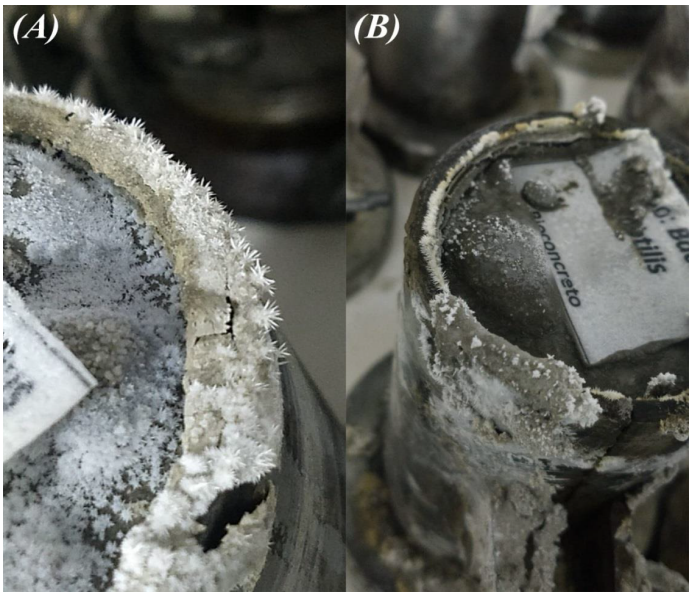
Figura 2: Identificação da Formação de Carbonato de Cálcio e selagem da fissura em microscópico com 200x de aumento.



Fonte: Zakrzevski [10].

O trabalho realizado por Medeiros[19] conduziu uma comparação entre duas espécies bacterianas pertencentes ao gênero *Bacillus* das espécies *Bacillus subtilis e Bacillus cereus*, utilizando o método de encapsulamento em argila expandida. Na Figura 3 é possível observar o surgimento de cristais de carbonato de cálcio nos dois corpos de prova, sendo que na Figura (3A) é apresentado o processo de auto-cicatrização proveniente da bactéria *Bacillus cereus* enquanto a imagem (3B) apresenta o processo da auto-cicatrização da *Bacillus subtilis.*

Figura 3: Surgimento de cristais nos corpos de prova
(A) *Bacillus cereus.* (B) *Bacillus subtilis.*

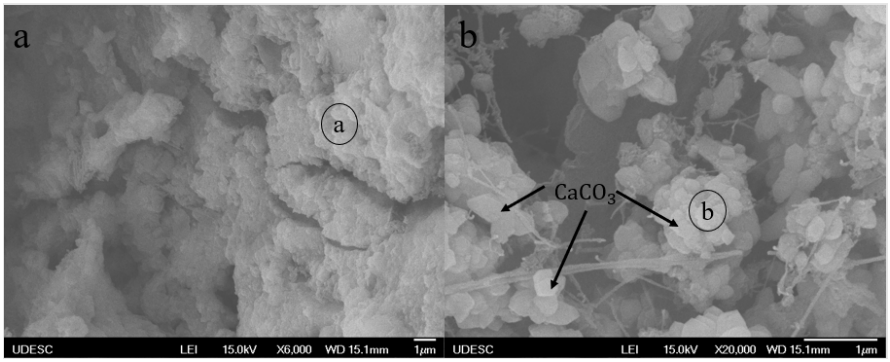


Fonte: Medeiros [19]

Os resultados obtidos por Medeiros [19] demostram que ao empregar as bactérias na mistura do concreto, observou um processo notável de fechamento das fissuras. Porém não foi possível o fechamento completo da fissura em comparação com os experimentos realizados por Zakrzevski [10]. Este resultado pode ser justificado pelo tempo de cura, no caso foram de apenas sete dias, resultando em uma hidratação incompleta do material comprometendo o processo de carbonatação.

Por meio de investigações envolvendo outra cepa bacteriana, a *Bacillus pumilus*, Santos *et al* [20] verificaram um aumento significativo de carbonato de cálcio na estrutura do concreto, quando comparado ao concreto convencional. Na Figura 4 são mostradas imagens de cristais de carbonato de cálcio produzidos pelas bactérias *Bacillus pumilus* obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na Figura 4b é possível observar a formação de cristais de carbonato de cálcio com geometria poligonal. A geometria identificada pode resultar na redução da porosidade do concreto além de auxiliar no fechamento das fissuras.

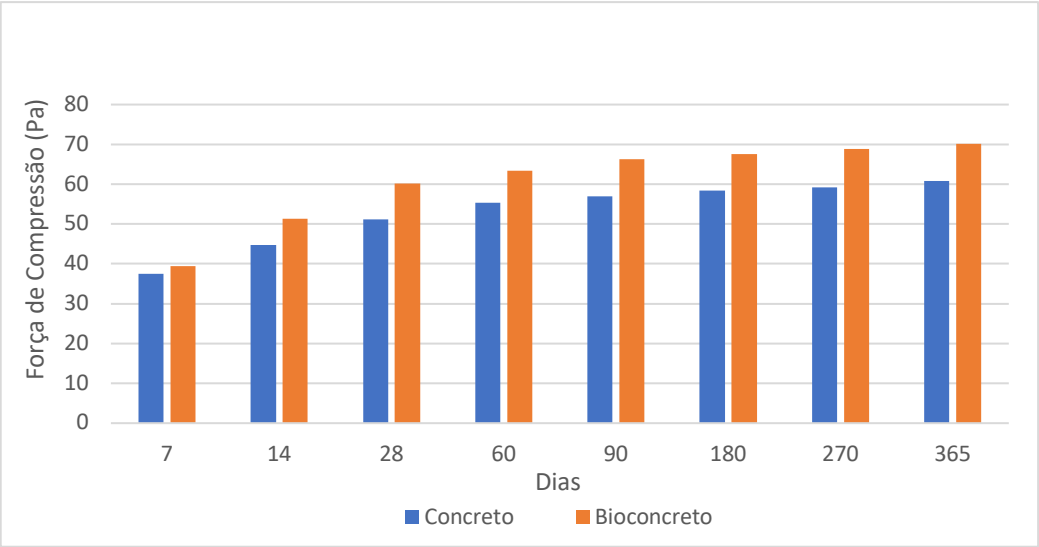
Figura 4: Carbonato de cálcio em visão microscópica.
(a) concreto convencional e (b) bioconcreto.



Fonte: Santos, J.R. *et al*.[20]

Conforme o trabalho de Silva e Passarini[21] o bioconcreto apresenta vantagens abrangendo capacidade de auto-cicatrização, durabilidade e eficiência. Seu trabalho relata o aumento de resistência à compressão de 15% após 365 dias do bioconcreto utilizando a bactéria *Bacillus subtilis* quando comparado ao concreto convencional. A Figura 5 apresenta os dados da análise comparativa da resistência à compressão dos dois tipos de concreto. Os autores indicam que a utilização desse material não apenas reduz os custos associados à manutenção e reparos, mas também amplia a vida útil das construções, destacando-se como uma opção sustentável.

Figura 5: Análise de resistência à compressão



Fonte: Silva e Passarine [21]

Da Silva Costa e Aparecido Rodrigues [22] realizaram o teste de resistência com a bactéria *Bacillus megaterium*, onde os resultados obtidos evidenciam que essas bactérias são adequadas para o processo de cura, e sua incorporação no concreto resultou na formação de um biomaterial mais resistente, especialmente quando utilizado uma concentração de 5% de organismos microbianos em sua confecção. A presença de bactérias no bioconcreto aumentou significativamente a durabilidade do material. Além disso, foi observado pelos autores a existência de cristais de carbonato de cálcio os quais desempenham o papel de diminuir a porosidade do concreto e vedar as fissuras.

Outro benefício significativo do bioconcreto está relacionado à sua abordagem ambientalmente amigável. Ao contrário do concreto convencional, que frequentemente utiliza materiais que emitem quantidades elevadas de CO_2 na atmosfera, bem como outros elementos tóxicos, o bioconcreto elimina a necessidade de reparos contínuos nas estruturas. O concreto convencional, sendo o segundo material mais consumido pela humanidade, é composto por uma mistura de agregados, água, aditivos e cimento, resultando no uso indiscriminado de recursos naturais como areia, brita, pedregulho e água. Além disso, a produção desse concreto convencional demanda a queima de rochas calcárias, argila, minério de ferro e cinzas em fornos operando em temperaturas extremamente altas. O bioconcreto, ao contrário, destaca-se como uma alternativa mais sustentável, minimizando o impacto negativo no meio ambiente, pois principalmente em reparações como fissuras não existe a necessidade de usar mais produtos de origem cimentícia, em outras palavras repetindo o processo de produção do mesmo [9].

CONCLUSÃO

O setor da construção civil destaca-se como o segmento de maior crescimento global, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento urbano e na geração significativa de empregos formais. Essa vitalidade impulsiona a economia mundial. Nesse contexto, torna-se imperativo conduzir estudos sobre materiais inovadores que sejam economicamente viáveis e ecologicamente sustentáveis.

Os estudos analisados nesta revisão indicam que o uso de bactérias, seja por inserção direta ou encapsulada, resulta em um aumento na durabilidade dos concretos. Esse fenômeno é atribuído ao fechamento das fissuras no concreto, facilitado pela precipitação de carbonato de cálcio gerado metabolicamente pelas bactérias. Dessa forma, conclui-se que o bioconcreto representa uma ideia inovadora e altamente promissora quando se trata de reparos em fissuras em estrutura de concreto. A revisão destacou seus benefícios a longo prazo, como a redução da necessidade de reparos e manutenções a curto prazo, além do aumento da durabilidade e impermeabilidade à água. Isso viabiliza sua aplicação em ambientes mais desafiadores, como pontes, túneis e muros de contenção.

O uso do bioconcreto emerge como uma alternativa sustentável, contribuindo para a diminuição dos custos associados a reparos, bem como para a redução do consumo de recursos naturais e das emissões de CO_2. Sua composição depende apenas da adição de bactérias na matriz cimentícia, eliminando a necessidade de produtos industrializados para a manutenção das estruturas, consolidando assim sua posição como uma solução ecologicamente consciente para os desafios da construção civil.

REFERÊNCIAS

1. PIB cresce 4,6% em 2021 e fecha o ano em R$ 8,7 trilhões. Agência IBGE Notícias. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br. Acesso em: 13 nov. 2023.

2. CBIC revisa projeção de crescimento e construção deve crescer 1,5% em 2023.Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). Brasília, 2023. Disponível em: https://cbic.org.br. Acesso em:13 nov. 2023.

3. Construção civil gera mais empregos do que qualquer outro setor nos primeiros meses de 2023.g1. Rio de janeiro, 2023. Disponível: https:// g1.globo.com. Acesso em: 13 nov. 2023.

4. Martins, Maysa Lorena Figueiredo et. Al magnesium industry waste for partial replacement of Portland cement. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, 2020.

5. Mânica, Graciela. Utilização de microrganismo autógeno para recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland. Lajeado: UNIVATES, 2019.

6. Mondal, Sadip; Gosh, Aparna. Construction and Building Materials. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete, [S.l.], ano 2021, 42, p.67-75, 2 nov. 2023.

7. Koga D.S, Santos L. M. Bioconcreto: Autocicatrização do Concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. PUC, Goiás, 2020.

8. American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete. ACI 318-19, 2019, 624p.

9. Medeiros, João Victor. Concreto Sustentável: O estudo do estado da arte. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal do Mato Grosso, 2022.

10. Zakrzevski, Mariana. Propriedades e Auto-cicatrização do Bioconcreto por meio da incorporação de bactérias do gênero *Bacillus Subtilis* encapsuladas em argila expandida.

(Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal da Fronteira do Sul Campus Erechim, RS, 2022.

11. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7211:2019: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2019.

12. Freitas, A. A. et al. Bioconcreto: Uma revisão de sua aplicação na construção civil. Ressarce Society and Development, v 10, n 4 e37210414270, 2021 Universidade do Estado de Minas Gerais, 14 de abr. 2021.

13. Zanzarini, J. C. Análise das causas e recuperação em edificação em alvenaria estrutural-Estudo de caso. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Paraná, 2016.

14. Jonkers, Henk M. Bacteria-based self-healing concrete. Heron, 56 (1/2), 2011.

15. Brito, A. V. & Nascimento, M. S. A implantação do Bioconcreto desenvolvido para solucionar problemas estruturais tais como: Fissuras, Rachaduras e Trincas. Revista Científica Semana Acadêmica, ISSN 2236-67172018, 2018.

16. Vijay, K.; Murmu, M.; DEO, S. V.Bacteria based self-healing concrete – A review. Construction and Building Materials. v. 152, 1008-1014, 2017.

17. Reis, L.G.V. Biotecnologia Microbiana daconstrução: potencial debiomineralização debactérias ureolíticas desolo decerrado ederejeitosdaconstrução civil. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). UniversidadeFederal de Goiás, Goiânia, 2017.

18. Zhang, J.; Liu, Y.; Feng, T.; Zhou, M.; Zhao, L.; Zhou, A.; LI, Z. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. Construction and Building Materials, Taiyuan, v. 148, p.610-617, maio, 2017.

19. Medeiros, Diego, Padilha da Cruz. Uso de bactérias Bacillus Subtilis e Bacillus Cereus na produção de bioconcreto. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal da Paraíba. 2020.

20. Santos, J.R., Effting, Carmeane, Serbent, P. Maria, Matsuda, B. Josie. Biomineralização de carbonato de cálcio no concreto pela ação do Bacillus pumilus.Rev. Eng Sanit Ambient v. 28, e20220277, 2023 Universidade do Estado de Santa Catarina, SC, 2023.

21. Silva, F. P. C., de Carvalho Passarini, V., & Santos, F. C. S. (2017). Bioconcreto: A Tecnologia Para Construção Sustentavel. INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797), 5(2), 41-58.

22. Da Silva Costa, Andressa e Rodrigues Aparecido, Flávio. Desenvolvimento de concretos auto curáveis utilizando a bactéria Bacillus megaterium. Revista Cientifica UMC. Universidade de Mogi das Cruzes, 2018.

4.1.2 Capítulo 2

Diretrizes do uso de bactérias para biomineralização de fissuras no concreto.

Deorlan dos Santos Barbosa

Tatiane Faustino de Moraes

Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), Mogi das Cruzes-SP-Brasil.

RESUMO

Este estudo aponta as diretrizes do uso de bactérias no fechamento de fissuras no concreto, com ênfase especial no processo de biomineralização como método principal de regeneração. Além disso, será conduzida uma análise de riscos detalhada, examinando os potenciais impactos ambientais, de segurança e econômicos associados à adoção de microrganismos no processo de biomineralização. Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma revisão da literatura utilizando os bancos de dados da CAPES, SCIELO e Google Acadêmico. Os termos de busca utilizados foram **"**bioconcreto" "biomineralização" e "fissuras", resultando em 120 artigos. O processo de biomineralização é antigo e envolve organismos vivos precipitando minerais inorgânicos para criar estruturas como conchas, esqueletos e dentes. Durante a biomineralização, diversos mecanismos podem desencadear a formação de minerais, como a introdução de produtos metabólicos e a liberação de cátions por células, resultando na mineralização biologicamente induzida. As bactérias do gênero *Bacillus* são as mais frequentemente mencionadas na literatura, apresentando informações e resultados favoráveis ao seu uso. Outro ponto crucial a ser considerado é a capacidade de resistência a ambientes alcalinos. O processo de biomineralização está se tornando cada vez mais relevante na ciência, especialmente em estudos que investigam bactérias capazes de regenerar estruturas de concreto. Este estudo demonstrou que as bactérias, principalmente do gênero *Bacillus*, têm a capacidade de sobreviver em ambientes alcalinos, como a matriz cimentícia presente nas estruturas de concreto.

Palavras-chave: biomineralização; bioconcreto; fissuras; bactérias.

ABSTRACT

This study outlines the guidelines for using bacteria to seal cracks in concrete, with a special emphasis on the biomineralization process as the main method for regeneration. Additionally, a detailed risk analysis will be conducted, examining the potential environmental, safety, and economic impacts associated with the adoption of microorganisms in the biomineralization process. For the development of this study, a literature review was conducted using the databases CAPES, SCIELO, and Google Scholar. The search terms used were "bioconcrete," "biomineralization," and "cracks," resulting in 120 articles. The biomineralization process is ancient and involves living organisms precipitating inorganic minerals to create structures such as shells, skeletons, and teeth. During biomineralization, various mechanisms can trigger mineral formation, such as the introduction of metabolic products and the release of cations by cells, resulting in biologically induced mineralization. Bacteria of the genus Bacillus are the most frequently mentioned in the literature, showing favorable information and results for their use. Another crucial point to consider is their resistance to alkaline environments. The biomineralization process is becoming increasingly relevant in science, especially in studies investigating bacteria capable of regenerating concrete structures. This study demonstrated that bacteria, particularly of the genus Bacillus, can survive in alkaline environments, such as the cement matrix present in concrete structures.

Keywords: biomineralization, bioconcrete, cracks, bacteria.

INTRODUÇÃO

A biomineralização é um processo no qual os organismos formam minerais por meio de atividades celulares, sob condições físico-químicas ideais. Esse processo é distinguido em dois tipos: mineralização biologicamente induzida, na qual os organismos são depositados acidentalmente e interagem com o ambiente, dando início ao processo metabólico; e mineralização biologicamente controlada, na qual o organismo controla frequentemente a atividade celular, resultando na síntese de minerais característicos de acordo com sua espécie, independentemente do ambiente (MONDAL; GOSH, 2023).

As aplicações da biomineralização para aumentar a durabilidade de materiais de construção podem ser categorizadas em dois processos: biodeposição, que envolve a deposição de uma camada protetora com propriedades de consolidação e impermeabilização, entre outras; e biocimentação ou bioconcreto, que consiste na geração de um ligante induzido biologicamente (MONDAL; GOSH, 2023).

Como relatado por Barbosa (2023) quando as bactérias são introduzidas no processo de fabricação do concreto, o resultado é o chamado bioconcreto. Essa expressão refere-se a uma solução biotecnológica que estimula a regeneração do material, também conhecido como "concreto autorregenerativo". Essa inovação, que surge da interseção entre microbiologia e engenharia civil, busca preencher fissuras por meio da produção de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), precipitado pelas reações metabólicas das bactérias, prolongando a vida útil do concreto por meio da autorregeneração (KOGA; SANTOS, 2020).

Além de ser autorregenerativo, o bioconcreto é reconhecido como uma tecnologia ambientalmente sustentável, uma vez que envolve o uso de bactérias. Essa abordagem também é considerada mais econômica, pois evita os custos associados à manutenção de reparos convencionais, favorecendo a extensão da durabilidade do concreto (BARBOSA, 2023).

Para a análise de risco, optou-se pelo uso da ferramenta Ishikawa. Conforme Miguel (2006), o Diagrama de Ishikawa, criado por Kaoru Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Espinha de Peixe devido à sua forma, é uma ferramenta gráfica utilizada para analisar e representar os fatores de influência (causas) sobre um problema específico (efeito).

Em suma, o resultado do diagrama é produto de um processo de *brainstorming*, sendo a ferramenta utilizada para registrar e representar dados e informações. Autores como Paladini (2012) e Carvalho (2012) também abordam o diagrama, referindo-se a ele como gráfico de espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa, em homenagem a seu criador, Kaoru Ishikawa. Essa ferramenta destina-se a analisar as operações dos processos produtivos, evidenciando as causas que levam a defeitos específicos. Caso as causas sejam prejudiciais, podem ser eliminadas; caso

sejam benéficas, podem ser fortalecidas para garantir sua continuidade. A análise abrange aspectos como ações, desempenho de equipamentos, comportamento de materiais e impacto do ambiente na produção, podendo incluir avaliações de medidas, métodos e operações.

A análise de causa raiz com o Diagrama de Ishikawa pode ser realizada por meio da adoção da ferramenta 6Ms as categorias de causas possíveis, e que servirão para agrupar as causas segundo essas categorias. Normalmente, se utilizam os tradicionais '6Ms' para isso (por isso também pode-se chamar o "Diagrama de Ishikawa" de "Método ou Análise 6M"), que listaremos e daremos uma rápida explicação a seguir:

- Mão de obra: Refere-se às causas relacionadas às pessoas envolvidas no processo. Essas causas geralmente incluem questões como falta de treinamento ou treinamento inadequado, alta rotatividade, ausências frequentes e a falta de definição clara de responsabilidades. No contexto deste trabalho, foram considerados conceitos específicos relacionados à competência técnica, tais como: capacitação adequada dos profissionais, segurança no manuseio dos microrganismos e rigor no controle de qualidade.

- Método: Refere-se às causas associadas ao método de trabalho, incluindo os procedimentos executados ou, em alguns casos, a ausência deles. Neste trabalho, foi considerado o processo de biomineralização, com foco em três aspectos principais: eficiência na precipitação de carbonato de cálcio, compatibilidade com os materiais do concreto e a robustez do processo;

- Materiais: Refere-se às causas relacionadas aos insumos utilizados, que, neste caso, provavelmente foram geradas antes do início do processo em análise. No contexto deste trabalho, o foco recaiu sobre os materiais específicos (bactérias e nutrientes), considerando os seguintes aspectos: tipo de bactéria utilizada, disponibilidade de nutrientes e compatibilidade com os aditivos do concreto;

- Máquina: Refere-se às causas relacionadas diretamente às máquinas, dispositivos e equipamentos, sejam eles mecânicos ou eletrônicos, incluindo também aspectos relacionados ao uso e à manutenção desses equipamentos. No contexto do trabalho, consideraram-se os seguintes elementos: equipamentos para o cultivo bacteriano, tecnologias de aplicação no concreto e instrumentação para controle de qualidade.

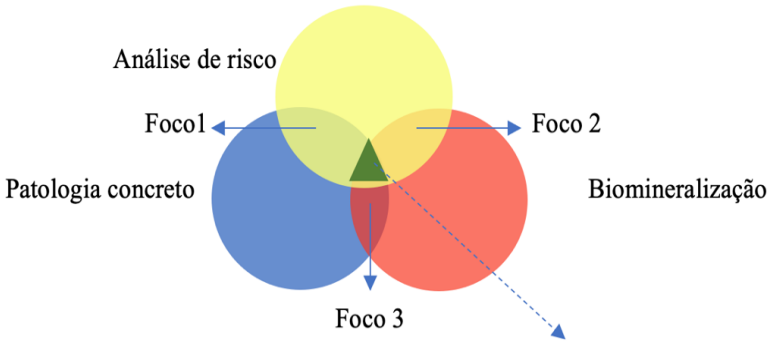
- Meio ambiente: Refere-se às causas relacionadas ao local de trabalho, como temperatura, ruído, vibração, contaminação, entre outros fatores. No contexto deste trabalho, foram consideradas as seguintes questões: condições ambientais que afetam o concreto, impacto ambiental e sustentabilidade dos materiais utilizados.

- Meio de medição: Refere-se às causas relacionadas ao processo de realização de medições e à qualidade das informações obtidas. Quando há falhas nesse aspecto, pode haver uma tomada de decisão equivocada com base em dados incorretos. No contexto do trabalho, consideraram-se aspectos de controle e monitoramento, incluindo: parâmetros de monitoramento, ferramentas de medição e frequência.

Sabendo disso, o objetivo deste estudo realizar uma revisão bibliográfica abrangente da literatura existente sobre o uso de bactérias no fechamento de fissuras no concreto, com ênfase especial no processo de biomineralização como método principal de regeneração. Fazer uma análise de risco detalhada, examinando potenciais bactérias que colaborem no processo de biomineralização. O objetivo final é analisar a associação de bactérias e assim as diretrizes que possibilitam ao processo de biomineralização fechamento de fissuras.

Em resumo o tema do trabalho foi definido a partir da base de apoio proporcionado por publicações, explorando a interseção entre diferentes áreas de estudo com diferentes microrganismos. Na Figura 1 os principais focos para realização desse trabalho, sendo (1) patologia do concreto, (2) biomineralização e (3) análise de risco.

Figura1: Definição do tema e áreas de estudo.



Fonte: Autor, 2024.

REFERENCIAL TEÓRICO

Concreto

Barbosa (2023) relata que o concreto é o material mais utilizado na construção civil, um produto produzido a partir do uso de um meio cimentante, onde em sua mistura se utiliza geralmente cimento hidráulico, um composto seco e pulverulento, que com a adição de água, desenvolve propriedades aglomerantes resultando em reações químicas que ocorrem na composição, também chamadas de reações de hidratação (MÂNICA, 2019).

O processo de fabricação mais amplamente empregado na construção civil é o cimento Portland, cujo nome deriva de uma ilha britânica conhecida por suas rochas que se assemelham tanto em cor quanto em propriedades de durabilidade e solidez ao cimento produzido. Este tipo de cimento é prevalente devido às suas características de resistência e versatilidade, tornando-se um componente fundamental na construção de diversas estruturas, desde edifícios residenciais até grandes obras de infraestrutura (BATTAGIN, 2023).

E com a finalidade de aumentar a resistência do concreto, reduzir o custo, bem como acrescentar ganhos expressivos à sua funcionalidade e vida útil, existem os agregados graúdos e miúdos que garantem menor retração na cura o que consequentemente leva ao menor aparecimento de fissuras no concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Contudo, o concreto como todo material é vulnerável aos agentes físicos, químicos e biológicos, e assim, o surgimento de patologias como as fissuras podem ocorrer em sua estrutura causando alterações significativas nas condições físicas do concreto como por exemplo a diminuição das propriedades mecânicas (FREITAS, 2021).

Fissuras

As fissuras são uma das patologias mais comuns encontradas em estruturas de concreto, caracterizadas pela presença de aberturas na superfície do material. Essas fissuras podem surgir devido à exposição a tensões de tração que excedem a capacidade de resistência da estrutura, podendo ocorrer tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto. Nos casos de estruturas de concreto armado, as fissuras representam um desafio significativo para a durabilidade dessas construções. Elas aumentam a permeabilidade do concreto, permitindo a entrada de água e substâncias corrosivas, como carbonatos, cloretos e sulfatos, na matriz cimentícia. Esse processo leva à degradação do material e à corrosão das armaduras de aço, o

que pode comprometer a resistência das estruturas e aumentar o risco de colapso (NGUYEN, 2019).

Mesmo em estruturas de concreto não armadas, as fissuras representam um problema semelhante, permitindo a infiltração de água e causando danos ao material cimentício, resultando em desintegração. Além dos danos físicos, as fissuras também podem causar preocupações estéticas e transmitir uma sensação de insegurança aos usuários das estruturas. A umidade resultante das fissuras também pode promover o crescimento de microrganismos, como mofo e bolor, prejudicando a saúde dos ocupantes (RIPPER e SOUZA, 1998).

A fissuração em materiais à base de cimento é uma característica intrínseca, sendo influenciada pelo ambiente de exposição, como variações térmicas, e pelas condições de serviço e utilização da edificação ou estrutura ao longo do tempo. As tensões normais desempenham um papel crucial no surgimento de fissuras na estrutura, podendo ocorrer tanto em tração quanto em compressão (RIPPER e SOUZA, 1998).

Segundo Zazarini (2016), as fissuras podem ocorrer em diversas formas estruturais, como: vigas, pilares, lajes e outros elementos construtivos. De acordo com a espessura da abertura na superfície do concreto, elas podem ser classificadas de diferentes formas sendo que as maiores recebem nomenclaturas diversas, como trincas, rachaduras, fendas ou brechas conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos rompimentos em função da espessura de abertura.

Classificação	Espessura da abertura (milímetros)
Fissura	Até 0,5
Trinca	Maior que 0,5 até 1,5
Rachadura	Maior que 1,5 até 5,0
Fenda	Maior que 5,0 até 10
Brecha	Maior que 10

Fonte: Adaptado de Zazarini, 2016.

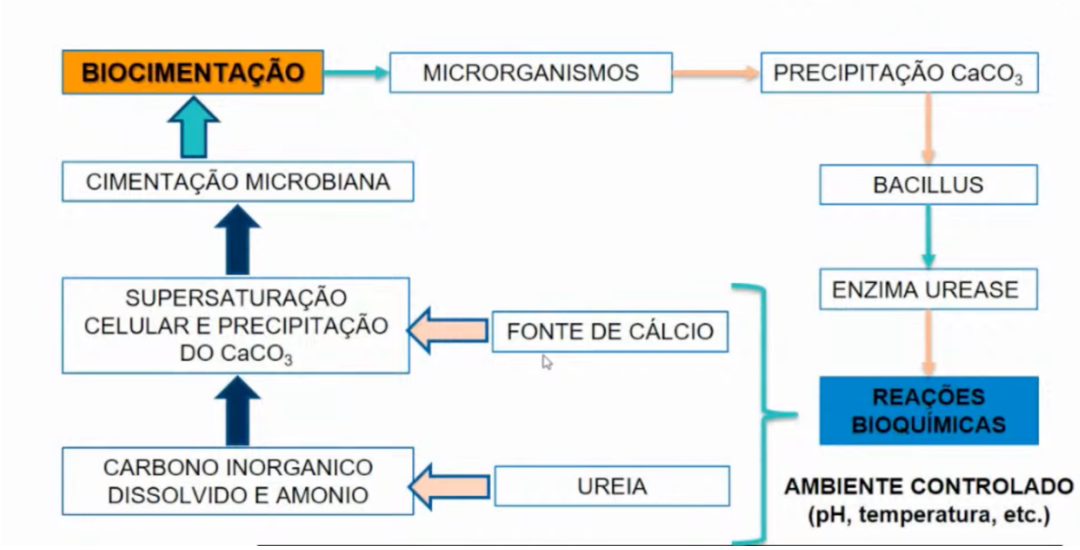
Com base nessa compreensão, é essencial buscar alternativas eficazes e economicamente viáveis para resolver os problemas de fissuras no concreto. Os reparos em concreto geralmente demandam tempo e mão de obra, resultando frequentemente em custos excessivos. Diante desse cenário, a biotecnologia apresenta métodos promissores, como o bioconcreto, que se concentra na precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiana (MICCP) é a capacidade dos microrganismos de formar carbonato de cálcio extracelularmente

através de uma atividade metabólica. O fenômeno da formação mineral por organismos vivos devido à reação de seus produtos metabólicos com o ambiente circundante é chamado de biomineralização. A propriedade de formação mineral por diferentes espécies bacterianas, como bactérias redutoras de sulfato (SRB), bactérias associadas a silicatos, cianobactérias unicelulares e bactérias degradadoras de ureia para reparar fissuras no concreto, sendo considerado uma opção mais sustentável. Essa abordagem não compromete a resistência e durabilidade das estruturas de concreto, ao mesmo tempo em que aborda preocupações ambientais e reduz os custos associados aos reparos.

Biomineralização

O processo de biomineralização é antigo e envolve organismos vivos precipitando minerais inorgânicos para criar estruturas como conchas, esqueletos e dentes. Durante a biomineralização, diversos mecanismos podem desencadear a formação de minerais, como a introdução de produtos metabólicos e a liberação de cátions por células, resultando na mineralização biologicamente induzida. A calcita é um exemplo notável de mineral inorgânico que desempenha um papel fundamental nesse processo. A calcita é amplamente reconhecida como um excelente aditivo para concreto, devido à sua compatibilidade com as substâncias cimentícias. Pode ser produzida por um processo biológico de indução mineral, que requer uma fonte de cálcio. O carbonato de cálcio produzido por microrganismos é considerado um material ecologicamente sustentável e economicamente viável, com potencial para diversas aplicações na engenharia civil, como consolidação e proteção de superfícies de concreto e pedra, reparo de defeitos e fissuras, cimentação ou consolidação de partículas soltas, como solo e areia (WANG, 2014). Com base nesse entendimento, estudos como os conduzidos na Universidade de Tecnologia de Delft, na Holanda, se destacam. Sob a liderança do Microbiologista e Professor Henk M. Jonkers (2010), juntamente com o Engenheiro especializado em materiais de construção civil, Eric Schlangen, foi empregado o método de biomineralização no bioconcreto ou também chamado de biocimentação (Figura 2). Nesse processo, bactérias gram-positivas são introduzidas na matriz cimentícia para lidar com um dos principais desafios da engenharia civil: o fechamento de fissuras.

Figura 2: Processo de Biocimentação.



Fonte: Almeida, 2018.

De acordo com Jonkers (2010) o interesse inicial na pesquisa sobre concreto surgiu de um projeto intrigante que visava estudar o potencial de cura de diferentes materiais, como plástico, poliuretano e asfalto. Durante esse período, Henk estava imerso no estudo e análise da regeneração do corpo humano, observando que nosso organismo possui células capazes de produzir minerais que contribuem para a regeneração de estruturas, como ossos e pele. Ele questionou por que os edifícios não poderiam ter a mesma capacidade de autorregeneração quando danificados.

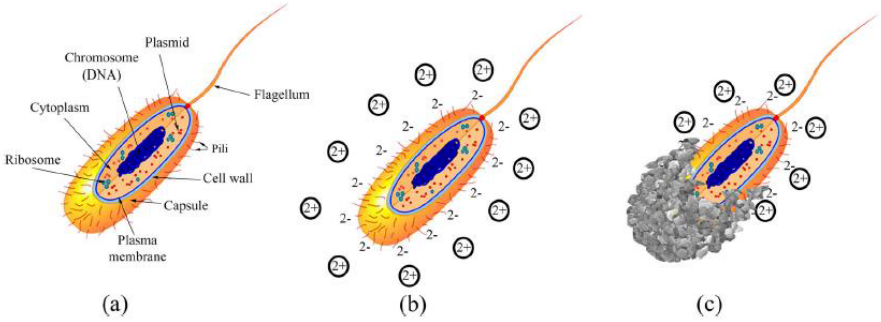
Jonkers (2010) relata que, em 2009, após diversas tentativas, eles finalmente alcançaram sucesso nos testes com bactérias produtoras de calcário. Durante suas pesquisas, descobriram que certas cepas de bactérias eram capazes de resistir aos processos químicos presentes no concreto e, além disso, eram capazes de regenerá-lo. Devido ao ambiente alcalino do concreto, com um pH de até 13 quando misturado, a maioria dos microrganismos não sobrevive nesse ambiente. No entanto, as bactérias do tipo *Bacillus pseudofirmus* e *Sporosarcina pasteurii* são capazes de prosperar em ambientes alcalinos e naturais. Essas bactérias são encontradas em locais como lagos com águas altamente alcalinas, com pH acima de 10, ou em crateras de vulcões ativos, além de solos ricos em carbonatos em regiões desérticas da Espanha e em lagos de soda (são corpos de água rasos repletos de sódio e carbonato dissolvidos – muito parecidos com o bicarbonato de sódio) encontradas no Egito.

De acordo com Freitas *et al.*, (2010) o bioconcreto, também conhecido como "concreto autosselante", é uma combinação de concreto com bactérias que produzem calcário. Esse tipo de concreto é composto pelos mesmos elementos do concreto convencional, mas inclui a adição

das bactérias. Essas bactérias podem estar encapsuladas, geralmente em argilas, ou adicionadas diretamente ao concreto, em um processo conhecido como biomineralização.

Quando o concreto apresenta fissuras, as bactérias entram em ação produzindo calcário e reestruturando a falha formada. Para manter as bactérias inativas até que ocorra a fissuração, elas são encapsuladas em pequenas partículas compostas de argila expansível e lactato de cálcio. Dessa forma, quando as fissuras surgem, as cápsulas se degradam e as bactérias entram em contato com a água, iniciando sua atividade. Elas se alimentam do cálcio presente no concreto, que reage com o carbono para produzir o calcário (Figura 3 b). Esse calcário resultante preenche as fissuras existentes, contribuindo para a reparação do concreto (Figura 3c) (WANG, 2014). Embora concretos com alto teor de cimento já demonstrem capacidade de autocicatrização, a eficiência de fechamento de fissuras é significativamente maior, chegando a ser cerca de quatro vezes mais eficaz, quando se utilizam agentes microbianos direcionados para esse propósito na matriz de concreto (JONKERS, 2011). Esse processo é notável conforme a (Figura 3) abaixo:

Figura 3: (a) Estrutura bacteriana. (b) Parede celular carregada negativamente e íons positivo sem volta. (c) Biomineral produzido pela ligação dos íons à parede celular.



Fonte: SEIFAN *et al*., 2016.

A biomineralização, processo em que bactérias precipitam carbonato de cálcio (biodeposição), envolve diversos microrganismos, vias metabólicas e ambientes distintos (DE MUYNCK *et al.,* 2008a). Geralmente, existem três mecanismos principais relacionados à precipitação do carbonato de cálcio conforme segue abaixo:

- ✓ à hidrólise enzimática da ureia por bactérias ureolíticas (DE MUYNCK *et al.*, 2008b).
- ✓ a conversão aeróbia de sais de cálcio.
- ✓ redução dissimulatória do sulfato por bactérias redutoras de sulfato em condições anóxicas.

Dentre esses processos, a decomposição da ureia por bactérias ureolíticas é frequentemente empregada em pesquisas, sendo preferida pela sua facilidade de operação e controle (WANG *et al.,* 2012).

Entre as bactérias ureolíticas, destacam-se linhagens de *Bacillus pasteurii*, *Bacillus sphaericus* e *Bacillus urease*. Bactérias ureolíticas do gênero *Bacillus* foram empregadas como agentes para promover a produção biológica de cristais de carbonato de cálcio, com o intuito de reparar fissuras encontradas em diferentes materiais cimentícios (NGUYEN, 2019). Recentemente, como uma proposta alternativa, têm sido utilizadas bactérias não-ureolíticas do gênero *Bacillus*, como as espécies *Bacillus subtilis*, *Bacillus pseudofirmus* e *Bacillus cohnii* (SCHWANTES-CEZARIO *et al.,* 2020).

Bactérias ureolíticas, têm a capacidade de produzir e secretar enzimas chamadas ureases, que desencadeiam a hidrólise da ureia. Essa reação gera íons, como amônia (NH_4^+), que a célula bacteriana utiliza para gerar energia, e carbonato (CO_3^{-2}), que, por sua vez, se combina com íons Ca^{2+} para formar cristais de calcita (SEIFAN *et al.,* 2016). A hidrólise da ureia é o método predominante para a precipitação de carbonato induzida por microrganismos (MICP, do inglês, *Microbial-Induced Carbonate Precipitation).* Os íons Ca^{2+}se ligam à parede celular, que possui carga negativa, e, em seguida, os íons CO_3^{-2} se associam a eles em um processo químico que, apesar de resultar na morte da célula bacteriana, gera $CaCO_3$ (SEIFAN *et al.,* 2016).

Hidrólise de ureia.

A hidrólise de ureia é um processo químico importante no contexto da biomineralização, especialmente em processos em que bactérias induzem a precipitação de minerais, como o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Através da ação bacteriana, a hidrólise da ureia resulta na formação de um mol de ácido carbâmico e um mol de amônio, conforme representado pela equação 1. Após essa etapa inicial, ocorre a hidrólise subsequente do ácido carbâmico, produzindo um mol de amônio e um mol de ácido carbônico. Em seguida, o amônio reage com a água, originando dois mols de amônia e dois mols de hidroxila. Posteriormente, os dois mols de hidroxila reagem com o ácido carbônico (H_2CO_3), gerando carbonato (CO_3^{-2}) e água (MINJOO *et al.,* 2022).

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (1)$$

$$NH_2COOH + H_2O \rightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (2)$$

$$2NH_3 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (3)$$

$$2OH^- + H_2CO_3 \rightarrow CO_3^{-2} + 2H_2O \quad (4)$$

Por fim, os íons de cálcio (Ca^{2+}) conseguem se ligar à parede celular carregada negativamente e essa, por sua vez, se liga aos carbonatos formados no processo descrito acima, ocorrendo, então, a precipitação do carbonato de cálcio. A precipitação de carbonato de Cálcio ocorre da seguinte forma:

$$Ca^{2+} - \text{Célula bacteriana} \rightarrow \text{Célula bacteriana} - Ca^{2+} \quad (5)$$

$$(\text{Célula bacteriana} - Ca^{2+}) + CO_3^{-2} \rightarrow \text{Célula bacteriana} - CaCO_3 \quad (6)$$

Para Jonkers (2011) a conversão metabólica bacteriana de sais ácidos orgânicos, como lactato de cálcio e acetato de cálcio é uma alternativa menos convencional para realizar a precipitação induzida de carbonato microbiano (MICP), que apresenta a vantagem de evitar a produção de agentes corrosivos nas barras de aço e ainda consome CO_2**.** Jonkers (2011) descreve este método como uma abordagem inovadora na engenharia civil, que emprega microrganismos, especialmente bactérias, para melhorar as propriedades do concreto. Os microrganismos presentes no concreto metabolizam sais orgânicos, como lactatos, acetatos e outros compostos orgânicos presentes na matriz do concreto ou adicionados intencionalmente como nutrientes. Durante esse processo metabólico, os microrganismos produzem carbonatos de cálcio, que podem preencher fissuras e microfissuras no concreto, melhorando sua durabilidade e resistência. Essencialmente, as bactérias agem como agentes catalisadores, promovendo a formação de carbonato de cálcio a partir dos sais orgânicos disponíveis no ambiente do concreto. Isso pode resultar na auto-reparação de pequenas fissuras, melhorando a integridade estrutural do concreto ao longo do tempo. Este método tem o potencial de reduzir a necessidade de reparos e manutenção, aumentando a vida útil das estruturas de concreto e reduzindo os custos associados.

Conversão metabólica de sais orgânicos

No método de conversão metabólica de sais orgânicos, durante o processo de fissuração, o agregado leve se fragmenta, facilitando a entrada de oxigênio no concreto. Esse oxigênio entra em contato com as bactérias e as induz a oxidar um sal de cálcio orgânico, por exemplo acetato de cálcio ($C_4H_6CaO_4$) ou o lactato de cálcio ($C_6H_{10}O_6$), para formar carbonato de cálcio, em condições ambientais favoráveis para o crescimento e desenvolvimento bacteriano, tais como temperatura e pH adequados, presença de água, oxigênio e nutrientes. Os subprodutos da

conversão do acetato de cálcio em carbonato de cálcio são dióxido de carbono e água, ambos compatíveis com o concreto (Eq. 7). Adicionalmente, o carbonato de cálcio pode ser formado pelo processo de carbonatação, onde o hidróxido de cálcio Ca (OH_2) reage com o dióxido de carbono presente no concreto (Eq. 8). Esse processo resulta em uma forma de cicatrização autógena não intencional (ALAZHARI *et al.,* 2018; JONKERS *et al*., 2010; WIKTOR; JONKERS, 2011).

$$(C_4H_6CaO4) + 4O_4 \rightarrow CaCO_3 + 3CO_2 + 3H_2O \quad (7)$$

$$3CO_2 + 3Ca\,(OH)_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 3H_2O \quad (8)$$

Redução Dissimulatória do Sulfato

A redução dissimulatória do sulfato no bioconcreto é um processo biológico em que certas bactérias (*Desulfotomaculum spp*, *Desulfobacter spp*), conhecidas como bactérias redutoras de sulfato, utilizam o sulfato presente no ambiente anaeróbico para realizar sua respiração. No processo de redução dissimulatória do sulfato, as bactérias promovem a dissolução do gesso ($CaSO_4.2H_2O$) em íons de cálcio (Ca^{+2}) e sulfato (SO_4^{-2}) (Eq. 9). Em seguida, um composto orgânico (CH_2O) reage com o sulfato (SO_4^{-2}) para formar sulfeto de hidrogênio (H_2S) e bicarbonato (HCO_3^-) (Eq. 10). Por fim, os íons de cálcio (Ca^{+2}) e bicarbonato (HCO_3^-) reagem para produzir carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (Eq.11) contribuindo assim para a biomineralização e cicatrização de fissuras no concreto. (ACHAL *et al.,* 2015).

$$CaSO_4.2H_2O \rightarrow Ca^{+2} + SO_4^{-2} + 2H_2O \quad (9)$$

$$2CH_2O + SO_4^{-2} \rightarrow H_2S + 2HCO_3^- \quad (10)$$

$$Ca^{+2} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (11)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma revisão da literatura utilizando os bancos de dados da CAPES, SCIELO e Google Acadêmico. Os termos de busca utilizados foram "biociemtação" “biomineralização" e "fissuras", resultando em 120 artigos. Posteriormente, realizou-se uma seleção dos artigos disponíveis em português e inglês, publicados entre os anos de 2019 e 2023, reduzindo a seleção para 98 artigos. Critérios de exclusão foram aplicados a artigos que não exploravam o tema sobre processos de biomineralização. Os artigos escolhidos discutem estudos relacionados ao processo de

biomineralização em estruturas do concreto, os quais relatam as possíveis bactérias aplicáveis a biocimentação que promovem uma análise do processo de bioregeneração de fissuras. Após uma análise e organização dos dados, 53 artigos foram escolhidos para apoio teórico às discussões dos resultados.

Para a análise de risco, foi adotada a ferramenta Ishikawa, amplamente reconhecida por sua eficácia na identificação de causas e efeitos de um problema, focando em artigos relacionados a pesquisas sobre patologias, fissuras, biomineralização, biocimentação e bioconcreto. Ao final, os resultados foram interpretados com base na literatura especializada, proporcionando uma análise abrangente e fundamentada dos riscos identificados.

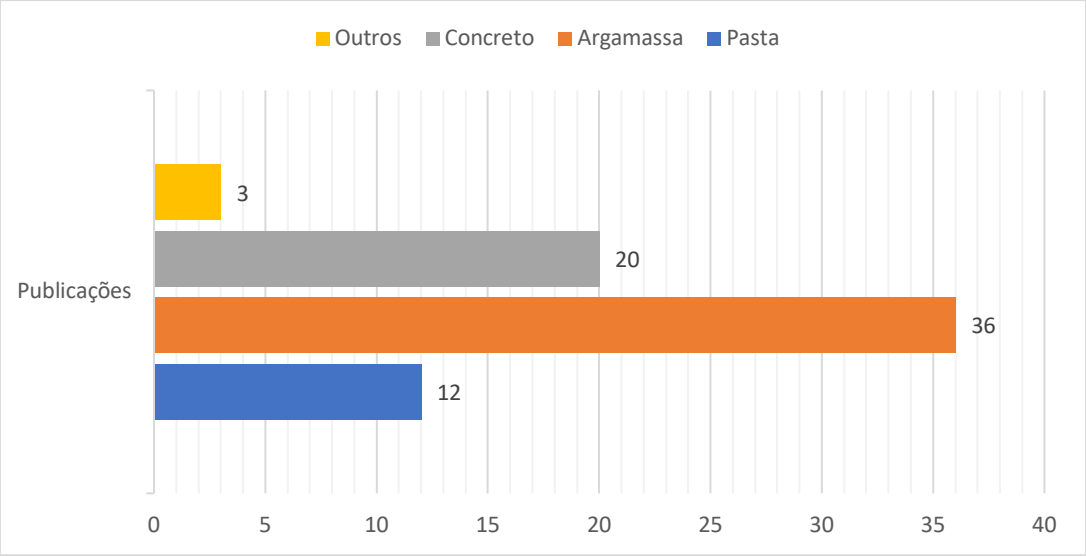
Por fim, através da revisão e das análises realizadas, propomos um novo produto com o objetivo de promover a biomineralização utilizando bactérias gram-positivas para a regeneração das estruturas de concreto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos últimos vinte anos, o interesse pelo uso de bactérias como agentes biomineralizadores tem crescido significativamente. Vários estudos prévios apontam para o potencial do uso de bactérias na reparação de fissuras em materiais cimentícios empregados na construção civil, como pasta, argamassa e concreto (Figura 4) (GHELLERE, 2021).

A aplicação dessas bactérias para facilitar o processo de biomineralização em fissuras de materiais cimentícios tem recebido atenção especial na comunidade científica, devido à sua compatibilidade com a matriz de cimento e ao impacto positivo no meio ambiente, evitando o uso de materiais industriais nos reparos de fissuras (WANG *et al.,* 2014). Com base nos dados coletados pela autora Ghellere (2021), foi elaborado um gráfico para uma melhor visualização da quantidade de autores presentes na literatura com o uso do processo de biomineralização em materiais cimentícios.

Figura 4: Materiais Cimentícios usados no reparo de Fissuras.



Fonte: Ghellere, 2021.

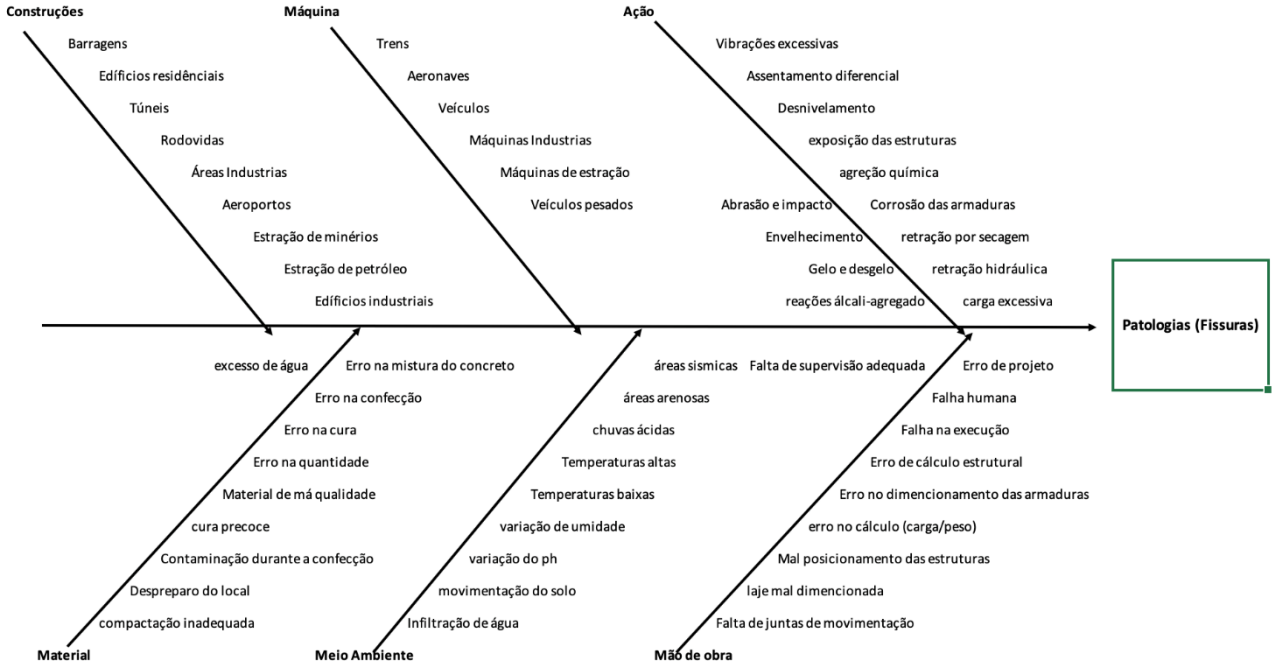
Sabendo disso, é importante entender as principais causas do aparecimento dessas fissuras nas estruturas. Em síntese, de acordo com Isaia (2010), as patologias no concreto podem ser desencadeadas por diversos fatores, como a seleção inadequada da resistência à compressão, finura, tempo de início e fim de pega, temperatura e calor de hidratação, composição e perda ao fogo. Os agregados também desempenham um papel relevante nesse contexto, onde a granulometria e o formato dos grãos, analisados por meio de análise petrográfica e reatividade potencial, são cruciais para identificar a composição mineralógica das rochas e suas possíveis reações.

Principais causas das fissuras

O surgimento de fissuras é resultado de uma variedade de mecanismos de degradação, incluindo falhas no projeto estrutural ou na execução da obra, sobrecargas não previstas durante a fase de projeto, retração, entre outros desafios, tais como retração plástica térmica ou químicas internas do concreto nas primeiras idades podem ocasionar a presença de fissuras. Essas fissuras criam vias preferenciais para a penetração de agentes agressivos, como água, gases atmosféricos, cloretos e sulfatos, no interior da estrutura ou edificação (FREITAS *et al.*, 2021).

Portanto, por meio de uma análise de risco utilizando o diagrama de Ishikawa (Figura 5), é possível investigar potenciais causas de fissuras no concreto, abrangendo desde falhas humanas até causas naturais.

Figura 5: Potenciais causas de fissuras no concreto.



Construções	Máquina	Ação	Material	Meio Ambiente	Mão de obra
Barragens	Trens	Vibrações excessivas	Erro na mistura do concreto	áreas sismicas	Erro de projeto
Edíficios residênciais	Aeronaves	Assentamento diferencial	Erro na confecção	áreas arenosas	Falha humana
Túneis	Veículos	Desnivelamento	Erro na cura	chuvas ácidas	Falha na execução
Rodovidas	Máquinas Industrias	exposição das estruturas	Erro na quantidade	Temperaturas altas	Erro de cálculo estrutural
Áreas Industrias	Máquinas de estração	agreção química	Material de má qualidade	Temperaturas baixas	Erro no dimencionamento das armaduras
Aeroportos	Veículos pesados	Corrosão das armaduras	cura precoce	variação de umidade	erro no cálculo (carga/peso)
Estração de minérios		retração por secagem	Contaminação durante a confecção	variação do ph	Mal posicionamento das estruturas
Estração de petróleo		retração hidráulica	Despreparo do local	movimentação do solo	laje mal dimencionada
Edíficios industriais		carga excessiva	compactação inadequada	Infiltração de água	Falta de juntas de movimentação
		reações álcali-agregado	excesso de água		Falta de supervisão adequada
		Gelo e desgelo			
		Envelhecimento			
		Abrasão e impacto			

Fonte: Autor, 2024.

Pela Figura 5 é possível afirmar que a “ação”, é o principal meio causador de aparecimentos de patologias nas estruturas, onde os efeitos citados como carga excessiva, vibrações, agressões químicas entre outros estão como os mais comuns da literatura, quando se trata de fissuras em estruturas cimentícias.

Em geral os reparos são realizados por produtos industrializados, causando mais custos a obra e degradando ainda mais o ambiente, por esse motivo a ideia de minimizar os custos em reparos com o uso de bactérias no processo de biomineralização é considerado mais propicio a sustentabilidade e menos poluente.

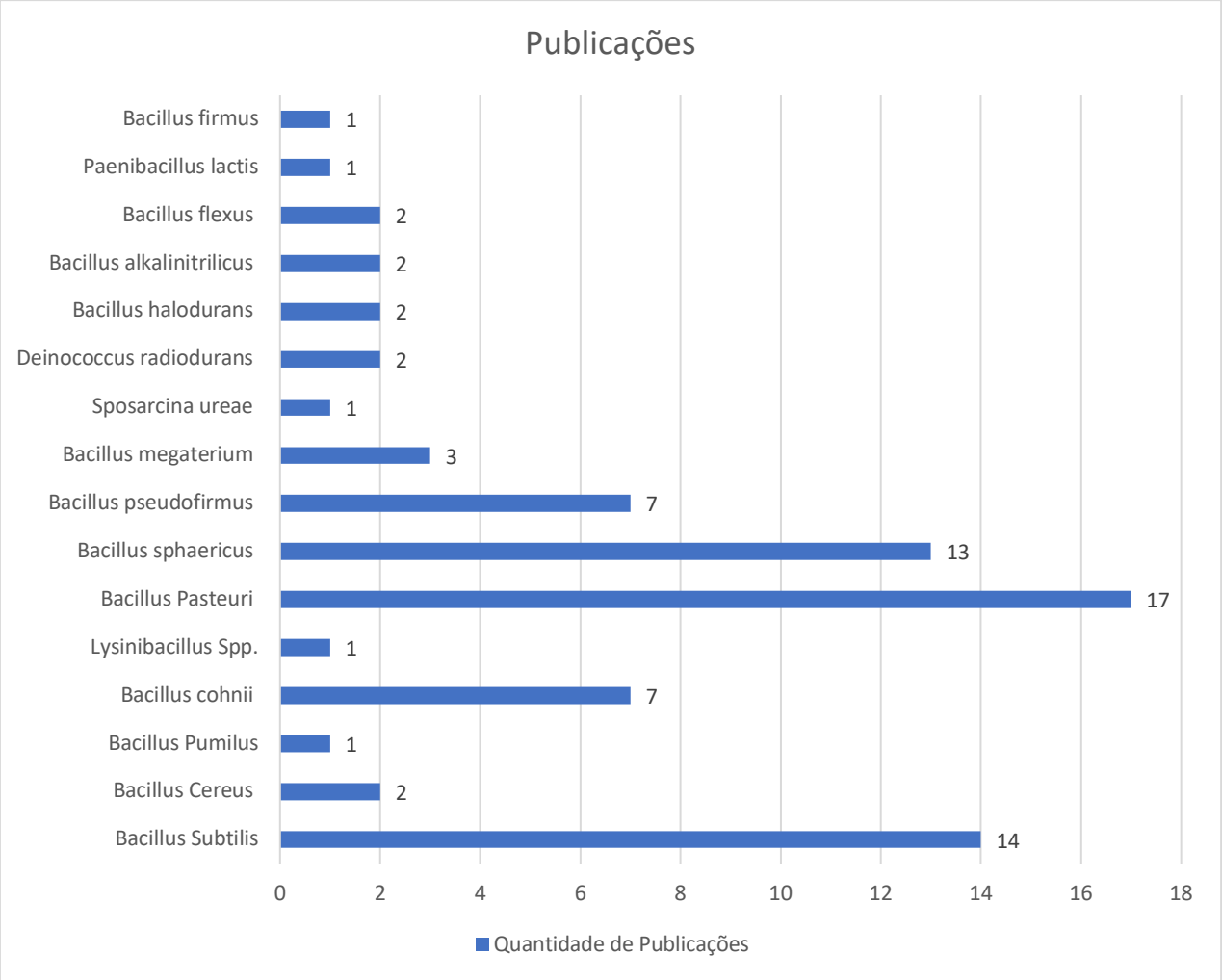
A biomineralização de fissuras é um processo intrinsecamente ligado à atividade bacteriana na produção de $CaCO_3$. Durante esse procedimento, as bactérias capazes de sintetizar carbonato de cálcio, em conjunto com os nutrientes necessários (meios de cultura empregados para o cultivo bacteriano) e os precursores da precipitação de carbonato (tais como compostos de ureia e cálcio), são incorporados à matriz cimentícia ou aplicados em sua superfície. Em

ambientes favoráveis, essas bactérias são ativadas e desencadeiam a precipitação do carbonato de cálcio, preenchendo e reparando pequenas fissuras nos materiais cimentícios (ACHAL *et al.,* 2015; WANG *et al.,* 2018). A eficácia desse processo é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo a diversidade e quantidade das bactérias utilizadas, a composição do meio de cultura, as fontes de nutrientes empregadas, o pH da matriz cimentícia e a disponibilidade de umidade no material (KHALIQ; EHSAN, 2016).

Seleção de potenciais bactérias

Com base na revisão bibliográfica e na análise dos mecanismos de precipitação do carbonato de cálcio, foi possível identificar as principais linhagens de bactérias utilizadas como agentes de biomineralização de fissuras em materiais cimentícios. A partir dos dados compilados por Ghellere (2021), foi elaborado um gráfico para destacar as espécies mais comumente empregada nesse processo. Observa-se que a maioria dos estudos utiliza bactérias do gênero *Bacillus*, que pertencem ao *Filo Firmicutes* (Figura 6). Essas bactérias possuem uma forma celular cilíndrica, também conhecida como bastonete ou bacilo, e são classificadas como Gram-positivas devido à presença de uma única camada de envoltório celular, sobre a qual se encontra uma camada espessa de *peptidoglicano.*

Figura 6: Diversidade de bactérias biomineralizadoras de materiais a base de cimento.



Fonte: Ghellere, 2021.

A escolha do gênero *Bacillus* como potencial candidato para o processo de biomineralização é respaldada por um amplo conjunto de trabalhos na literatura, a maioria dos quais apresenta resultados favoráveis. Entre as espécies desse gênero, *Bacillus pasteurii* se destaca como a mais mencionada e com melhores resultados. Além disso, essa bactéria foi pioneira no processo de biomineralização, introduzido pelo cientista Henk Jonkers. Jonkers enfatiza a necessidade de uma resistência extraordinária por parte dessas bactérias para sobreviver em ambientes altamente alcalinos, como é o caso dos ambientes cimentícios, que frequentemente possuem um pH extremamente elevado.

A escolha do microorganismo para o processo de biomineralização deve levar em consideração vários fatores importantes o potencial de urease, quantificação de calcita e curva de crescimento (atividade enzimática – concentração), resistência a ambientes alcalinos, capacidade de formar esporos e sua segurança em termos de saúde pública que o

microorganismo não seja patogênico, minimizando assim os riscos à saúde humana e ao meio ambiente (JONKERS *et al.,* 2010).

Bactérias do gênero Bacillus são uma escolha promissora devido às suas propriedades únicas de resistência. Os esporos desse microorganismo podem sobreviver por longos períodos sob condições extremas, incluindo altas temperaturas, dessecação, falta de nutrientes e exposição a solventes químicos (ALVES *et al.,* 2018).

A *Bacillus subtilis* é amplamente utilizada na produção industrial de enzimas extracelulares em escala global, devido à sua alta taxa de crescimento em ciclos curtos, estabilidade e segurança no manuseio, uma vez que é considerado não patogênico. Da Silva Gato *et al.* (2021) escolheram extrair a *Bacillus subtilis* do Chorume com base na suposição de que essa bactéria poderia ser encontrada em aterros sanitários, onde ocorre a lixiviação de calcário. Além disso, optaram por aplicá-la diretamente na fissura, sem encapsulamento, com o objetivo de reduzir os custos do processo. Essas características a tornam uma opção viável e eficaz para o processo de biomineralização em materiais cimentícios. Após isso, uma porção do material foi depositada em uma lâmina e submetida ao teste de coloração de Gram revelando uma coloração azul-violeta característica dos *Bacillus* gram-positivos.

Portanto, há autores que reforçam o uso de bactérias, principalmente aquelas pertencentes ao gênero *Bacillus*, devido ao seu destaque e aos resultados favoráveis na precipitação de carbonato de cálcio, presente em trabalhos recentes na literatura. Schwantes-Cezario *et al.* (2020) por exemplo ressalta que as bactérias do gênero *Bacillus* têm sido reconhecidas como agentes de autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios, devido à sua capacidade de precipitar minerais que fecham as fissuras de forma autônoma. As espécies de *Bacillus* são altamente promissoras para esse fim, devido à sua capacidade de tolerar o ambiente extremo encontrado nos materiais cimentícios (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; TRABULSI; ALTERTHUM, 2015).

O processo de autocicatrização por bactérias, especialmente do gênero Bacillus, envolve a selagem das fissuras por meio da precipitação de carbonato de cálcio utilizando compostos orgânicos que contêm cálcio. Estes incluem nitrato de cálcio, lactato de cálcio, glutamato de cálcio, acetato de cálcio e cloreto de cálcio (WANG *et al.,* 2014a; JONKERS *et al*., 2010; XU; YAO,2014; ALAZHARI *et al*., 2018; VAN TITTELBOOM *et al*., 2010).

As bactérias responsáveis pela produção de carbonato de cálcio podem formar endósporos aeróbicos (que crescem na presença de oxigênio) ou anaeróbicos facultativos (que crescem na presença ou ausência de oxigênio). O tamanho típico dos esporos das bactérias Bacillus é de cerca de 1μm (JONKERS *et al.,* 2010).

Na pesquisa conduzida por Ghellere (2021), iniciou-se com a seleção de bactérias com potencial para produzir carbonato de cálcio, por meio do isolamento de amostras retiradas de estruturas de concreto reais e da observação da precipitação de $CaCO_3$ em meio de cultura com indicadores de pH. Entre essas bactérias, destacam-se *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*, as quais foram conduzidas em análises de imagem com estereomicroscópio, ensaios de termogravimétrica (TG) para detectar a presença de carbonato de cálcio, ensaios de difração de raios-X (DRX) para avaliar a composição mineralógica do precipitado, e ensaios de resistência à compressão em amostras cilíndricas não fissuradas. Os resultados revelaram que a adição das bactérias proporcionou respostas satisfatórias em comparação com a amostra de referência, ou seja, o concreto convencional.

O estudo de Mijoo *et al.* (2022) visou maximizar a produção de carbonato de cálcio pelo *Bacillus psychrodurans* LC40 alcalinofílico, isolado de uma caverna de calcário, com foco na cicatrização rápida e não prejudicial de rachaduras. Utilizando um meio otimizado, foi alcançado um rendimento de carbonato de cálcio aproximadamente 8,6 vezes maior em comparação com o meio tradicional. As atividades da urease e da anidrase carbônica foram observadas simultaneamente, contribuindo para um aumento do pH e, consequentemente, para a produção máxima de carbonato de cálcio. Os cristais produzidos foram caracterizados como vaterita e calcita, demonstrando a eficácia do processo. Além disso, a cepa LC40 mostrou-se capaz de cicatrizar completamente uma rachadura de 0,75 mm em apenas 3 dias, sugerindo seu potencial como vedante ecológico para estruturas de concreto em ambientes adversos.

Chaurasia *et al.* (2014) exploraram a capacidade de precipitação de cálcio e produção de urease pelas bactérias *Bacillus cohnii* e *Bacillus megaterium,* empregando níquel como cofator. Em sua pesquisa, eles elaboraram argamassa em várias concentrações e realizaram testes de resistência à compressão, identificando um aumento significativo. Em outro estudo, Da Silva Costa (2018) também investigou o potencial da *Bacillus megaterium* para aumentar a resistência do concreto. Os resultados revelaram que a presença dessas bactérias pode de fato aprimorar a cura do concreto, especialmente quando presentes em uma concentração de 5%. De acordo com Da Silva Costa (2018), a introdução dessas bactérias teve um impacto notável na durabilidade do material. A observação da abundância de cristais de carbonato de cálcio gerados, que preencheram porosidade e vedaram fissuras, demonstrou-se eficaz em todos os testes conduzidos.

Al-Salloum *et al*. (2016) conduziram um estudo sobre o comportamento da argamassa de cimento na precipitação de cálcio por indução microbiológica, utilizando a bactéria *Sporosarcina pasteurii*, também conhecida como *Bacillus pasteurii* na preparação da

argamassa. Os resultados revelaram um efeito positivo em ensaios de compressão, assim como uma melhoria na resistência à aderência. Surpreendentemente, constatou-se que o meio de crescimento da bactéria teve uma influência insignificante em seu processo de calcificação. Análises com microscópio de varredura revelaram a presença de um material de enchimento fibroso, corroborando o aumento da resistência da argamassa estudada.

Santos, J.R. *et al*. (2023) utilizaram a bactéria *Bacillus pumilus* em sua pesquisa. Os resultados revelam que o *Bacillus pumilus* é capaz de converter ureia em amônia, o que aumenta o pH do meio. Além disso, foi observada uma redução significativa de 0,03 g cm^{-2} na absorção de água por capilaridade nos corpos de prova biomineralizados com *Bacillus pumilus*, em comparação com os corpos de prova convencionais. Devido à formação de uma camada protetora na superfície, o *Bacillus pumilus* contribuiu para a redução da porosidade do material, resultando em um aumento de aproximadamente 9,0 MPa na resistência à tração por compressão diametral. A altura de ascensão capilar foi significativamente reduzida para 1,83 cm nos corpos de prova biomineralizados, em comparação com os 3,83 cm observados nos corpos de prova convencionais. Análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia dispersiva de energia indicam a presença de $CaCO_3$, precipitado pelas bactérias. Em suma, os resultados sugerem que a aplicação superficial do *Bacillus pumilus* no concreto pode promover melhorias em suas propriedades mecânicas (SANTOS; J.R. *et al.,* 2023).

Em 2019, uma pesquisa realizada na Universidade Nacional de Cajamarca, no Peru, liderada por Asenjo Alarcón (2019), buscou desenvolver um tipo especial de concreto utilizando aditivos bacterianos, destacando o uso de duas bactérias, incluindo a *Paenibacillus lactis*, também pertencente ao gênero *Bacillus*. Este estudo envolveu a coleta, isolamento e identificação bacteriana para produzir esses aditivos, que foram então adicionados a corpos de prova de concreto com resistência característica de 250 kg/cm². Os corpos de prova foram testados em ensaios de compressão conforme normas específicas, aos 7, 14 e 28 dias. Além disso, corpos de prova prismáticos foram usados para avaliar a capacidade de reparação de microfissuras. Um total de 17 cepas bacterianas, todas com endósporos, foram isoladas e identificadas. Essas cepas foram inicialmente misturadas à argamassa em uma concentração de aproximadamente $3x10^8$ células bacterianas por ml, diluídas em caldo nutritivo, e aplicadas tanto na superfície quanto na mistura dos corpos de prova. Duas das cepas demonstraram a capacidade de precipitar carbonato de cálcio ($CaCO_3$), identificadas como cepas *de Paenibacillus lactis* e *Bacillus firmus*, ambas pertencentes ao gênero bacillus, com similaridades de 80,2% e 83,4%, respectivamente. Essas cepas foram usadas para criar aditivos bacterianos que foram incorporados superficialmente ou misturados à argamassa, resultando na

precipitação de $CaCO_3$. O percentual de reparação das fissuras no concreto foi calculado, demonstrando que as cepas de *Paenibacillus lactis* repararam as fissuras em 70% (fissura 1 de 2mm) e 80,6% (fissura 2 de 1mm), enquanto as cepas de *Bacillus firmus* repararam 68,3% (fissura 3 de 1mm, ambas após 28 dias. Os espécimes de bioconcreto, contendo os aditivos bacterianos, mostraram aumento na resistência à compressão em comparação com o concreto sem adições, sendo de 35,68% para as cepas de *Paenibacillus lactis* e 14,08% para as cepas de *Bacillus firmus*. A inclusão do aditivo bacteriano teve impacto positivo na reparação de fissuras controladas e na resistência mecânica do concreto (ASENJO ALARCÓN, 2019).

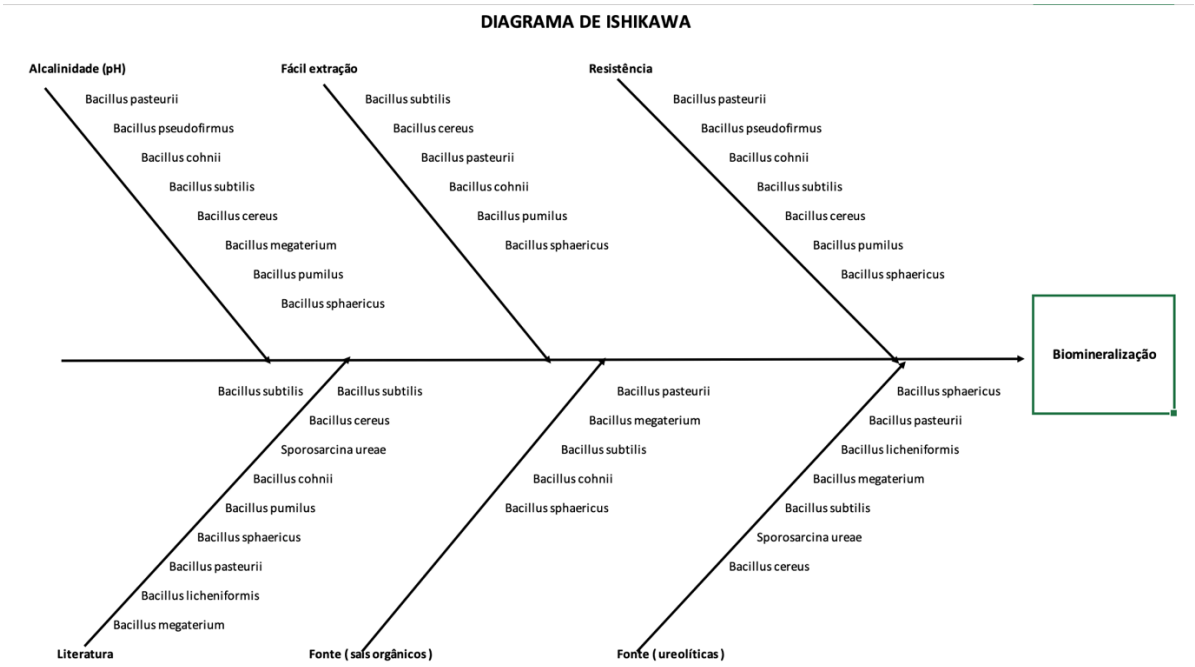
Outra pesquisa comparativa explorou a utilização de bactérias do gênero *Bacillus*, sendo uma delas frequentemente mencionado na literatura. Realizado em Arequipa, Peru, esse estudo analisou o impacto das bactérias *Bacillus subtilis* e *Paenibacillus polymyxa* nas propriedades do concreto convencional (resistência de 210 kg/cm²) e na reparação de microfissuras e fissuras. Foram avaliadas características de resistência, mínimos reparos no concreto e custos de produção, utilizando cimento Tipo IP Yura e Tipo IP Frontera, agregados das pedreiras *La Poderosa e Chiguata*. Para reparar microfissuras, foram aplicadas injeções de Solução A (*com Bacillus subtilis*) e Solução B (*com Paenibacillus polymyxa*), com cura em solução ou água, ou seja, nas soluções é adicionado bactérias e na água não. As soluções foram usadas em concentrações de 10%, 15% e 20%, e resistências foram analisadas aos 7, 14, 21 e 28 dias. Segundo Tejaba (2023) os resultados mostram que as soluções bacterianas repararam microfissuras por precipitação de cristais de carbonato de cálcio, aumentando a resistência após 28 dias. Os resultados indicaram que fissuras com até 0,3 mm foram completamente reparadas, enquanto fissuras com até 0,5 mm foram reparadas parcialmente. Fissuras maiores que 0,5 mm não puderam ser reparadas pelo processo de precipitação bacteriana de carbonato de cálcio.

Além disso, foi observado que as amostras que tiveram substituição da água por solução bacteriana apresentaram mais cristais de carbonato de cálcio do que as amostras que receberam injeção direta da solução bacteriana. No entanto, em ambos os grupos, uma quantidade significativa de cristais de cálcio foi encontrada, indicando que ambas as abordagens foram eficazes na formação desses cristais. Notavelmente, a solução de *Paenibacillus polymyxa* obteve melhores resultados que a de *Bacillus subtilis*. Observou-se formação de cristais de carbonato de cálcio pela interação das soluções com o concreto. A análise de custo/benefício indicou que adicionar bactérias em alguns projetos é mais vantajoso que um projeto convencional, aumentando a resistência e reduzindo custos (TEJABA, 2023).

Com base nesse conhecimento, foi conduzida uma análise de risco utilizando a ferramenta Ishikawa (Figura 7) para identificar os potenciais bactérias que se destacam no

processo de biomineralização. Esta análise enfatizou os fatores de alcalinidade (pH), disponibilidade, resistência, documentação na literatura, fontes através de sais orgânicos e, por fim, fontes ureolíticas, os quais as respectivas espécies são classificadas. Na figura 6 nota-se uma diversidade de espécies, sendo a maioria delas do gênero *Bacillus*.

Figura 7: Seleção de potenciais bactérias para biomineralização.



Alcalinidade (pH)	Fácil extração	Resistência	Literatura	Fonte (sais orgânicos)	Fonte (ureolíticas)
Bacillus pasteurii	*Bacillus subtilis*	*Bacillus pasteurii*	*Bacillus subtilis*	*Bacillus pasteurii*	*Bacillus sphaericus*
Bacillus pseudofirmus	*Bacillus cereus*	*Bacillus pseudofirmus*	*Bacillus cereus*	*Bacillus megaterium*	*Bacillus pasteurii*
Bacillus cohnii	*Bacillus pasteurii*	*Bacillus cohnii*	*Sporosarcina ureae*	*Bacillus subtilis*	*Bacillus licheniformis*
Bacillus subtilis	*Bacillus cohnii*	*Bacillus subtilis*	*Bacillus cohnii*	*Bacillus cohnii*	*Bacillus megaterium*
Bacillus cereus	*Bacillus pumilus*	*Bacillus cereus*	*Bacillus pumilus*	*Bacillus sphaericus*	*Bacillus subtilis*
Bacillus megaterium	*Bacillus sphaericus*	*Bacillus pumilus*	*Bacillus sphaericus*		*Sporosarcina ureae*
Bacillus pumilus		*Bacillus sphaericus*	*Bacillus pasteurii*		*Bacillus cereus*
Bacillus sphaericus			*Bacillus licheniformis*		
			Bacillus megaterium		
			Bacillus subtilis		

Fonte: Autor, 2024.

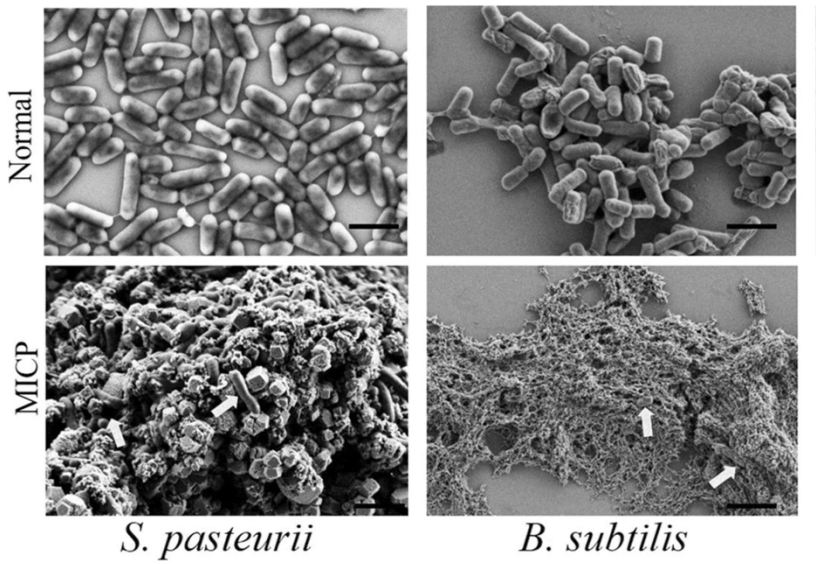
As bactérias gram-positivas, como *Bacillus pasteurii e Bacillus subtilis*, são amplamente reconhecidas como as melhores opções para a biomineralização do concreto, especialmente devido à sua eficiência na precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), um mineral crucial para a consolidação do material. As espécies *Bacillus pseudofirmus* e *Bacillus cohnii* se destacam principalmente pela alta resistência em ambientes alcalinos, além disso foram elas as pioneiras nos estudos do bioconcreto por Jonkers. Outro ponto é em relação a gama de dados e informações sobre o uso dessas bactérias. Estudos como os de Stocks-Fischer *et al.* (1999) e Gorospe *et al.* (2013) demonstram a capacidade dessas bactérias na produção de

enzimas, como a urease, que convertem a ureia em amônia e bicarbonato, promovendo assim a formação do carbonato de cálcio. Além disso, a formação de esporos por essas bactérias confere-lhes notável tolerância a condições ambientais adversas, incluindo variações de pH e temperatura. Essa resistência é essencial para garantir a sobrevivência e atividade metabólica das bactérias em ambientes alcalinos, como o concreto fresco. Outro aspecto crucial é a capacidade dessas bactérias de secretar uma variedade de proteínas e polímeros extracelulares, como observado nos estudos de Gorospe *et al.* (2013) e Hammes e Verstraete (2002), que desempenham um papel essencial na nucleação e crescimento do carbonato de cálcio. Essas substâncias contribuem significativamente para a formação de estruturas minerais estáveis e duráveis no concreto, fortalecendo sua estrutura ao preencher poros e fissuras. Com um histórico robusto de pesquisa e aplicação comprovada, *Bacillus pasteurii e Bacillus subtilis* destacam-se como as escolhas mais confiáveis e eficientes para a biomineralização do concreto.

No estudo realizado Liam Ma *et al.* (2020) a *Bacillus pasteurii* e a *Bacillus subtilis* foram cultivadas em meio *Tryptica Soy Broth* (TSB) com ureia apresentou formas celulares perfeitamente intactas. Após incubação com $CaCl_2$ e ureia, a forma de *Bacillus pasteurii* estava completa e embebida em substâncias aglomeradas, compostas principalmente de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Obviamente, a *Bacillus pasteurii* manteve uma estrutura celular altamente intacta mesmo sob a condição de mineralização.

Supõe-se que a bactéria não mineralizante *Bacillus subtilis* compartilhe uma parede celular semelhante à de *Bacillus pasteurii*, pois ambas são bactérias Gram-positivas. No entanto, *Bacilus subtilis* estava menos saudável em meio TSB com ureia do que *Bacillus pasteurii*. Na presença de $CaCl_2$ e ureia, poucas *Bacillus subtilis* malformadas foram observadas (Figura 7) entre os agregados maciços com uma estrutura porosa amorfa solta, indicando que a maioria das células de *Bacillus subtilis* havia lisado. As espécies foram cultivadas em TSB com 20 g/L de ureia (Normal) e tratadas com 1 mol/L de $CaCl_2$ e 1 mol/L de ureia (MICP). As setas brancas na Figura 8 mostram as células bacterianas.

Figura 8: *Bacillus pasteurii e Bacillus subtilis*.

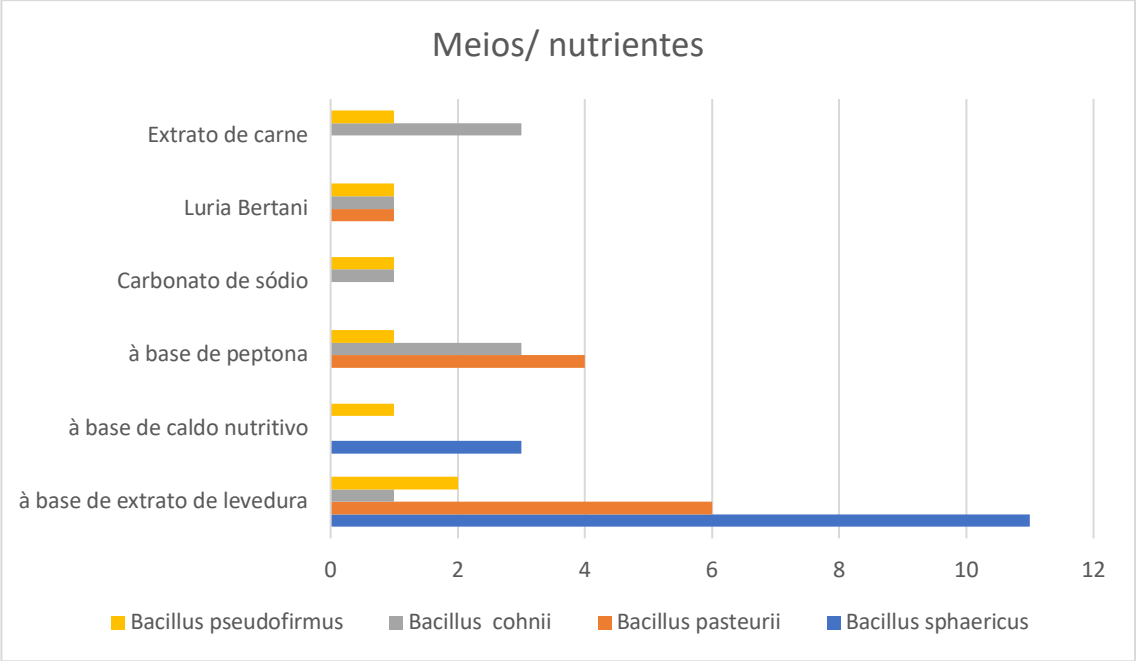


Fonte: LIAM MA *et al.,* 2020.

As setas brancas na Figura 8 mostram as células bacterianas. Liam Ma *et al.*, (2020) concluíram que a *Bacillus pasteurii* cresceu mais saudável em meio ligeiramente alcalino do que a bactéria não mineralizante *Bacillus subtilis*. Sob condição de mineralização, *Bacillus pasteurii* ainda estava em ótima forma, mesmo sendo cercada pela precipitação compacta de carbonato de cálcio. Em contraste, Bacillus subtilis ficou danificada e lisada dentro do agregado poroso solto amorfo. A estrutura robusta de Bacillus pasteurii sob as condições de mineralização desempenha um papel importante em sua superior capacidade de biomineralização, além de sua carga de superfície altamente negativa. Neste caso a *Bacillus subtilis* não obteve melhores resultados separadamente.

Conforme observado pelos autores Achal *et al.* (2015) e Jonkers *et al.* (2010) outro aspecto crucial é o meio de cultura das bactérias. Uma variedade de nutrientes e fontes de cálcio está disponível, como mostrado no gráfico a seguir. Esses meios de cultura/nutrientes são essenciais para o cultivo e crescimento das bactérias antes de serem adicionadas à matriz cimentícia. Por sua vez, os compostos utilizados na matriz cimentícia como fonte de cálcio desempenham um papel fundamental na precipitação do carbonato de cálcio após a incorporação das bactérias. Entre as espécies de bactérias estudadas, foi dada ênfase às bactérias do gênero *Bacillus*, com seus respectivos meios de cultura/nutrientes conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: Fontes nutricionais utilizadas pelas bactérias biomineralizadoras.



Fonte: Autor, 2024.

Observa-se uma ampla gama de meios nutricionais empregados para o cultivo bacteriano, o que pode estar associado à diversidade de bactérias utilizadas nos estudos. O crescimento de cada espécie pode ser influenciado pelo meio de cultura utilizado.

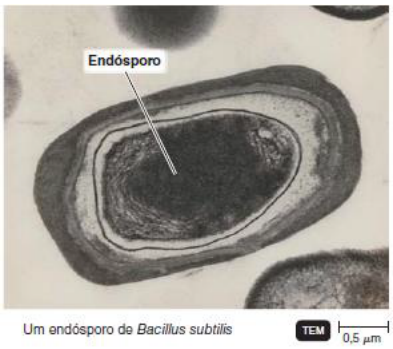
Apesar da variedade de meios de cultura disponíveis para o crescimento bacteriano, os pesquisadores têm predominantemente utilizado meios nutricionais padrão. Essa preferência se deve à facilidade de preparação, já que os ingredientes são amplamente conhecidos e disponíveis, bem como à padronização desses meios em termos de composição e concentração de nutrientes, permitindo resultados comparáveis entre diferentes estudos e laboratórios. Além disso, os meios de cultura padrão oferecem viabilidade econômica, pois são geralmente mais acessíveis em comparação com meios mais especializados, o que os torna uma opção econômica para experimentos em larga escala. Esses meios também proporcionam suporte ao crescimento bacteriano geral, uma vez que os ingredientes são cuidadosamente selecionados para fornecer uma ampla variedade de nutrientes, promovendo o crescimento de diversos tipos de bactérias e tornando-os adequados para estudos de microbiologia geral. Esses meios costumam conter caldo nutritivo, extrato de levedura, extrato de carne, peptona e glicose, refletindo uma preferência por meios ricos em proteínas de acordo com o padrão nutricional estabelecido. Esses nutrientes são escolhidos por sua capacidade de suportar o crescimento de uma ampla variedade de microorganismos.

O processo de autocicatrização por bactérias, especialmente do gênero Bacillus, envolve a selagem das fissuras pela precipitação de carbonato de cálcio a partir de compostos orgânicos que contêm cálcio, como nitrato de cálcio (WANG *et al*., 2014a), lactato de cálcio (JONKERS *et al.,* 2010), glutamato de cálcio (XU; YAO, 2014), acetato de cálcio (ALAZHARI *et al*., 2018) e cloreto de cálcio (VAN TITTELBOOM *et al.,* 2010).

Um dos principais desafios encontrados nesses materiais é o seu pH alcalino (pH > 11) (GUPTA; KUA; PANG, 2018; GUPTA; PANG; KUA, 2017). As bactérias capazes de crescer e sobreviver em um ambiente alcalino são denominadas alcalificas. Para se adaptar ao pH alcalino da matriz cimentícia, essas bactérias formam estruturas resistentes, conhecidas como esporos bacterianos ou endósporos (JONKERS *et al.,* 2010; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Esses esporos permitem que as bactérias permaneçam latentes na ausência de nutrientes e água por longos períodos, até que as condições se tornem favoráveis novamente para o seu desenvolvimento celular (DE KOSTER *et al.,* 2015).

As bactérias responsáveis pela produção de carbonato de cálcio podem formar endósporos aeróbicos (crescem na presença de oxigênio) ou anaeróbicos facultativos (crescem na presença ou ausência de oxigênio) (GOLLAPUDI *et al.,* 1995) (Figura 10). O tamanho típico dos esporos das bactérias do gênero Bacillus é de aproximadamente 1µm (JONKERS *et al.,* 2010).

Figura 10: Endósporo da bactéria *Bacillus subtilis*.



Fonte: TORTORA; FUNKE; CASE, 2017.

Estudos anteriores como os de Jonkers (2010) sobre bactérias como *Bacillus pasteurii*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cohnii* e *Bacillus pseudofirmus* sugerem que essas espécies têm uma boa capacidade de resistência ao pH elevado, com algumas variações entre as cepas. Por exemplo, algumas cepas de *Bacillus pasteurii* foram relatadas como capazes de crescer em pH tão alto quanto 12, enquanto outras podem tolerar um pH mais moderado em torno de 9 a 10. Para *Bacillus sphaericus*, estudos indicam que ele pode crescer em pH entre 8 e 11, com

algumas variações dependendo das condições específicas do ambiente. As cepas de *Bacillus cohnii* e *Bacillus pseudofirmus* também demonstraram resistência a pH alcalino, com capacidade de crescimento em valores de pH entre 9 e 11.

Além disso as bactérias do gênero *Bacillus*, incluindo algumas das mencionadas, como *Bacillus pasteurii*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cohnii* e *Bacillus pseudofirmus*, podem ser encontradas em vários ambientes naturais, como solo, água, sedimentos e até mesmo em organismos vivos. Aqui estão algumas fontes potenciais para encontrar essas bactérias (JONKERS *et al*., 2010):

- Solo: O solo é uma fonte comum de bactérias do gênero Bacillus. Elas podem ser isoladas de diferentes tipos de solo, incluindo solos naturais, agrícolas e florestais.
- Ambientes Aquáticos: Bactérias *Bacillus* também podem ser encontradas em ambientes aquáticos, como rios, lagos, oceanos e água subterrânea.
- Sedimentos: Sedimentos em corpos d'água ou em áreas costeiras também podem ser fontes de bactérias *Bacillus*.
- Ambientes Industriais: Em alguns casos, essas bactérias podem ser isoladas de ambientes industriais, como instalações de tratamento de águas residuais ou locais onde produtos à base de cimento são produzidos.
- Bancos de Cultura: Muitos laboratórios mantêm bancos de cultura de diferentes cepas bacterianas, incluindo algumas do gênero *Bacillus,* que podem ser adquiridas para pesquisa.

Existem vários fatores que devem ser considerados para a viabilidade do uso de bactérias do gênero bacillus no processo de biomineralização, dentre eles a eficiência de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), a versatilidade ambiental, segurança, durabilidade e resistência em ambientes cimentícios e a praticidade de aplicação (ACHAL, 2009; De Muynck, 2010; XU; YAO, 2014; Jonkers, 2011). Além disso, existem estudos que comprovam a eficiência da associação de mais de uma bactéria no processo de biomineralização.

Por exemplo, Yingying Hu *et al.* (2020) realizaram um estudo com as bactérias *Bacillus sphaericus* e *Bacillus oxysporum* associadas ao processo de biomineralização, sendo, o primeiro possui uma capacidade notável de produção de urease, enquanto o segundo pode secretar anidrase carbônica *in vitro, ou seja,* essa bactéria é capaz de produzir e liberar essa enzima fora do seu corpo celular, em um ambiente controlado de laboratório. Os mesmos autores observaram em seus resultados que, *Bacillus sphaericus* estava com ph entre 7 e 8, as concentrações ideais foram determinadas como 0,5 mol/L de ureia, 0,6 mol/L de Ca^{2+} e 20 g/L de meio LB. A proporção de 1:6 de *Bacillus mucilaginosus* para *Bacillus sphaericus* aumentou

significativamente a precipitação de carbonato de cálcio, atingindo 1,89 vezes a quantidade obtida *com Bacillus sphaericus* sozinho.

O componente principal dos produtos minerais das bactérias, tanto em cultivos isolados quanto combinados, é a vaterita. Além disso, eles contêm uma pequena quantidade de calcita. Os cristais das amostras mineralizadas são partículas esféricas de carbonato de cálcio, sendo que o tamanho das partículas dos produtos minerais das bactérias isoladas é ligeiramente maior. A estabilidade térmica dos produtos mineralizados das bactérias combinadas é ligeiramente superior à das bactérias isoladas (Yingying Hu *et al.,* 2020).

Portanto, a pesquisa forneceu informações valiosas sobre o desempenho da biomineralização de *Bacillus sphaericus* sob a influência de Bacillus *mucilaginosus*, demonstrando que a presença de *Bacillus mucilaginosus* aumentou efetivamente o rendimento de mineralização de *Bacillus sphaericus* sem comprometer a qualidade dos produtos mineralizados. Isso indica um potencial significativo para processos de biomineralização mais eficientes.

Outro estudo liderado por Huijie Huang *et al.* (2024), também com método de associação de mais microorganismos, só que desta vez o processo foi diferente, realizado com uma bactéria a (*Bacillus megaterium)* e um fungo (Saccharomyces *cerevisiae)*, foi observado resultados promissores no processo de biomineralização. Os resultados mostraram que quando a há proporção de *Saccharomyces cerevisiae* para *Bacillus megaterium* 30%:70%, existe um aumento de 10% na produção de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), resultando no melhor efeito de deposição de mineralização.

Sob a ação sinérgica dos dois microrganismos, a consolidação das fissuras ocorreu rapidamente e a estrutura porosa dentro das fissuras tornou-se mais densa, melhorando significativamente a permeabilidade, as taxas de reparo de força das amostras e a redução da velocidade do pulso. Para fissuras de 1,5 mm de largura, as taxas de reparo de permeabilidade e resistência foram de 63% e 35,12%, respectivamente, e a velocidade do pulso foi reduzida de 140 μs para 65 μs. O preenchimento das fissuras foi composto principalmente de cristais de $CaCO_3$ de 5–10 μm de tamanho, com o conteúdo total de cálcio do sistema de reparo multimicrobiano atingindo 39,5%, valor significativamente superior ao do sistema de reparo de componente único (36,1%) (HUIJIE HUANGE *et al.,* 2024).

Segundo os mesmos autores os resultados indicam que o sistema de reparo multimicrobiano mantém uma maior atividade de precipitação de cálcio em um ambiente de concreto alcalino de alta resistência, produzindo depósitos de $CaCO_3$ que melhoram a capacidade de reparo e o desempenho geral do concreto.

Portando, com base na seleção pelo diagrama de Ishikawa (Figura 6), considerando a escolha das espécies *Bacillus pasteurii* e *Bacillus subtilis* como potenciais bactérias no processo de biomineralização, uma outra análise foi realizada considerando suas vantagens e desvantagens no processo de biomineralização, especialmente em estruturas cimentícia conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Associação das bactérias do gênero *Bacillus*.

Bactéria	Vantagens	Desvantagens	Autor
Bacillus pasteurii	Alta eficiência na precipitação de $CaCO_3$; Facilidade de cultura (Cultivo e extração);	Sensibilidade ambiental; Menor durabilidade; Crescimento lento.	(ACHAL, 2009).
Bacillus subtilis	Versatilidade ambiental; Formação de biofilmes; Produção de exopolissacarídeos;	Eficiência moderada.	(CEZÁRIO *et al.,* 2019).

Fonte: Autor, 2024.

Segundo Achal *et al.* (2009) a escolha da *Bacillus pasteurii* no processo de biomineralização está relacionado a sua alta eficiência na precipitação do carbonato de cálcio, resultando em precipitações mais rápidas e robustas, outra característica importante segundo ele está relacionada a facilidade de cultura no laboratório ou em campo. Em um de seus estudos com a *Bacillus pasteurii,* foram encontrados resultados com melhorias na atividade urease colaborando na precipitação de calcita e sobrevivência em ambientes com pH elevado, atingindo o objetivo final que é fechar fissuras em estruturas de concreto.

Contudo existem algumas desvantagens a serem consideradas como sensibilidade ambiental, quando o microorganismo exposto em ambientes com condições extremas, onde há variações de temperatura e umidade.

A *Bacillus subtilis* é a mais comum das bactérias no processo de autocura de estruturas em concreto com o processo de biomineralização pela precipitação do carbonato de cálcio (SCHWANTES-CEZÁRIO *et al.,* 2020). Considerada geralmente segura e não patogênica,

facilitando o manuseio em aplicações industriais. Além disso outras vantagens a considerar é em relação a sua versatilidade ambiental, onde ela é capaz de resistir em ambientes com temperaturas extremas, variação de úmida e pH.

Outras características importantes são a formação de biofilmes, esses biofilmes ajudam na adesão de às superfícies do concreto e na distribuição uniforme da biomineralização e a produção de exopolissacárideos que ajudam a unir as partículas de $CaCO_3$, fortalecendo o material calcificado (DE MUYNCK, 2010). Embora eficiente, a precipitação de $CaCO_3$ pode não ser tão rápida quanto a de *Bacillus pasteurii*.

Schwants-Cezário *et al.,* (2019) afirmam que a *Bacillus subtilis* com a formação de endósporos, um procedimento comum nas bactérias do gênero Bacillus que podem garantir melhor desempenho em ambientes com condições extremas, colaborando em resultados favoráveis no processo de biomineralização, mas sua menor eficiência na precipitação de carbonato de cálcio e durabilidade moderada limitam sua viabilidade em comparação com *Bacillus pasteurii.* Contudo todas as duas possuem características viáveis no processo de biomineralização e que irá depender do ambiente e do processo do uso de cada uma delas.

Com base nesse conhecimento, a associação da *Bacillus pasteurii* e a *Bacillus subtilis* poderão trazer melhores resultados se forem associadas e assim em futuros estudos poderão desenvolver melhorias e criar bioprodutos que facilitarão ainda mais o processo de fechamento de fissuras por biomineralização. Embora alguns desses produtos já existam na literatura, acredita-se que novas versões aprimoradas poderão ser desenvolvidas para otimizar a eficácia e a eficiência desse processo.

Diretrizes de potenciais bactérias

Em resumo, as diretrizes para solucionar fissuras no concreto são definidas com base no Diagrama de Ishikawa e os 6Ms, que ajudam a identificar as causas dessa patologia. Com essa identificação, é possível selecionar potenciais bactérias para o processo de biomineralização, visando resolver os problemas em estruturas de concreto, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Diretrizes do uso de bactérias.

Causa	Por que?	Quando	Onde?	Como?	Quem?
Construções	Fissuras	Aparição de fissuras	Casas, edifícios, tuneis, pontes, barragens, etc.,	Biomineralização	*Bacillus subtilis e Bacillus pasteuirii*
Ação	Fissuras	Aparição de fissuras	Vibrações excessivas, agregação química, carga excessiva, etc.,	Biomineralização	*Bacillus subtilis e Bacillus pasteuirii*
Máquina	Fissuras	Aparição de fissuras	Trens, veículos pesados aeronaves, etc.,	Biomineralização	*Bacillus subtilis e Bacillus pasteuirii*
Material (concreto)	Fissuras	Aparição de fissuras	Erro na mistura do concreto, material de má qualidade, cura precoce, etc.,	Biomineralização	*Bacillus subtilis e Bacillus pasteuirii*
Meio ambiente	Fissuras	Aparição de fissuras	Áreas sísmicas, variação de temperatura, chuvas ácidas, variação da umidade, etc.,	Biomineralização	*Bacillus pasteurii*
Mão de obra	Fissuras	Aparição de fissuras	Falha humana, falha de projeto, erro de cálculo estrutural, etc.,	Biomineralização	*Bacillus subtilis e Bacillus pasteuirii*

Fonte: Autor, 2024.

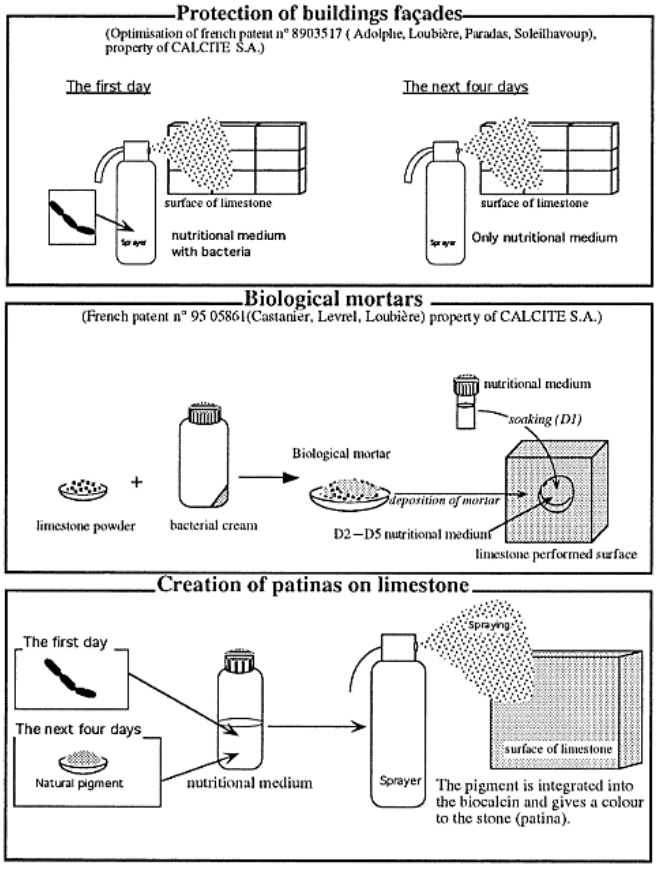
A Tabela 3 apresenta uma análise das causas e possíveis soluções para o fechamento de fissuras em estruturas de concreto, com ênfase no processo de biomineralização, utilizando as bactérias *Bacillus subtilis e Sporosarcina pasteurii* (anteriormente conhecida como *Bacillus pasteurii*). Essa análise destaca claramente o potencial desses microrganismos na criação de bioprodutos (produtos biotecnológicos) capazes de promover o fechamento eficaz de fissuras no concreto.

Produtos

Em estudos anteriores, inclusive com o desenvolvimento de um produto patenteado, foram exploradas abordagens para tratar fissuras. Adolphe *et al.* (1990), com a colaboração de Castanier *et al*. (1995) e Le Metayer-Levrel *et al*. (1999), desenvolveram uma cultura bacteriana em formato de spray com o propósito de proteger edifícios, monumentos e estátuas feitos de pedra calcária. Eles constataram que, após a aplicação do produto patenteado denominado "*biocalcin*", bactérias produtoras de carbonato de cálcio colonizaram a superfície tratada formando uma camada protetora conforme a Figura 11. O primeiro quadrante mostra a aplicação do produto diretamente a superfície de fachadas de calcário, dentro da mistura está encontrasse as bactérias e meio nutriente (o alimento das bactérias) após os próximos 4 dias é necessário adicionar mais nutrientes para o desenvolvimento dos microorganismos. Outro

método é pela argamassa biológica, onde em sua composição é utilizado o pó de calcário, mais a bactéria e o meio nutriente, logo depois a argamassa é depositada no corpo de prova (calcário), por fim os meios nutricionais são imersos a superfície do corpo de prova. O último processo é a criação de patinas em calcário, no primeiro dia é colocado a bactéria junto com os meios de nutrição e nos próximos 4 dias é adicionado a pigmentação natural, este pigmento é adicionado à matriz biológica do *biocalcin,* que é formada pela atividade microbiana que mineraliza os íons de cálcio, resultando em uma camada mineral na superfície da pedra. Quando pigmentos naturais são introduzidos nesse processo, eles se misturam com o *biocalcin,* alterando sua cor e dando à pedra uma aparência característica, conhecida como patina. Essa patina pode variar em cor e tonalidade, dependendo dos pigmentos naturais utilizados e das condições ambientais durante o processo de formação.

Figura 11: Variação no processo de Biomineralização.



Fonte: Métayer-Levrel *et al*., 1999.

O trabalho de Jean-Pierre Adolphe (1990), detalhado em sua tese de doutorado, descreve depósitos carbonatados, como tufas e travertinos, formados por microrganismos, incluindo algas, fungos e principalmente bactérias. Na presente invenção, esses microrganismos mineralizadores são selecionados principalmente entre famílias bacterianas, como *Bacillaceae*

(especialmente *Bacillus*), *Pseudomonadaceae* (especialmente *Pseudomonas*) e *Enterobacteriaceae* (especialmente *Proteus*). Como exemplo específico de microrganismos utilizáveis no âmbito da invenção, podem ser citados: *Bacillus brevis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas stutzerii* e *Proteus mirabilis.* A lista de microrganismos não é de forma alguma limitada segundo o autor. O método envolve o contato desses microrganismos com a superfície a ser tratada em um meio líquido que permite a mineralização. Após a aplicação, o meio de cultura é periodicamente renovado para promover o desenvolvimento ideal do *calcin*, uma camada mineral formada pela atividade bacteriana que fortalece e protege a superfície tratada. O método pode ser aplicado em uma variedade de superfícies artificiais, como calcário, brique, concreto, entre outros, e tem potencial para melhorar a resistência às intempéries e prevenir danos causados por bactérias degradantes de materiais de construção (ADOLPHE, 1990).

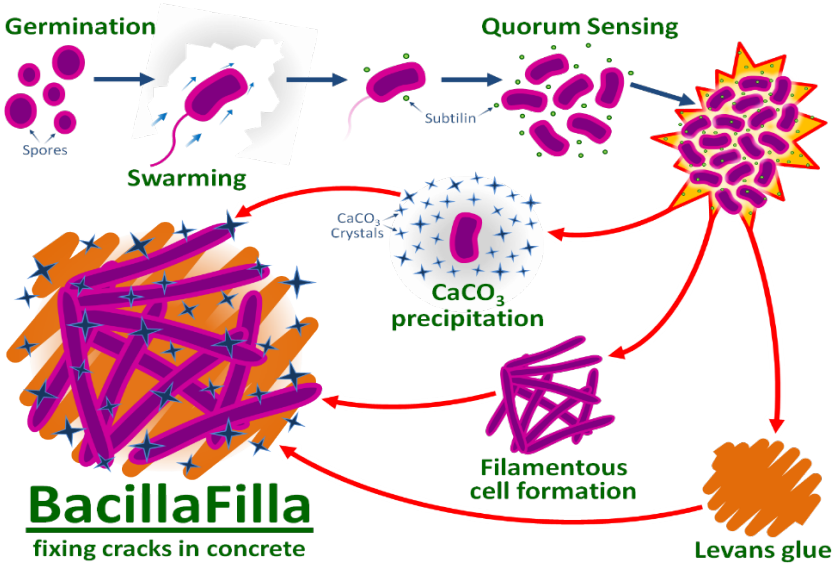
Em um outro estudo, realizado em 2010 por pesquisadores da Universidade de Newcastle, foi desenvolvida uma cepa geneticamente modificada de *Bacillus subtilis* chamada de a *BacillaFilla,* com o objetivo de reparar fissuras no concreto que podem levar a falhas estruturais catastróficas. A aplicação da *BacillaFilla* seria feita nas estruturas através de pulverização em suas superfícies (DILLOW, 2010).

Essas bactérias têm a capacidade de unir fissuras em estruturas de concreto, produzindo uma espécie de "cola especial". O concreto resultante foi denominado de Concreto Bacteriano. Para fabricar o Concreto Bacteriano, as bactérias são incorporadas no concreto e têm a capacidade de precipitar constantemente calcita (DILLOW, 2010). Esse processo é conhecido como *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP). Sob condições favoráveis, como a presença de *BacillaFilla*, uma bactéria comum do solo, pode-se precipitar continuamente uma nova camada de calcita altamente impermeável sobre a superfície do concreto existente.

Uma vez aplicada, a *BacillaFilla* penetra profundamente nas fissuras. O reparo é realizado pela produção de $CaCO_3$, células filamentares de *Bacillus subtilis* e uma cola de *levansucrose*. A *levansucrose* é uma enzima produzida por algumas cepas de bactérias, incluindo *Bacillus subtilis*, que catalisa a síntese de um polissacarídeo chamado *levan* a partir de sacarose (açúcar comum). O *levan* é um polissacarídeo composto por unidades de frutose, que formam uma estrutura semelhante a uma cadeia ramificada. O $CaCO_3$ expande na mesma taxa que o concreto, tornando-se um material de preenchimento ideal (IGEM, 2010). As células filamentares de *Bacillus subtilis* possuem resistência à tração semelhante às fibras sintéticas usadas no concreto reforçado com fibras, fornecendo reforço adicional.

A cola de *levansucrose* fixa o $CaCO_3$ e as células filamentares no lugar, fechando as fissuras. Em resumo, a "cola de levano" é uma substância viscosa produzida pela atividade enzimática das bactérias (Figura 12), que auxilia na adesão e na fixação de materiais durante o processo de reparo do concreto (IGEM, 2010).

Figura 12: Processo da *BacillaFilla*.



Fonte: IGEM, 2010.

Por fim, o uso de bactérias no processo de biomineralização (MICP), é um processo mais complexo e lento em comparação com métodos químicos. Em geral, os métodos químicos de biomineralização tendem a ser mais rápidos em comparação com os processos biológicos envolvendo microorganismos. Isso ocorre porque os métodos químicos envolvem reações químicas diretas que podem ser aceleradas por meio do controle de parâmetros como temperatura, pH e concentração de reagentes.

Por outro lado, os processos biológicos que envolvem microorganismos para biomineralização podem ser mais lentos devido à necessidade de crescimento, metabolismo e atividades biológicas dos microorganismos. O tempo necessário para que os microorganismos promovam a biomineralização pode variar dependendo de fatores como a atividade microbiana, influenciada por vários fatores ambientais, como temperatura, pH, concentrações de doadores e receptores de elétrons, além das taxas de difusão de nutrientes e metabólitos.

Em resumo, os métodos químicos de biomineralização oferecem maior controle e previsibilidade, enquanto os microorganismos para biomineralização podem oferecer uma abordagem mais sustentável e biológica (DHAMI *et al.,* 2013).

A biocimentação promovida pela MICP também apresenta desafios a serem superados. Por exemplo, o processo comumente requer grandes quantidades de cloreto de cálcio como fonte de cálcio, o que é caro e prejudicial ao meio ambiente. No entanto, esforços têm sido feitos para desenvolver fontes alternativas, como a Precipitação de Carbonato Induzida por Plantas (PICP), que utiliza soja reativa à urease para induzir a precipitação de calcita para cimentação de areia (REIS, 2017).

O campo da biomineralização possui potencial em diversos setores, mas requer a colaboração de especialistas de diversas áreas para abordar questões de pesquisa e desenvolvimento necessárias para aplicações em escala comercial (DHAMI *et al.,* 2013). Segundo Jonkers *et al.* (2010), a escolha do microrganismo é crucial, pois deve ser resistente a ambientes alcalinos (alcalinofílicos), como o concreto, e capaz de formar esporos para sobreviver às condições ambientais adversas, além de não ser patogênico para a saúde humana e ambiental.

Em resumo, a biomineralização por meio do método MICP ainda está em estágio inicial, exigindo estudos mais detalhados para considerar uma ampla gama de fatores e variáveis interferentes no processo de produção e aplicação, especialmente em argamassas de reparo. No entanto, as pesquisas já realizadas mostram resultados promissores, indicando a possibilidade de desenvolver materiais sustentáveis capazes de substituir parcialmente os produtos industriais convencionais.

CONCLUSÃO

O processo de biomineralização está se tornando cada vez mais relevante na ciência, especialmente em estudos que investigam bactérias capazes de regenerar estruturas de concreto. Bactérias, principalmente do gênero *Bacillus*, têm a capacidade de sobreviver em ambientes alcalinos, como a matriz cimentícia presente nas estruturas de concreto e capazes de precipitar o carbonato de cálcio, principal meio para o processo de biomineralização acontecer. Isso ressalta a importância da escolha de bactérias adequadas para esse meio.

Considerando a seleção de potenciais bactérias para biomineralização pela ferramenta (Ishikawa), as espécies que se destacam na pesquisa são a *Bacillus pasteurii* e *Bacillus subtilis,* foi observado o potencial uso desses microorganismos para obter resultados favoráveis no processo de biomineralização, devido à sua capacidade eficiente de precipitar carbonato de cálcio ($CaCO_3$), por produzirem urease, uma enzima que catalisa a hidrólise da ureia, resultando em um aumento local do pH e na formação de íons carbonato, que precipitam como carbonato de cálcio, robustas e adaptáveis a diferentes ambientes, além de ser capaz de formar biofilmes

que ajudam na fixação do carbonato de cálcio, promovendo a regeneração de fissuras de maneira eficaz e duradoura.

Também foi observada a sinergia dessas espécies, que podem ser associadas para o mesmo objetivo de fechar fissuras em estruturas de concreto, proporcionando uma abordagem combinada e potencialmente mais eficaz para a reparação dessas estruturas.

REFERÊNCIAS

ACHAL, V. *et al*. Biomineralization for sustainable construction - A review of processes and applications. Earth-Science Reviews, v. 148, p. 1–17, 2015.

ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; BASU, P. C.; REDDY, M. S. Strain improvement of Sporosarcina pasteurii for enhanced urease and calcite production. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v.36, n.7, p. 981-988, 2009.

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

ADOLPHE, J.P.; LOUBIÈRE, J.F.; PARADAS, J.; SOLEILHAVOUP, F. **Procèdè de traitement biologique d'une surface artificielle**. Depositante: Universite Pierre et Marie Curie Paris VI. 90400697.0. Depósito: 15 mar. 1990. Concessão: 29 set. 1994. Disponível em: https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=1133241&iFormat=0. Acesso em: 18 mar. 2024.

AL-SALLOUM, Yousef; ABBAS, H.; SHEIKH, Q.I.; HADI, S.; ALSAYED, Saleh; ALMUSALLAM, Tarek. Effect of some biotic factors on microbially-induced calcite precipitation in cement mortar. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 24, n. 2, p. 286-294, fev. 2017. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X16000188. Acesso em: 20 mar. 2024.

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

ALMEIDA, J.; THOME, A.; TONIAL, F.; SIQUEIRA, G. do N. Isolamento e Avaliação de bactérias do gênero Bacillus com o potencial para uso em biocimentação na produção de argamassas. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 97-107. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1300. Acesso em: 13 maio. 2024.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)**. Farmington Hills: ACI, 2019.

ASENJO, Alarcón, Edinsson Dennis. **Influencia de la incorporacíon del aditivo bacteriano em la reparacíon del proceso de fisuracíon controlada del concreto**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Peru, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2019**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARBOSA, Deorlan dos Santos; DE MORAES, Tatiane Faustino. Bioconcreto: uma revisão da sua aplicação no fechamento de fissuras. **Revista Científica UMC**, *[S. l.]*, v. 8, n. 3, p.

e080300011, 2023. Disponível em: https://seer.umc.br/index.php/revistaumc/article/view/1946. Acesso em: 13 jul. 2024.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. c2024. Disponível em: http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland. Acesso em:09 mar. 2023.

CASTANIER, S.; Métayer-Levrel, G. Le; Loubière, J.F. Nouvelles compositions pour mortier biologique, proceed de recouvrement d'un surface ou de comblement d'une cavité a l'aide des compositions. 1995. French Patent 95 05861.

CBIC revisa projeção de crescimento e construção deve crescer 1,5% em 2023. **AGÊNCIA CBIC**, Brasília, 31 jul. 2023. Disponível em: https://cbic.org.br/cbic-revisa-projecao-de-crescimento-e-construcao-deve-crescer-15-em-2023/#:~:text=31%2F07%2F2023-,CBIC%20revisa%20proje%C3%A7%C3%A3o%20de%20crescimento%20e%20constru%C3%A7%C3%A3o%20deve%20crescer%201,1%2C5%25%20em%202023. Acesso em: 13 nov. 2023.

CHAURASIA, Leena; VERMA, Rajesh K and BISHT, Vishakha. Microbial Carbonate Precipitation by Urease Producing Bacteria in Cementitious Materials. International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR), Vol5, Issue 4, 2014, p671-679. Disponível em: <http://bipublication.com/files/IJABR-V5I4-2014-14.pdf>, acesso em 20 mar. 2024.

CONSTRUÇÃO civil gera mais empregos do que outro setor nos primeiros meses de 2023. **G1 Globo.com**, 10 jul. 2023. Disponível: https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2023/07/10/construcao-civil-gera-mais-empregos-do-que-qualquer-outro-setor-nos-primeiros-meses-de-2023.ghtml .Acesso em: 13 nov. 2023.

DA SILVA COSTA, Andressa e Rodrigues Aparecido, Flávio. Desenvolvimento de concretos auto curáveis utilizando a bactéria *Bacillus megaterium*. Revista Cientifica UMC. Universidade de Mogi das Cruzes, 2018.

DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 118–136, 2010.

DHAMI, N. K.; SUDHAKARA REDDY, M.; MUKHERJEE, A. Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages. Frontiers in Microbiology, v. 5, n. 304, p. 1–12, 2014.

DILLOW, C. Engineered bacteria can fill cracks in aging concrete. **Popular Science**, 17 nov. 2010. Disponível em: http://www.popsci.com/science/article/2010-11/modified-bacterial-glue-can-shore-cracking-concrete. Acesso em: 29 abr. 2024.

PALADINI, Edson; CARVALHO, Marly M. (coord.). **Gestão da Qualidade**: teorias e casos. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Campus, 2012.

FREITAS, A. A. et al. Bioconcreto: Uma revisão de sua aplicação na construção civil. Universidade do Estado de Minas Gerais, 14 de abr. 2021.

GAMBALE, P. G. Estudo do Calor de Hidratação do Concreto Massa e Contribuição ao Cálculo Térmico e à Previsão de Fissuras de Retração. [s.l].Universidade Federal de Goiás, 2017.

GHELLERE, Polyana. Seleção de Bactérias Produtoras de $CaCO_3$ na Recuperação de Fissuras dos Materiais a Base de Cimento. Universidade Federal da Integração Latino – Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós- Graduação. Foz do Iguaçu, 2021.

HUIJIE HUANG, et al. Enhancing concrete crack healing: Revealing the synergistic impacts of multicomponent microbial repair systems. Case Studies in Construction Materials 21 (2024) e03402. Ordos Institute of Liaoning Technical University, Ordos, China, College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China, 2024.

IGEM. **BacillaFilla**: Fixing Cracks Concrete. 2010. Disponível: https://2010.igem.org/Team:Newcastle. Acesso em: 29 abr. 2024.

ISAIA, Geraldo Cechella. IBRACON – Concreto Ensino Pesquisa e Realizações. 1ª Ed. Vol. 1 e 2. Distribuidora Curitiba de papeis e Livros S/A, 2010.

JONKERS, Henk M. Bacteria-based self-healing concrete. Heron, 56 (1/2), 2011.

JONKERS, Henk M. Self-healing concrete: A biological approach. *In*: ZWAAG, Vander. **Self-healing materials**: an alternative approach to 20 centuries of materials science. Netherlands: Springer, 2007. p. 195-204.

JONKERS, Henk M., A., Muyzer, G. Copuroglu, O., Schlangen, E. "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", Ecological Engineering, V. 36, p.230-235, 2010.

KOGA, D.S.; SANTOS, L.M. **Bioconcreto**: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, 2020.

LIAM MA, et al. (2020). Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium Sporosarcina pasteurii. Microb Cell Fact (2020) 19:12 zhttps://doi.org/10.1186/s12934-020-1281-z.

MÂNICA, Graciela. **Utilização de microrganismo autógeno para recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Lajeado-RS, 2019.

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo et. Al magnesium industry waste for partial replacement of Portland cement. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, 2020.

MEDEIROS, João Victor. Concreto Sustentável: O estudo do estado da arte. Universidade Federal do Mato Grosso, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.

MÉTAYER-LEVREL, G. Le; 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. Sedimentary Geology. Vol. 126, 1999, pg. 25-34. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073899000299>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MIGUEL, Paulo. Qualidade: Enfoques e Ferramentas. 1. Ed. Artliber, 2006.

MINJOO, P., Sungjin, P., Ji-Yeon, Y., Yerin, K., Kwang Min, Lee, Dae-Youn, H., Hong-Joo Son. Enzyme-mediated biocalcification by a novel alkaliphilic *Bacillus psychrodurans* LC40 and its eco-friendly application as a biosealant for crack healing. Science of The Total Environment vol. 802, 149841, 2022.

MONDAL, Sadip; GOSH, Aparna. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. **Construction and Building Materials**, [*S.l.*], v. 225, p.67-75, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819317969?via%3Dihub. Acesso em: 2 nov. 2023.

NGUYEN, T. H. et al. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. Cement and Concrete Composites, v. 104, p. 1–15, 2019.

PIB cresce 4,6% em 2021 e fecha o ano em R$ 8,7 trilhões. **Agência IBGE Notícias**, Rio de Janeiro, 04 mar. 2022. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/33067-pib-cresce-4-6-em-2021-e-fecha-o-ano-em-r-8-7-trilhoes#:~:text=Em%202021%2C%20o%20PIB%20(Produto,Agropecu%C3%A1ria%20(%2D0%2C2%25).&text=O%20PIB%20totalizou%20R%24%208%2C7%20trilh%C3%B5es%20em%202021. Acesso em: 13 nov. 2023.

REIS, L.G.V. Biotecnologia Microbiana da construção: potencial de biomineralização de bactérias ureolíticas de solo de cerrado e de rejeitos da construção civil. Dissertação - (Mestrado em Ciências Ambientais) –Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

RIPPER, Thomaz; SOUZA, Vicente; MOREIRA, Custódio. **Patologias, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 1998.

SANTOS, J.R., Effting, Carmeane, Serbent, P. Maria, Matsuda, B. Josie. Biomineralização de carbonato de cálcio no concreto pela ação do *Bacillus pumilus*. Rev. Eng. Sanit Ambient v. 28, e20220277, 2023 Universidade do Estado de Santa Catarina, SC, 2023.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Mortars with the addition of bacterial spores: Evaluation of porosity using different test methods. Journal of Building Engineering, v. 30, p. 1–10, 2020.

SEIFAN, M., SAMANI, A.K. & BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. Applied Microbiology and Biotecnology v. 100, p. 2591–2602, 2016. Disponível em: < https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>. Acesso em: 18 mar. 2024.

TAY, Joo-Hwa; Show, Kuan-Yeow. Innovative Civil Engineering Material from Sewage Sludge: Biocement and its use as Blended Cement Material. Journal of Materials in Engineering. Vol. 6, Issue 1, Fev. 1994. Disponível em: https://ascelibrary- rg. ez116.periodicos. capes.gov.br/doi/10.1061/%28ASCE%2908991561%281994% 296%3A1%2823%29o. Acesso em: 20 mar. 2024.

TEJADA, Mendoza *et al*., Análisis de la resistencia a la compresíon de un concreto incorporado com las bactérias *Bacillus subtilis* y *Paenibacillus polymyxa* como bioreparadores. Universidad Católica de Arquitectura e Ingenierías Civil y del ambiente. Arequipa, Peru, 2023.

WANG, J.Y. et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and Concrete Research v. 56, p. 139–152, 2014. Disponível em:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613002482>. Acesso em: 18 mar. 2024.

XU, J., & Yao, W. (2014). Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. *Cement and Concrete Research*, 64, 1-10.

YINGYING HU, et al. (2020). Biomineralization Performance of Bacillus sphaericus under the Bacillus mucilaginosus. Action of. Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering Vol. 2020, Article ID 6483803, 9 pages. https://doi.org/10.1155/2020/6483803.

ZANZARINI, J. C. Análise das causas e recuperação em edificação em alvenaria estrutural-Estudo de caso. Universidade Federal do Paraná, 2016.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do bioconcreto, embasada cientificamente, apresenta inúmeros benefícios em comparação ao concreto convencional na construção civil. A revisão bibliográfica revelou que o bioconcreto é uma alternativa mais sustentável e promissora para remediar problemas patológicos relacionados às fissuras do concreto, com vantagens em termos de sustentabilidade, evitando o uso excessivo de reparos com materiais industriais. O processo de biomineralização está ganhando crescente relevância na ciência, especialmente em estudos sobre bactérias que regeneram estruturas de concreto.

Pela seleção de potenciais bactérias para biomineralização realizada pela ferramenta de tomada de decisão (Ishikawa), foi observado que as bactérias do gênero *Bacillus* são as melhores opções para o processo de biomineralização, em especial *a Bacillus subtilis* e a *Bacillus pasteuri* considerando a resistência em ambientes cimentícios a formação endósporos que colaboram na sua sobrevivência. Outro ponto importante é a possibilidade de um processo de biomineralização multimicrobiano, sendo possível uma associação do uso dessas espécies com o mesmo objetivo de regenerar fissuras em estruturas de concreto.

Além disso, fatores como a facilidade de extração e os custos de obtenção desses microrganismos e seus meios de cultivo tornam viável o uso específico dessas bactérias para o desenvolvimento de um novo produto biotecnológico. Com os resultados obtidos pela ferramenta para tomada de decisão foi possível identificar com maior precisão quais bactérias podem ser aplicadas de forma mais eficaz no processo de biomineralização, assim poupando tempo e agilizando em novas pesquisas para realizar fechamentos de fissuras em estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo *et al*. Al magnesium industry waste for partial replacement of Portland cement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 6, p. e13611, 2020.

MÂNICA, Graciela. **Utilização de microrganismo autógeno para recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Lajeado-RS, 2019.

MONDAL, Sadip; GOSH, Aparna. Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. **Construction and Building Materials**, [*S.l.*], v. 225, p.67-75, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819317969?via%3Dihub. Acesso em: 2 nov. 2023.

KOGA, D.S.; SANTOS, L.M. **Bioconcreto**: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, 2020.

DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 118–136, 2010.