



unifaema

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAEMA – UNIFAEMA

ANTONIO MENEZES NETO

MAICON DA SILVA CAMPOS

**MÉTODO DE AUTOREGENERAÇÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DE CULTURA
BACTERIANA *BACILLUS SUBTILIS***

**ARIQUEMES - RO
2024**

ANTONIO MENEZES NETO
MAICON DA SILVA CAMPOS

**MÉTODO DE AUTOREGENERAÇÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DE CULTURA
BACTERIANA *BACILLUS SUBTILIS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil

Orientador (a): Prof. Gustavo Nazarko Ferreira de Souza

ARIQUEMES - RO
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M541m Menezes Neto, Antonio.

Método de autorregeneração do concreto através de cultura bacteriana *Bacillus subtilis*. / Antonio Menezes Neto, Maicon da Silva Campos. Ariquemes, RO: Centro Universitário Faema – UNIFAEMA, 2024.

44 f. ; il.

Orientador: Prof. Esp. Gustavo Nazarko Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Centro Universitário Faema – UNIFAEMA, Ariquemes/RO, 2024.

1. Concreto. 2. *Bacillus Subtilis*. 3. Solução bacteriana. 4. Recuperação estrutural. 5. Regeneração de fissuras. I. Título. II. Campos, Maicon da Silva. III. Ferreira, Gustavo Nazarko.

CDD 624

Bibliotecária Responsável
Isabelle da Silva Souza
CRB 1148/11

ANTONIO MENEZES NETO
MAICON DA SILVA CAMPOS

**MÉTODO DE AUTOREGENERAÇÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DE CULTURA
BACTERIANA *BACILLUS SUBTILIS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil do Centro
Universitário FAEMA – UNIFAEMA como pré-
requisito para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Civil

Orientador (a): Prof. Gustavo Nazarko Ferreira
de Souza

BANCA EXAMINADORA

Assinado digitalmente por GUSTAVO NAZARKO FERREIRA DE SOUZA
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: UNIFAEMA - ARIQUEMES, RO
Data: 2024.11.22 20:40:52-04'00'

Prof. Gustavo Nazarko Ferreira de Souza
Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA

Assinado digitalmente por: FELIPE CORDEIRO DE
LIMA
Razão: Sou responsável pelo documento
Localização: UNIFAEMA - Ariquemes/RO

Prof. Me. Felipe Cordeiro de Lima
Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA

Assinado digitalmente por: ROEMIR PERES
MACHADO MOREIRA
Razão: Sou Responsável pelo Documento
Localização: UNIFAEMA - Ariquemes/RO
O tempo: 28-11-2024 16:15:00

Prof. Dr. Roemir Peres Machado Moreira
Centro Universitário FAEMA – UNIFAEMA

ARIQUEMES – RO
2024

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e amigos, que me apoiaram e incentivaram a seguir em frente com meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa não apenas uma educação acadêmica, mas também um marco importante em nossas vidas, e sua conclusão só foi possível graças ao apoio de muitas pessoas que nos acompanharam nessa jornada.

Primeiramente, agradecemos a Deus, que nos concedeu força e sabedoria nos momentos de desafio. Aos nossos pais, que sempre acreditaram em nós, oferecendo apoio incondicional e enviando exemplos de perseverança e dedicação. Sem o amor e os valores que nos transmitiram, nada disso seria possível.

Agradecemos ao nosso orientador, Gustavo Nazarko Ferreira de Souza, que, com paciência e conhecimento, nos guiou ao longo deste processo. Suas orientações e sua experiência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e somos gratos por toda a atenção e incentivo.

Aos amigos e colegas, que compartilharam conosco não apenas o aprendizado, mas também as dificuldades e as alegrias desta caminhada. A cada um de vocês, nosso sincero obrigado pelo apoio e pela amizade.

Finalmente, agradecemos às nossas parceiras de vida, que foram nossa maior fonte de motivação e inspiração. À Maria Flavia Lopes Rodrigue e à Melissa dos Santos Araujo, que com paciência, compreensão e amor estiveram ao nosso lado em cada etapa, compartilhando sonhos e desafios e nos incentivando a seguir adiante.

Este trabalho também é de todos vocês. Obrigado por fazerem parte desta história.

“A natureza é a maior de todas as invenções. Nada se perde, tudo se transforma.” – Antoine Lavoisier

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Local de Coleta	28
Figura 2 - Medição de pH via pHmetro.....	28
Figura 3 - Placas semeadas com lactato de cálcio.	29
Figura 4 - Colônia de bactérias na placa petri	30
Figura 5 - Corpos de Prova	31

LISTA DE SIGLAS

RO – Rondônia

CO₂ – Dióxido de Carbono

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

FIHP -- Federación Iberoamericana de Hormigón Pré-mesclado

Mpa – Mega Pascal

FCK - Feature Compression Know

C₆H₁₀CaO₆ - Lactato de Cálcio

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI - American Concrete Institute

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição da Metodologia	25
Quadro 2 - Avaliação de Resultados	26
Quadro 3 - Avaliação de Resultados	26
Quadro 4 - Fechamento das Fissuras	34
Quadro 5 - Custos gerais.	35

RESUMO

Este estudo aborda a utilização do concreto autocicatrizante, uma inovação no setor da construção civil, para reparar fissuras de maneira autônoma por meio de uma solução contendo a bactéria *Bacillus Subtilis*. O objetivo principal foi avaliar a eficácia da regeneração de fissuras e o impacto na durabilidade de estruturas de concreto com resistência à compressão (fck) entre 20 a 25 MPa. Para tanto, foram realizadas coletas e caracterização da cultura bacteriana, seguida pela formulação de uma solução específica contendo *Bacillus Subtilis*, aplicada em corpos de prova de concreto fissurados. Os testes incluíram a análise de resistência à compressão e a verificação da cicatrização de fissuras, com resultados que demonstraram a capacidade do bioconcreto em regenerar fissuras de até 0,5 mm e melhorar a resistência em aproximadamente 10% após o tratamento. Conclui-se que o bioconcreto oferece uma solução viável e sustentável para a recuperação de fissuras, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e mantendo a durabilidade estrutural.

Palavras-chave: Concreto; *Bacillus Subtilis*; Solução bacteriana; Recuperação estrutural; Regeneração de fissuras.

ABSTRACT

This study addresses the use of self-healing concrete as an innovation in the construction industry for autonomous crack repair through a solution containing *Bacillus Subtilis* bacteria. The primary objective was to evaluate the effectiveness of crack regeneration and its impact on the durability of concrete structures with a compressive strength (fck) between 20 and 25 MPa. To achieve this, the bacterial culture was collected and characterized, followed by the development of a specific solution containing *Bacillus Subtilis*, which was applied to cracked concrete specimens. Tests included compressive strength analysis and crack healing assessment, with results demonstrating the bioconcrete's ability to regenerate cracks up to 0.5 mm and enhance strength by approximately 10% after treatment. The study concludes that bioconcrete offers a viable and sustainable solution for crack recovery, reducing the need for manual interventions and maintaining structural durability.

Keywords: Concrete; *Bacillus Subtilis*; Bacterial solution; Structural recovery; Crack regeneration.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Geral	16
1.2.2 Específicos	16
1.2.3 Hipótese	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO BIOCONCRETO	18
2.2 FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DE AUTORREGENERAÇÃO	18
2.3 VIABILIDADE TÉCNICA E DESAFIOS.....	19
2.4 SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL	19
2.5 ESTUDOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	20
2.6 DESAFIOS COMUNS DO ENGENHEIRO CIVIL EM RELAÇÃO A MANUTENÇÃO DO CONCRETO ...	20
2.7 PESQUISA DE CAMPO E DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	22
2.8 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DO CONCRETO.....	23
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
3.1. ETAPA 1 - ESCOLHA DO MÉTODO PARA A PREPARAÇÃO DO BIOCONCRETO	27
3.2 ETAPA 2 - A EXTRAÇÃO DA BACTÉRIA <i>BACILLUS SUBTILIS</i> A PARTIR DO CHORUME	28
3.3 ETAPA 3 - ANÁLISE DAS COLÔNIAS BACTERIANAS	29
3.4 ETAPA 4 - TESTE DE TEMPERATURA.....	29
3.5 ETAPA 5 - APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO BACTERIOLÓGICA NO CONCRETO	30
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA	32
4.1 ANÁLISES DO BIOCONCRETO EM RELAÇÃO AO CONCRETO TRADICIONAL NA ETAPA EXECUTIVA (BENEFÍCIOS X LIMITAÇÕES)	32
4.2 FECHAMENTO DAS FISSURAS.....	34
4.3 IMPACTO FINANCEIRO	35
4.4 DURABILIDADE E SUSTENTABILIDADE.....	35
4.5 DISCUSSÃO GERAL.....	36
CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido às suas características de resistência a compressão e composição química, resistência e durabilidade. Ele desempenha um papel fundamental em projetos estruturais, desde pequenas construções até grandes obras de infraestrutura. De acordo com a Federación Iberoamericana de Hormigón Pré-mesclado (FIHP 2009), o consumo médio anual de concreto chega a 1,9 tonelada por pessoa, superando o consumo de qualquer outro material de construção, exceto a água. Com sua estrutura, composta por cimento, agregados e água, permite que o mesmo atue como um elemento eficaz na construção. Contudo, o impacto ambiental causado pelo concreto é uma questão crítica. O processo de produção do cimento, componente essencial do concreto, contribui com cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), conforme o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento em 2019, o que coloca o concreto no centro das discussões sobre sustentabilidade na construção civil.

Apesar de sua importância na construção civil, o concreto apresenta desafios importantes relacionados à durabilidade e manutenção, especialmente devido ao surgimento de fissuras ao longo de sua vida útil. Essas fissuras podem ser causadas por uma série de fatores, como variações térmicas, cargas estruturais e abertura por intermédio de agentes agressivos como carbonatação, penetração de cloretos, corrosão da armadura e fissuração. Segundo a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, é essencial que sejam realizadas manutenções preventivas e corretivas para garantir a Vida Útil do Projeto, evitando que as fissuras evoluam e causem danos mais severos à estrutura. No entanto, as técnicas convencionais de reparo, como o uso de epóxi estrutural e nata de cimento, têm limitações, pois exigem intervenções ocasionais e nem sempre resolvem o problema de forma definitiva, o que aumenta os custos e a complexidade da manutenção (ABNT, 2013).

Em resposta a esses desafios, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para melhorar a durabilidade e a capacidade de recuperação do concreto. Entre essas inovações, destaca-se o bioconcreto, uma solução proposta por Henk M. Jonkers em 2011, que incorpora bactérias no processo de autosselagem de fissuras. Essas bactérias, ao entrarem em contato com a água, precipitam carbonato de cálcio, fechando as fissuras de forma autônoma. O uso do bioconcreto oferece a vantagem

de regeneração contínua, eliminando a necessidade de reparos manuais repetitivos. No presente trabalho, foi realizada uma abordagem prática para investigar o desempenho dessa tecnologia (Jonkers, 2011). Inspirados pelos estudos de Henk M. Jonkers, que exploraram o uso de bactérias da família Bacillus, especialmente o Bacillus subtilis, deste modo, realizamos uma coleta dessa bactéria e, em laboratório, preparamos uma solução bacteriana que foi aplicada em corpos de prova de concreto fissurados. O objetivo foi observar o fechamento das fissuras ao longo do tempo e avaliar a eficácia da técnica em comparação com o concreto convencional.

O aumento das exigências por sustentabilidade e eficiência nas obras de construção civil motivou o desenvolvimento de tecnologias que minimizam a necessidade de manutenção e reduzem o impacto ambiental (Mehta; Monteiro, 2014). O bioconcreto, além de permitir a regeneração automática de fissuras, reduz a demanda por materiais adicionais e o uso de substâncias químicas prejudiciais, tornando-se uma alternativa ecologicamente viável. Ao prolongar a durabilidade do concreto, o bioconcreto pode reduzir significativamente os custos associados à manutenção e garantir uma maior sustentabilidade no ciclo de vida das estruturas (Medeiros, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

Este estudo justifica-se pela relevância em demonstrar a eficácia prática dessa tecnologia, que pode ser aplicada amplamente em estruturas de concreto expostas a condições adversas, sem a necessidade de reparos manuais constantes.

O concreto autocicatrizante se apresenta como uma resposta inovadora e rigorosa para essas questões. Esse material, capaz de "reparar" suas próprias fissuras, diminui consideravelmente a demanda por manutenção ao longo do tempo. Isso não apenas reduz o custo de manutenção, mas também aumenta a durabilidade das estruturas de concreto, mantendo-as seguras e em funcionamento por um período mais extenso. Em meio a uma preocupação cada vez maior com a sustentabilidade e a eficiência econômica, a utilização do concreto autocicatrizante surge como uma opção viável e promissória para reparos de estruturas com difícil acesso.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a eficácia do método de autorregeneração do concreto utilizando Solução bacteriana *Bacillus Subtilis* com ênfase na regeneração de fissuras e sem prejudicar a durabilidade das estruturas, em concreto com f_{ck} entre 20 a 25 MPa.

1.2.2 Específicos

- Coletar e caracterizar a cultura da bactéria *Bacillus Subtilis*, determinando sua viabilidade e potencial para a autorregeneração do concreto.
- Desenvolver uma solução contendo *Bacillus Subtilis* focando na eficácia da regeneração de fissuras em concreto, garantindo a estabilidade e a atividade da bactéria.
- Aplicar a solução de *Bacillus Subtilis* em corpos de prova de concreto com f_{ck} entre 20 a 25 MPa, avaliando a capacidade de regeneração de fissuras e seu impacto na durabilidade estrutural.

1.2.3 Hipótese

A integração de culturas bacterianas de *Bacillus Subtilis* específicas para concreto pode trazer avanços importantes para a engenharia civil, principalmente no desenvolvimento de materiais mais duráveis e sustentáveis. A hipótese sugere que a adição de bactérias capazes de produzir carbonato de cálcio como subproduto de seu metabolismo permite a autoreparação de fissuras no concreto, o que potencialmente prolonga a vida útil das estruturas.

Prevê-se que, ao serem incorporadas ao concreto durante o processo de mistura, essas bactérias permaneçam dormentes até que fissuras apareçam. Quando em contato com água e oxigênio, as bactérias se ativariam, iniciando um processo de mineralização que selaria as fissuras. Esse mecanismo de autoreparação poderia restaurar a integridade estrutural do concreto sem necessidade de intervenções externas, prevenindo a progressão dos danos e retardando a corrosão das armaduras internas.

Ademais, a hipótese postula que, apesar de suas propriedades regenerativas, o bioconcreto deve preservar as características mecânicas desejáveis do concreto convencional, como a resistência à compressão e a durabilidade. Se confirmada, a

utilização de bioconcreto poderia reduzir em 60% os custos associados à manutenção e ao reparo de infraestruturas, além de promover a sustentabilidade, reduzindo a necessidade de recursos e a produção de resíduos. (Medeiros, 2020)

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Histórico e Desenvolvimento do Bioconcreto

O conceito de concreto autorregenerativo foi introduzido por Henk Jonkers, em 2011, com a proposta de utilizar bactérias que precipitam carbonato de cálcio para vedar fissuras de forma autônoma. Neste cenário, *Bacillus Subtilis* tem se mostrado uma das bactérias mais eficientes nesse processo, devido à sua capacidade de sobreviver nas condições extremas presentes no concreto, como alta alcalinidade e baixa porosidade. Além disso, essa bactéria é capaz de permanecer inativa por longos períodos, sendo ativada apenas na presença de água, um agente que acelera sua ocorrência de biomineralização (Jonkers, 2011; Wang *et al.*, 2014).

A ideia central do bioconcreto é que, ao ocorrer a fissuração e a penetração de água, as bactérias incorporadas na matriz de concreto são reativadas, iniciando o processo de autocura. Estudos indicam que, quando alimentadas com lactato de cálcio, as bactérias *Bacillus Subtilis* são capazes de precipitar carbonato de cálcio, o que efetivamente sela as fissuras e restaura parte da integridade estrutural da obra (Mehta; Monteiro, 2014). Em ambientes úmidos, o bioconcreto apresenta um desempenho superior, já que a umidade constante facilita o processo de ativação bacteriana (Jonkers, 2011).

2.2 Funcionamento do Método de Autorregeneração

O processo de autorregeneração do bioconcreto ocorre quando fissuras se formam e a água entra em contato com as bactérias dormentes, ativando seu metabolismo. Ao metabolizar o lactato de cálcio apresenta, não concretamente, as bactérias precipitam o carbonato de cálcio, que preenchem as fissuras e impedem a penetração de mais água ou outros agentes agressivos, como cloretos e sulfatos (Wang *et al.*, 2014). Esse processo de biomineralização é o responsável pela “cura” das fissuras, sendo especialmente eficaz em fissuras de até 0,5 mm (Mehta; Monteiro, 2014).

Além do *Bacillus Subtilis*, outras espécies bacterianas, como o *Bacillus Sphaericus*, também estão sendo exploradas em pesquisas de bioconcreto devido à sua resistência e capacidade de gerar carbonato de cálcio em ambientes alcalinos (Luo *et al.*, 2015). A escolha das bactérias e a forma de encapsulamento são cruciais para garantir que o processo de autorregeneração ocorra apenas quando necessário,

ou que prolongue a vida útil das bactérias no interior do concreto (De Belie *et al.*, 2018).

2.3 Viabilidade Técnica e Desafios

Embora o bioconcreto seja uma inovação promissora, sua implementação em larga escala enfrenta ainda desafios técnicos e econômicos. Conforme mencionado por Luo *et al.* (2015), um dos principais obstáculos é a preservação da segurança garantida ao longo do ciclo de vida da estrutura. As bactérias precisam ser protegidas no ambiente hostil do concreto, ou o que geralmente é feito por meio de encapsulamento, utilizando polímeros ou argilas expansivas que liberam os microrganismos apenas quando fissuras se formam e a água penetra no material (Luo *et al.*, 2015).

Outro desafio está relacionado ao custo. Conforme dito por Silva (2019), o bioconcreto pode ser até 40% mais caro que o concreto convencional devido ao custo da produção de culturas bacterianas e dos materiais utilizados para encapsulamento. No entanto, quando se considera a redução dos custos com manutenções corretivas e o prolongamento da vida útil das estruturas, a tecnologia pode se mostrar economicamente viável a longo prazo (Silva, 2019). Wang *et al.* (2014) sugerem que o retorno sobre o investimento pode ocorrer em cerca de quatro anos, dependendo do tipo de estrutura e de sua exposição a ambientes agressivos.

2.4 Sustentabilidade e Impacto Ambiental

Além de seus benefícios técnicos, o bioconcreto tem um impacto positivo em termos de sustentabilidade. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a produção de concreto representa aproximadamente 7% das emissões mundiais de CO₂, em grande parte devido à produção de cimento. O uso do bioconcreto pode reduzir a necessidade de manutenções frequentes e, conseqüentemente, diminuir o consumo de cimento para reparos. Jonkers (2011) afirma que o bioconcreto pode aumentar a vida útil das estruturas de concreto em até 50%, o que representa uma contribuição significativa para a redução do impacto ambiental da construção civil.

Além disso, o uso de bactérias para a regeneração do concreto evita a utilização de materiais sintéticos e produtos químicos que são tradicionalmente usados para reparos, tornando o bioconcreto uma solução mais ecológica. De acordo com De Belie *et al.* (2018), a autorregeneração também pode ser especialmente útil

em áreas de difícil acesso, como estruturas subterrâneas ou submarinas, onde intervenções de reparo seriam caras e logisticamente complexas.

2.5 Estudos Recentes e Perspectivas Futuras

Estudos recentes exploraram diferentes abordagens para melhorar a eficiência do bioconcreto e reduzir os custos associados à sua produção. Conforme Xu e Yao (2019) investigaram o uso de diferentes nutrientes e métodos de encapsulamento que garantem a proteção bacteriana por longos períodos, aumentando a eficácia do processo de autocura. Os resultados indicam que o encapsulamento em materiais à base de argila expandida pode ser uma solução eficaz para prolongar a vida útil das bactérias não concretamente.

Outro foco de pesquisa é a aplicação do bioconcreto em diferentes tipos de estruturas. O bioconcreto pode ser particularmente útil em ambientes costeiros, onde a alta exposição à umidade e os sais minerais podem acelerar a manipulação do concreto convencional. Nessas condições, a autorregeneração das fissuras é fundamental para manter a integridade estrutural e evitar a corrosão das armaduras. As perspectivas futuras incluem a combinação do bioconcreto com outras tecnologias de autossuficiência estrutural, como o uso de polímeros e nanomateriais que podem melhorar ainda mais as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. De Belie *et al.* (2018).

2.6 Desafios comuns do engenheiro civil em relação a manutenção do concreto

A manutenção do concreto é uma tarefa complexa que apresenta diversos desafios aos engenheiros, especialmente devido às condições ambientais, cargas aplicadas e a própria natureza do material. Um dos principais problemas enfrentados é o surgimento de fissuras, que comprometem a durabilidade das estruturas. As fissuras são uma das manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de concreto, causadas por fatores como retração por secagem, variações térmicas e cargas externas excessivas. Esse fenômeno reduz a resistência e favorece a entrada de agentes agressivos, como cloretos e dióxido de carbono, que aceleram a corrosão das armaduras (Helene, 1997).

Outro desafio relevante é o controle da durabilidade do concreto ao longo do tempo. A durabilidade é comprometida pela ação de agentes externos, como a água

e produtos químicos, que penetram no concreto através de poros e fissuras. Essa infiltração, além de causar a corrosão das armaduras, pode levar à carbonatação e à degradação do concreto, especialmente em ambientes agressivos, como áreas costeiras e industriais. Para os engenheiros, isso significa a necessidade de intervenções constantes para manter a integridade estrutural e evitar falhas catastróficas (Mehta; Monteiro, 2014).

A dificuldade de prever a vida útil das estruturas de concreto é outro grande desafio. A ausência de uma manutenção preventiva eficaz pode resultar em aumentos significativos nos custos de reparo ao longo da vida útil do concreto. A Lei de Sitter (1984) é um conceito amplamente utilizado na área da engenharia civil, especialmente no que se refere à manutenção de estruturas, como edificações e infraestruturas de concreto. Ela estabelece uma relação direta entre o tempo de manutenção e o custo necessário para reparar ou restaurar uma estrutura, essa lei é frequentemente citada para ilustrar como os custos de manutenção aumentam de forma exponencial quando as manutenções corretivas são negligenciadas, destacando a importância de um planejamento adequado desde a fase de projeto (Tutikian; Helene, 2004).

Além dos desafios técnicos, há também os aspectos econômicos. O custo elevado associado à manutenção de estruturas de concreto é uma preocupação constante para engenheiros, especialmente em grandes estruturas, como pontes e viadutos. As soluções de reparo, como o uso de epóxi e reforços estruturais, tendem a ser caras e demandam interrupções nas operações, o que eleva ainda mais os custos com mão de obra e tempo (Mendes *et al.*, 2016).

Por fim, outro desafio é a implementação de novas tecnologias para a manutenção do concreto. O desenvolvimento de soluções inovadoras, como o bioconcreto, que utiliza bactérias para regenerar fissuras de forma autônoma, pode ajudar a mitigar esses problemas a longo prazo. No entanto, a adoção dessas tecnologias enfrenta barreiras devido ao custo inicial elevado e à falta de conhecimento técnico sobre o desempenho dessas soluções em grande escala (Jonkers, 2011).

2.7 Pesquisa de campo e desenvolvimento da metodologia

A utilização do concreto ao longo dos anos, graças à sua longevidade, prejuízo, preço competitivo e simplicidade de obtenção. Contudo, mesmo possuindo elevada resistência, as construções de concreto podem apresentar fissuras, que podem resultar em graves problemas estruturais. Freitas *et al.* (2021)

Em resposta a essa demanda, estudos em materiais levaram à criação do bioconcreto, uma mistura de concreto convencional com bactérias encapsuladas que produzem calcário e lactato de cálcio ($C_6H_{10}CaO_6$), que atuam como alimento para as bactérias. Gato *et al.* (2021) destacam que, no bioconcreto, ocorre um processo de bioprecipitação, que é acionado quando uma fissura se estabelece. Neste instante, a presença de água e oxigênio estimula as bactérias, possibilitando a fabricação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que preenche as lacunas.

A popularidade do bioconcreto aumentou após a identificação da bactéria *Bacillus Pseudofirmus* por Jonkers (2010). Ele notou que essas bactérias produzem esporos que resistem a esforços mecânicos e químicos, permanecendo viáveis por até cinco décadas em ambientes secos. Para prolongar a vida das bactérias, desenvolveram-se métodos de encapsulamento com argila expandida, permitindo uma durabilidade de até 200 anos e uma capacidade de autorregeneração, apesar do uso excessivo poder diminuir a resistência à deterioração (Wang *et al.*, 2014).

A *Bacillus Subtilis* obtidos de chorume de aterros sanitários, notando que a autorregeneração acontecia em seis dias, resultando na formação de cristais de cálcio. Também se aprofundaram em uma nova área de estudo com outra espécie do gênero *Bacillus*. Uma solução foi desenvolvida para uso em estruturas já existentes, oferecendo uma estratégia de manutenção paliativa. Constatou-se que *Bacillus Subtilis* tem uma capacidade regenerativa semelhante à de *Bacillus Pseudofirmus* e sua obtenção é mais simples. Gato *et al.* (2021)

Barros e Nascimento (2019), Silva e Passarini (2017), Schwantes-Cezario, Nogueira e Toralles (2017), Mânica (2019) e Ghellere (2021) empregaram *Bacillus Subtilis* em seus estudos com diversos tipos de cimento, obtendo uma variedade de cimento parâmetros de resistência à corrosão e recuperação de fissuras, que serão abordados na seção de resultados.

Segundo os resultados do teste de resistência à extensão prolongada por Silva e Passarini (2017), a presença de bactérias nos espaços vazios do concreto levou à selagem das fissuras com CaCO_3 . Depois de 365 dias, notou-se um crescimento de cerca de 10% na resistência, em contraste com cerca de 2% no teste feito no sétimo dia, demonstrando uma solução para as doenças e a diminuição dos gastos com manutenção.

No entanto, o preço do bioconcreto ainda é alto, o que restringe a sua utilização em construções, em parte por causa do acesso a materiais e à cultura necessários para a formação de colônias bacterianas. Jonkers (2015) destaca que o uso de bioconcreto representa entre 2% e 5% do custo total da construção, enquanto Silva (2019) indica um crescimento de 40% em comparação ao concreto tradicional. Ainda assim, o bioconcreto possui um aspecto sustentável, já que a fabricação de cimento contribui com 7% das emissões de CO_2 (SNIC, 2019), gerando uma demanda por novos materiais.

Também destacam a ocorrência de fissuras em idades mais avançadas, resultando na diminuição das atividades metabólicas pela escassez de nutrientes e oxigênio. Além disso, o fechamento dos poros impede a multiplicação bacteriana, resultando na morte das colônias e prejudicando a autocicatrização. Luo *et al.* (2015)

2.8 Comparação dos Métodos de Recuperação Estrutural do Concreto

A técnica de aplicação por borrifamento se destaca pela facilidade de execução e por exigir um investimento inicial menor em comparação com os métodos tradicionais de recuperação de estruturas. De acordo com Sahade (2005), esses métodos podem envolver a substituição, o reforço ou a recuperação da estrutura, dependendo da origem e do tipo de fissura, e podem ser realizados com grautes, selantes ou ampliando aberturas para a aplicação de selantes, com ou sem o uso de telas de poliéster.

A corrosão das armaduras em estruturas, devido à infiltração de agentes degradantes por meio das fissuras, é um fator que compromete a durabilidade e o uso adequado das construções. Reis (2001) sugere que uma alternativa para reparo envolve a remoção do concreto danificado e dos produtos de corrosão, seguida pelo tratamento das armaduras. Esse tratamento inclui limpeza superficial e aplicação de tintas protetoras, seja à base de compostos orgânicos ou minerais, e finaliza com a

reconstrução da superfície com argamassas convencionais ou modificadas com polímeros, além da aplicação de grautes.

Considerando que globalmente entre 7% e 12% das emissões anuais de CO₂ estão associadas à produção de materiais de construção civil (SNIC, 2019), a utilização de borrifamento com compósitos bacterianos apresenta uma alternativa mais sustentável. Ao eliminar a necessidade de remover o concreto danificado e aplicar grautes para o fechamento das fissuras, essa técnica reduz a demanda por materiais à base de cimento ou por produtos químicos prejudiciais ao meio ambiente, contribuindo para a diminuição das emissões de CO₂.

Além disso, a proposta de recuperação apresentada neste estudo não exige mão de obra altamente especializada para a aplicação do borrifamento. Pesquisas recentes indicam que bactérias da espécie *Bacillus Subtilis* têm potencial para serem ambientalmente seguras e não representam riscos à saúde humana ou animal, uma vez que não são patogênicas (Vieira, 2017).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho teve como objetivo analisar a eficácia da autorregeneração do concreto utilizando a solução bacteriana *Bacillus Subtilis* aplicada a corpos de prova de concreto fissurados. O método foi selecionado para viabilizar a análise prática do comportamento do bioconcreto em condições controladas de laboratório, possibilitando uma avaliação direta dos resultados. Para a elaboração do procedimento para obtenção da solução bacteriana, estruturamos o trabalho prático em diversos tópicos, A metodologia do estudo foi estruturada de maneira prática, focando na aplicação direta do bioconcreto em situações reais de fissuração. A coleta da bactéria foi feita no aterro sanitário da cidade de Ariquemes/RO e o cultivo da bactéria *Bacillus Subtilis* que foi realizado em laboratório, onde a solução bacteriana foi preparada e posteriormente aplicada em concreto fissurado. Os corpos de prova foram monitorados para medir o grau de fechamento das fissuras. Esse enfoque prático permite avaliar o desempenho do bioconcreto em situações de uso cotidiano, diferenciando-se de técnicas convencionais que requerem intervenções frequentes. Além disso, a escolha do bioconcreto é justificada pela sua capacidade de se regenerar automaticamente, prolongando a vida útil do concreto e reduzindo os custos com manutenção e reparos frequentes. Essa solução tem potencial para resolver problemas relacionados à sustentabilidade e à durabilidade do concreto, que continuam sendo grandes desafios para a indústria da construção (Santos, 2013). Conforme apresentado na Quadro 1, com base no material examinado pelos autores citados.

Quadro 1 - Composição da Metodologia

Itens	Autores de Referencia
Procedimento de Obtenção da Bactéria	Gato, <i>et al.</i> (2021)
Metodologia de Cultivo das Colônias Bacterianas	Gato, <i>et al.</i> (2021); Lemke (2019); Ghellere (2021)
Formulação Final da Solução	Gato, <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Para examinar os resultados, com ênfase na mensuração do fechamento de fissuras e seu potencial utilização em estruturas de concreto já construídos, foram acrescentados dois novos elementos, conforme apresentado na Quadro 2.

Quadro 2 - Avaliação de Resultados.

Itens	Autores de Referencia
Avaliação dos Resultados de Referencial Bibliográfico quanto ao Fechamento de Fissuras	Gato, <i>et al.</i> (2021); Lemke (2019); Ghellere (2021)
Proposta Teórica da Aplicação da Solução em estrutura de viadutos	Silva (2018); Valença <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Além disso, seguindo a mesma abordagem, converte-se uma avaliação que destaca as vantagens e objetivos do método da solução em comparação aos métodos convencionais de manutenção de fissuras. Por fim, foi criada uma tabela comparativa entre o concreto que contém bactérias e o convencional, fundamentada em referências bibliográficas que abordaram corpos de prova (CPs) produzidos com CP V-ARI e *Bacillus Subtilis*. Esta análise foca na resistência do bioconcreto à compressão e na formação de fissuras, considerando também os aspectos de custo e impacto ambiental, conforme demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Avaliação de Resultados

Itens	Autores de Referencia
Comparação dos Métodos de Recuperação Estrutural do concreto (Solução X tradicionais)	Pelczar, Reid, Chan, (1981); Vieira (2017); Sahade (2005); Reis (2001)
Vantagens e Desvantagens do bioconcreto	Jonkers (2011); Silva e Passarini (2017); Mânica (2019); Schwantes-Cezario Nogueira e Toralles (2017)

Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

A análise das técnicas de recuperação estrutural do concreto demonstra a superioridade de soluções inovadoras em relação a métodos convencionais. Pelczar, Reid e Chan (1981) destacam as restrições das técnicas tradicionais, ao passo que Vieira (2017) e Sahade (2005) destacam progressos que aumentam a durabilidade e a eficácia. Segundo Jonkers (2011), o bioconcreto apresenta a vantagem da autoregeneração, apesar de Silva e Passarini (2017) destacarem o custo inicial mais alto como um ponto negativo. Mânica (2019) e Schwantes-Cezario Nogueira e

Toralles (2017) defendem que, mesmo diante dos obstáculos, as vantagens ambientais e de performance do bioconcreto podem compensar tais despesas. Portanto, a análise ressalta a relevância de levar em conta tanto os benefícios quanto as restrições de cada estratégia para a construção civil sustentável.

Para chegar ao resultado o trabalho passou por 5 (cinco) etapas, sendo elas:

Etapa 1 - Escolha do método para a preparação da solução;

Etapa 2 - Coleta da bactéria *Bacillus Subtilis* a partir do chorume;

Etapa 3 - Análise das colônias bacterianas;

Etapa 4 - Teste de temperatura;

Etapa 5 - Aplicação da solução bacteriana no concreto.

3.1. Etapa 1 - Escolha do método para a preparação do bioconcreto

Existem dois métodos para o desenvolvimento do bioconcreto. O primeiro envolve a aplicação da solução bacteriológica e do lactato de cálcio diretamente no concreto. Quando ocorre uma fissura, as bactérias são ativadas e se alimentam do lactato de cálcio, resultando em calcificação. O segundo método utiliza grânulos de argila que contêm bactérias encapsuladas e lactato de cálcio. Esses grânulos são misturados às matrizes cimentícias. Quando uma fissura se forma, os grânulos se quebram, iniciando o processo de calcificação (Silva *et al.*, 2018).

Para este trabalho, optou-se por utilizar a bactéria *Bacillus Subtilis* como agente de biomineralização, com a hipótese de que ela poderia ser encontrada em aterros sanitários onde ocorre a lixiviação de calcário. Além disso, decidiu-se aplicar o método direto nas fissuras, sem encapsulamento, visando eficácia da cicatrização e a redução de custos.

Fluxograma 1 – Processos de obtenção da bactéria pelo método de Gato et al. (2021).

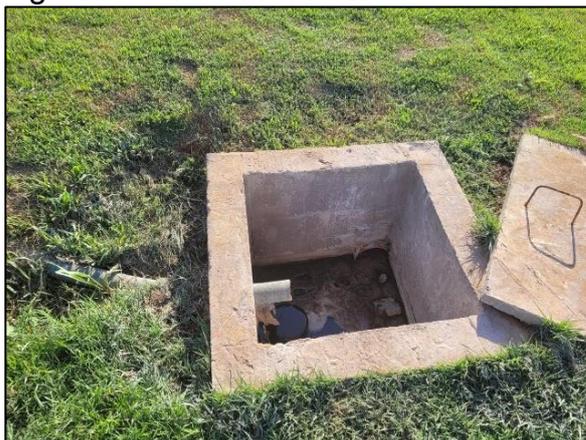


Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

3.2 Etapa 2 - A extração da bactéria *Bacillus Subtilis* a partir do chorume

As amostras de chorume foram colhidas no dia 16 de março de 2024, no aterro da Municipal de Ariquemes, localizada no município de Ariquemes-RO, Brasil. Para essa coleta, foram utilizadas três coletores, uma caixa térmica, duas seringas, foram coletadas três amostras da parte superficial do tanque de chorume, a 1,5 m da borda. O local da coleta é ilustrado na Figura 1 e para medição do pH as amostras foram levadas ao laboratório de microbiologia Centro Universitário Faema onde foi utilizado o pHmetro. As medições de pH feitas no aparelho indicando um pH médio de 8,07 e temperatura de 24,5°C, com os dados de pH e temperatura foi possível verificar que o chorume continha material lixiviado de calcário, resultado do período chuvoso, e o líquido apresentou características alcalinas que era ideal para que as bactérias estivessem presentes no material conforme ilustrado na figura 2.

Figura 1 - Local de Coleta



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Figura 2 - Medição de pH via pHmetro



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Em seguida, foram semeadas com lactato de cálcio em placas de Petri contendo meio de Agar Mueller Hinton, que oferece condições ideais para o crescimento bacteriano. É importante ressaltar que, nesse estágio, a presença da bactéria *Bacillus Subtilis* era apenas uma hipótese. Para confirmá-la, foi necessário promover o crescimento e desenvolvimento das colônias para análise posterior. As

placas de Petri foram armazenadas em uma estufa calibrada a 37°C, onde permaneceram por 48 horas, conforme figura 3.

Figura 3 - Placas semeadas com lactato de cálcio.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Após retirada da estufa foi constatada a presença de colônias de bactérias e foi levado para análise, assim podendo confirmar a presença da bactéria *Bacillus Subtilis* nas amostras.

3.3 Etapa 3 - Análise das colônias bacterianas

Após 48 horas de incubação na estufa, notou-se a presença de diversas colônias na placa de Petri. Posteriormente, uma amostra do material foi colocada em uma lâmina e foi realizado o teste de coloração de Gram, foi observado a coloração azul-violeta, característica dos *Bacillus* gram-positivos.

3.4 Etapa 4 - Teste de temperatura

Inicialmente, foi realizado o cálculo da contagem de microrganismos em UFC (Unidade Formadora de Colônia) para quantificar o número de bactérias na solução antes e após o teste de temperatura. Em seguida, as bactérias foram mantidas em uma estufa e expostas a temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C por 1 hora, respectivamente com base em pesquisas realizada por Gato, *et al.* (2021). Após essa fase, observou-se que as colônias de *Bacillus Subtilis* demonstraram resistência a altas temperaturas, uma vez que não houve redução no número de colônias. Isso sugere que, se essas bactérias tiverem a capacidade de realizar a calcificação, poderiam ser utilizadas em concretos expostos a condições de temperatura equatorial.

Além disso, as colônias de bactérias no chorume mantidas a 37°C apresentaram um crescimento significativo, conforme ilustrado na figura 4.

Figura 4 - Colônia de bactérias na placa petri



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

3.5 Etapa 5 - Aplicação da solução bacteriológica no concreto

Após 72 horas de incubação na estufa, as amostras de chorume foram retiradas e as colônias coletadas. Em seguida, adicionou-se 5 ml de água estéril, resultando na solução bacteriológica. Um mês antes desses procedimentos laboratoriais, foram elaborados 6 Corpos de Prova (CPs) conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015), conforme ilustrado na Figura 5. Desses, apenas 3 foram utilizados, uma vez que o objetivo do trabalho era verificar a ocorrência de calcificação. A produção inicial de 6 CPs visava prever possíveis falhas no processo de fissuração.

Figura 5 - Corpos de Prova



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

As proporções utilizadas na fabricação dos CPs foram: 5 quilogramas de cimento, 8,5 quilogramas de areia, 12,85 quilogramas de brita tipo-1 e 2,4 litros de água. É importante ressaltar que a dosagem seguiu o método ABCP que consiste em Criado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) na década de 1980, é baseado em quadros e tabelas que fornecem valores médios, fundamentado na norma ACI 211.1-81 (Revised 85) - Prática Padrão para Seleção de Proporções para Concreto Normal, Pesado e de Massa, além de estar alinhada com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) - Agregados para Concreto (Boggio, 2000).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

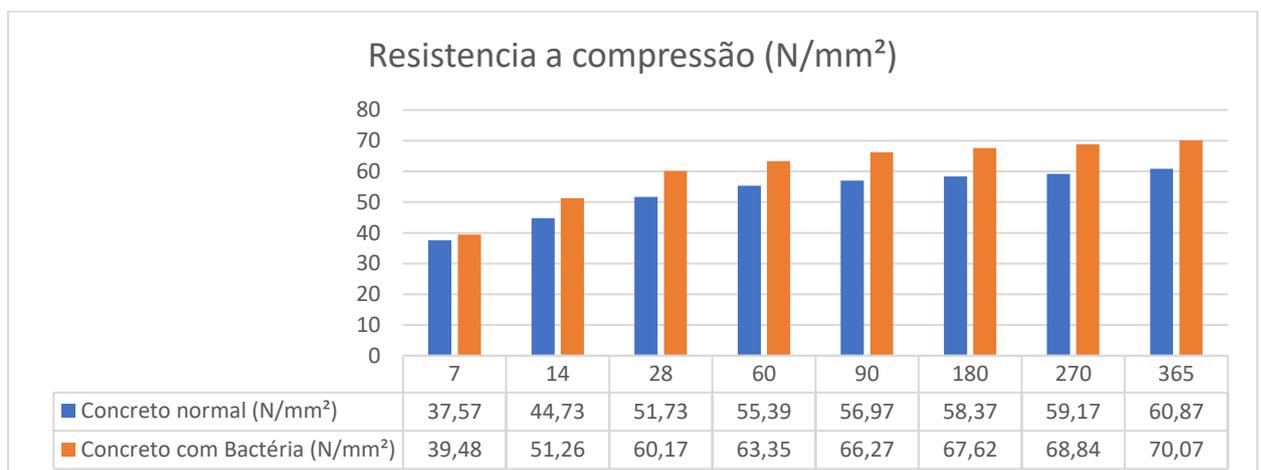
4.1 Análises do bioconcreto em relação ao concreto tradicional na etapa executiva (benefícios x limitações)

Silva e Passarini (2017) examinaram o processo de biomineralização, já reconhecido em solos, que se especializa em carbonato de cálcio. Segundo os autores, esta técnica pode ser empregada na cimentação ou na formação de uma camada de proteção superficial em estruturas, diminuindo os espaços entre as partículas, potencializando a resistência e selando fissuras existentes.

O volume de CaCO_3 precipitado durante a atividade de uréase é afetado por elementos ambientais, tais como a espécie bacteriana empregada (normalmente, *Bacillus*), o pH do meio (com melhores resultados entre pH 8,7-9,5), a temperatura ideal (que pode variar de 20 a 37°C), bem como a concentração bacteriana, a uréia e o cálcio presentes (Vieira dos Reis, 2017).

Silva e Passarini (2017) conduziram experimentos com uma solução bacteriana de *Bacillus Subtilis* com uma concentração de 10^5 células/mL, juntamente com lactato de cálcio e água. Os corpos de prova passaram por testes de detalhamento, resultando em fissuras de largura variando entre 0,05 e 1 mm. Foram realizados dois experimentos: um com concreto convencional e outro com características encapsuladas em argila expandida na composição. Os resultados dos testes de especificações revelaram que as amostras que continham uma bactéria apresentaram maior resistência em relação ao grupo de controle, conforme ilustrado no gráfico 1.

Gráfico 1: Gráfico de comparação de resistência a compressão do concreto normal e do bioconcreto baseado em Sunil Prata P. Reddy. S. et al. (2010).

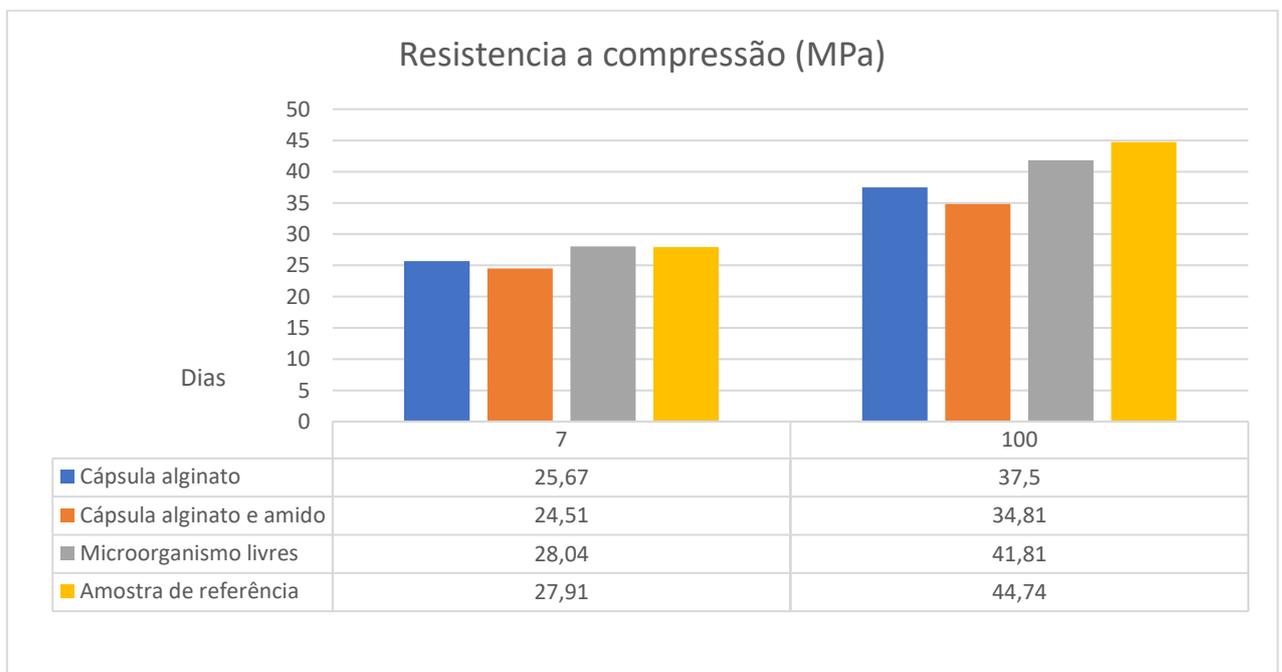


Fonte: Elaborada por Sunil Prata P. Reddy. S. et al. (2010).

Analisando o gráfico, depois de 365 dias, notou-se um crescimento na resistência de cerca de 15,11%, comparado ao teste feito aos 7 dias, que mostrou um aumento de cerca de 5,08%. Esse aumento na resistência contra a ocorrência é resultado do preenchimento das fissuras com esporos de CaCO_3 precipitados pelas bactérias conforme resultados encontrados por Sunil pratap reddy (Reddy *et al.*, 2017).

Mânica (2019) estudou diversas técnicas de encapsulamento de bactérias, empregando alginato, cápsulas de alginato com amido, bem como corpos de prova contendo os microrganismos sem encapsulamento. Nos experimentos com microrganismos encapsulados, observou-se um aumento na formação de cristais de cálcio, levando a um fechamento mais eficaz das fissuras em relação aos microrganismos não encapsulados. Além disso, os corpos de prova mergulhados em soluções que continham uréia demonstraram uma recuperação mais acelerada das fissuras, algo corroborado por Vieira (2017), que enfatizou a função da uréia como um facilitador nesse processo. Os exames de resistência a resultados foram prolongados aos 7 e 100 dias, e os resultados podem ser observados no Gráfico 2.

Gráfico 2: Gráfico comparativo de resistência à compressão dos CP's aos 7 e 10 dias conforme Mânica (2019)



Fonte: Elaborada por Mânica (2019)

Uma comparação entre os dois estudos apresentados ressalta o impacto do material empregado na fabricação das cápsulas que envolvem a bactéria. Cada

pesquisa realizada um tipo distinto de material, e as descobertas de Silva e Passarini (2017) apontam para uma eficácia superior no que diz respeito ao aumento da resistência à particularidade nas amostras que contêm argila expandida.

No que diz respeito ao preenchimento de fissuras, conforme pesquisas de Xu e Yao (2014) demonstram que fissuras de 0,1 a 0,4 mm foram parcialmente preenchidas por precipitados minerais originados do metabolismo bacteriano. Luo, Qian e Li (2015) também relatam que as fissuras de 0,1 a 0,3 mm e de 0,3 a 0,5 mm foram praticamente seladas (com taxas de reparo de $\geq 85\%$ e entre 50% e 70 %, respectivamente), enquanto de 0,5 a 0,8 mm tiveram um reparo parcial ($< 30\%$).

Luo e colaboradores (2015) também destacam um inconveniente do bioconcreto: com o passar do tempo, a ocorrência de fissuras se torna mais comum devido à diminuição da atividade metabólica bacteriana, provocada pela falta de nutrientes e oxigênio, além do fechamento dos poros na matriz de cimento. Isso inibe a multiplicação bacteriana, resultando na morte das colônias e, por consequência, na redução da habilidade de autocicatrização com o passar do tempo.

4.2 Fechamento das Fissuras

Os experimentos focaram na eficácia do bioconcreto no fechamento autônomo de fissuras. Observou-se que fissuras com largura média de até 0,5 mm foram fechadas com sucesso após a aplicação da solução bacteriana. Quadro 4 resume as comparações observadas.

Quadro 4 - Fechamento das Fissuras.

	Bioconcreto	Concreto Convencional
Resistencia à compressão	Ganho de até 10% de resistência.	-
Fechamento de Fissuras	Potencial de chegar até 0,8mm	0,05mm por hidratação tardia
Sustentabilidade	Diminuição do consumo de cimento	O consumo de cimento se mantém

Fonte: Elaborado por Oliveira. *et al* (2022)

4.3 Impacto Financeiro

Embora o custo inicial do bioconcreto seja aproximadamente 40% superior ao do concreto convencional, os resultados apontam que os custos de manutenção são reduzidos consideravelmente, levando a uma economia de até 60% ao longo da vida útil da estrutura. A Quadro 5 mostra uma comparação detalhada dos custos e da manutenção entre o bioconcreto e o concreto tradicional.

Quadro 5 - Custos gerais.

	Bioconcreto	Concreto convencional
Custos de Implementação	Acréscimo de 40% no valor.	Custo se mante padrão.
Custos à longo prazo	Retorno sobre investimento em 4 anos, gerando a redução de 60% nos custos de manutenção	Maiores gastos em manutenção preventiva e corretiva
Manutenção	Não há necessidade de manutenções periódicas	Necessidade de manutenções periódicas

Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2024)

A redução nos custos de manutenção é um dos principais atrativos dessa tecnologia, especialmente em estruturas onde o acesso para reparos é limitado. O retorno sobre o investimento ocorre em aproximadamente quatro anos, tornando o bioconcreto uma opção economicamente viável a longo prazo.

4.4 Durabilidade e Sustentabilidade

A durabilidade do bioconcreto foi outro ponto positivo observado durante os experimentos. A regeneração das fissuras e a resistência aprimorada a agentes corrosivos, como água e produtos químicos, prolongaram a vida útil do material. Além disso, o uso de *Bacillus Subtilis* como agente biológico promoveu um método sustentável de reparo, reduzindo a necessidade de novos materiais e de intervenções constantes.

O bioconcreto também se mostrou alinhado com as práticas de construção sustentável, uma vez que seu uso reduz a necessidade de manutenção frequente e diminui o impacto ambiental, ao reduzir o consumo de recursos e as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento.

4.5 Discussão Geral

Os experimentos comprovaram que o bioconcreto oferece vantagens significativas em termos de durabilidade, economia e sustentabilidade, superando o desempenho do concreto tradicional. A capacidade de fechar fissuras de forma autônoma e o aumento da resistência à compressão destacam o bioconcreto como uma tecnologia promissora no setor da construção civil, conforme visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Capacidade autorregenerativo conforme Oliveira *et al* (2022)

Análise	Abertura máxima (mm)	Fechamento máximo (mm)	% de fechamento observado
Gato <i>et al.</i> (2021)	2,0	2,0	100%
Ghellere (2021)	0,43	0,23	53,49%
Lemke (2019)	0,37	0,3	81,08%

Fonte: Elaborado pelos próprios autores (2024)

Embora o custo inicial seja maior, o retorno financeiro proporcionado pela redução dos custos de manutenção a longo prazo faz do bioconcreto uma solução atraente para construções que demandam alta durabilidade e baixo custo de manutenção. Além disso, sua aplicação sustentável reforça sua viabilidade como tecnologia para o futuro da construção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O bioconcreto declarou-se como uma solução inovadora e promissora para a construção civil, especialmente na recuperação de imunidade de fissuras. A pesquisa validou a eficiência do método de autocicatrização, que se apresenta como uma alternativa sustentável e técnica viável aos métodos tradicionais. Utilizando uma solução contendo *Bacillus Subtilis*, a tecnologia mostrou resultados consistentes, como o fechamento de fissuras de até 2 a 3 mm, com a aplicação de 5 ml de solução bacteriana.

Durante o experimento, amostras de chorume foram coletadas de um aterro sanitário e evidências para identificação de *Bacillus Subtilis*, utilizando placas de Petri semeadas com lactato de cálcio. As condições alcalinas do material coletado, com pH médio de 8,07, foram ideais para o desenvolvimento das colônias bacterianas. Após 48 horas de incubação, a presença de *Bacillus Subtilis* foi encontrada por coloração de Gram. A solução bacteriana foi então aplicada em corpos de prova de concreto previamente fissurados, obedecendo aos padrões normativos para a fabricação e teste.

Os resultados indicaram que fissuras de até 0,3 mm foram totalmente fechadas, enquanto fissuras maiores de 05 a 06 mm tiveram fechamento parcial, o fechamento apenas parcial das fissuras maiores pode ter sido ocasionado por condições ambientais e do tempo de exposição a solução. O bioconcreto também se destacou por sua durabilidade superior em comparação ao concreto convencional, com maior resistência à penetração de agentes corrosivos. Esses benefícios, aliados a uma economia de até 60% nos custos de manutenção ao longo da vida útil da estrutura, reforçam o potencial da tecnologia como uma solução economicamente viável.

Entretanto, foram identificados desafios, como a redução da atividade bacteriana ao longo do tempo, causada pela deficiência de nutrientes e pelo fechamento dos poros na matriz de cimento. Além disso, o custo inicial, cerca de 40% superior ao concreto convencional devido à dificuldade da produção da bactéria tanto em solução quanto em encapsulamento, o que ainda é uma barreira para sua aplicação em larga escala. Pesquisas futuras devem focar em métodos de encapsulamento mais eficientes, como o uso de argila expandida, que prolongam a previsão das bactérias e aumentam a eficácia do processo de cicatrização.

Com base nos dados obtidos, o bioconcreto não apenas proporciona maior durabilidade estrutural, mas também reduz o impacto ambiental associado à construção civil, ao diminuir a necessidade de reparos frequentes e o consumo de materiais adicionais. Essas características tornam a tecnologia compatível com as práticas de construção sustentável e indicam seu potencial para transformar a maneira como as fissuras em concreto são tratadas.

O bioconcreto surge como uma solução promissora para o tratamento preventivo de fissuras em concreto, especialmente em áreas de difícil acesso. A tecnologia pode prolongar a vida útil das construções e reduzir significativamente os custos com manutenção, além de promover práticas mais sustentáveis no setor da construção civil. A utilização dessa técnica em larga escala pode transformar a maneira como são tratadas as fissuras em estruturas de concreto, representando um avanço significativo para o campo da engenharia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9573: Vermicula expandida — Temperaturas inicial e final de amolecimento — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575: Impermeabilização – Seleção de Projetos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

BARROS, Leonardo.; NASCIMENTO, Edievan. **Bioconcreto**. 2019. Artigo Acadêmico – Engenharia Civil. Universidade São Francisco – USF, São Paulo.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. **Manual de recuperação de pontes e viadutos rodoviários**. Rio de Janeiro. 2010. p.159.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. **Pontes e viadutos rodoviários – Estruturas de concreto armado - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2009. p. 2-3.

CHAHAL, Navneet; SIDDIQUE, Rafat. Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: influence of ureolytic bacteria. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 161-174, 2013.

CHAHAL, Navneet; SIDDIQUE, Rafat; RAJOR, Anita. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 351-356, 2012.

CUNHA, Denise Pereira da. **Avaliação quantitativa dos viadutos da 205/206 e 105/106 Norte, Localizados em Brasília/DF, utilizando a metodologia GDE/UnB**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Centro Universitário de Brasília – UNICEUB, Distrito Federal.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre.

ECHEGARAY, C. F. P. L.; ROJAS, S. K. H.; ACAPANA, E. S. Los beneficios del uso de bacterias en el concreto auto-regenerante. **Revista CIVILIZATE**. [S.L.], v.1, n. 7, 2015.

FREITAS, Aurilaine Ávila de; ROMÃO, Ediene Monteiro; ANÍCIO, Sabrina de Oliveira; BARROS, Adriano José de. Bioconcreto: uma revisão de sua aplicação na construção civil. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. e37210414270, 2021.

GATO, Marilú Carvalho da Silva; MUNIZ, Wellington; SILVA, Karina Barbosa da; SÁ, Márlison Santos de. Autorregeneração de fissuras em concreto a partir de uma cultura de bactérias. **Research, Society and Development**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. e31510615734, 2021.

GHELLERE, Polyana. **Seleção e avaliação de bactérias produtoras de CaCO₃ na recuperação de fissuras dos materiais a base de cimento**. 2021. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território – ILATIT, Universidade Federal da Integração Latino-americana – UNILA, Foz do Iguaçu.

GHOSH, S.; BISWAS, M.; CHATTOPADHYAY, B.D.; MANDAL, S. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 93-98, 2009.

GONZALES, Yamile Valencia. **Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos**. 2009. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília – UnB, Brasília.

HELENE, Paulo. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de concreto armado**. 1993. Tese. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Tabela de Dados das Estações**. Brasília – DF, 2022. Disponível em: Acesso em 27 de julho de 2022.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, p. 905-920, 2017.

JONKERS, Henk M.; THIJSSSEN, Arjan; MUYZER, Gerard; COPUROGLU, Oguzhan; SCHLANGEN, Erik. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010.

JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. 2011. Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Department of Materials and Environment, Delft University of Technology, Delft.

JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, Delft, [S.L.], v. 36, n. 2, p.230-235, 2008.

JONKERS, H. M.; MORS R. **Reduction of Water Permeation through Cracks in Mortar by Addition of Bacteria based Healing Agent**. 2015. Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Department of Structural Engineering, Delf University of Technology, Delf.

JONKERS, H. Self-Healing Concrete. **Ingenia Magazine**, London, [S.L.], v. 1, n. 46, p. 39-46, 2011.

LEMKE, Gabriela Hansen. **Análise do Comportamento de Fissuras em Pasta Cimentícia com Biomineralização de Bacillus Subtilis**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville, 2019.

LIMA, Mateus dos Santos. **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Manaus.

LUO, Mian; QIAN, Chun-Xiang; LI, Rui-Yang. Factors affecting crack repairing capacity of bacteriabased self-healing concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 87, p. 1-7, 2015.

MÂNICA, Graciela. **Utilização de Microrganismo Autógeno para a Recuperação de Fissuras em Corpos de Prova de Argamassa de Cimento Portland**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado.

MEDEIROS, Diego Padilha da Cruz. **Uso de Bactérias (Bacillus Subtilis e Bacillus Cereus) na Produção de Bioconcreto**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa.

MENDES, F. G. B.; RUAS, B. L. A.; SILVA, R. K. R.; MELO, T. M.; ELEUTÉRIO, I. A. R.; COSTA, R. A. L. GOMES. L. S. P. Concreto Autorregenerativo: uma Revisão Bibliográfica sobre suas Propriedades e Benefícios para as Estruturas de Concreto. In: Fórum De Ensino, Pesquisa, Extensão E Gestão Da Unimontes – FEPEG, 10., 2016, Montes Claros. **Anais eletrônicos**... Montes Claros: UNIMONTES, 2016. Disponível em: <http://www.fepeg2016.unimontes.br/index.php/anais/ver/2489> ; Acesso em: 12 out. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 751.

MORTENSEN, B.M.; HABER, M.J.; DEJONG, J.T.; CASLAKE, L.F.; NELSON, D.C. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. **Journal Of Applied Microbiology**, [S.L.], v. 111, n. 2, p. 338-349, 2011.

NASCIMENTO, Marlesson Soares do. A Implantação do Bioconcreto Desenvolvido para solucionar Problemas Estruturais tais como: Fissuras, Rachaduras e Trincas. **Revista Científica Semana Acadêmica**. [S.L.], v. 1, n 153, 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. 2. **Concreto & Construção IBRACON**, [S. L.], v.1, n. 53, p. 14, 2009.

PRADEEDKUMAR, A et al. An Experimental Work on concrete by Adding Bacillus Subtilis. **International Journal of Emerging Technologies and Engineering–IJETE**, [S.L.], v. 2, n. 4, 2015. RAMACHANDRAN, S. K.;

RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of concrete using micro-organisms. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 1, p. 3-9, 2001.

REDDY, S. P.; RAO, M. S.; APARNAC, P.; SASIKALAC, Ch. Performance of standard grade bacterial (bacillus Subtilis) concrete. **Asian Journal Of Civil Engineering (Building and Housing)**. [S.L.], v. 11, n. 1, p. 43-55, 2010.

MOHAN, Prem. **Bacterial Concrete**, 2016. Civil Engineering Saminar. Disponível em: <http://civilenggseminar.blogspot.com.br/2016/06/bacterial-concrete.html>. Acesso em: 09 out. 2024.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte.

SANTOS, Romário J. **Análise de Estirpes Bacterianas com Potencial Aplicação em Processos de Auto-Cura de Material Cimentício via Bioprecipitação**. 2018. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos), Universidade Tiradentes – UNIT, Aracajú.

SCHWANTES-CEZARIO, Nicole; NOGUEIRA, Geovana Souza Ferreira; TORALLES, Berenice Martins. Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de B. Subtilis AP91. **Revista de Engenharia Civil Imed**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 142, 2017.

SILVA, Aline M. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Ciências Humanas e Sociais, Fundação Carmelitana Mário Palmério – FUCAMP.

SILVA, Daniel Henrique. Recuperação de estruturas de concreto – Corrosão das Armaduras – Estudo levantado no Centro Oeste de Minas Gerais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Belo Horizonte, v. 2, n. 10, p. 64-77, 2018.

SILVA, F. P. C.; PASSARINI, Victor de Carvalho. Bioconcreto: A tecnologia para Construção Sustentável. **Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation – INOVAE**, São Paulo, v.5, n. 2, p. 41-58, 2017.

SILVA, Lucas Ferreira da. **Estudo do Bioconcreto para Solução de Problemas Estruturais na Construção Civil**. 2019. Artigo Científico (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Presidente Antônio Carlos – FUPAC, Teófilo Otoni.

SAHADE, R. F. **Avaliação de sistemas de recuperação de fissuras em alvenaria de vedação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Habitação) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo.

SPINKS, Rosie. **The self-healing concrete that can fix its own cracks**. The Guardian. London. Jun. 2015. Disponível em: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jun/29/the-self-healing-concrete-that-can-fix-its-own-cracks>. Acesso em: 10 OUT. 2024.

TITTELBOOM, K. V.; DE BELIE, N. Autogenous healing of cracks in cementitious materials with varying mix compositions. **2nd International conference on Self-Healing Materials – ICSHM**. Chicago, Department of Structural engineering. p.160. 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1854/LU-1004648>. Acesso em: 12 OUT. 2024.

TUTIKIAN, B.; PACHECO, M. **Boletín Técnico 1**. Inspección, Diagnóstico y Prognóstico en la Construcción Civil. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT. Mérida p. 9, 2013.

VALENÇA, J.; Puento, I.; Júlio, E.; GONZÁLES-JORGE, H. **Avaliação de fissuras em pontes e viadutos de betão através de um método inovador – CrackBri - baseado em processamento de imagem e laser-scanning**. 2015. Conference: 4º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes-ASCP'15At: LNEC, Lisboa, Portugal.

VIEIRA, Juliana Aparecida. **Biodeposição De CaCO₃ em Materiais Cimentícios: contribuição ao estudo da biomineralização induzida por Bacillus Subtilis**. 2017. Dissertação (Programa de PósGraduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

VIEIRA DOS REIS, Luann. **Biotecnologia microbiana da construção: potencial de biomineralização de bactérias ureolíticas de solo de cerrado e de rejeitos de construção civil**. 2017. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais). Pró-reitoria de Pósgraduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

WANG, J; DEWANCKELE, J; CNUUDE, V; VLIERBERGHE, S.V.; VERSTRAETE, W.; BELIE, N.D. X-ray computed tomography proof of bacterial-based selfhealing in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 289-304, 2014.

WIKTOR, Virginie; JONKERS, Henk M.. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 33, n. 7, p. 763-770, 2011.

WINKEL, Rodolfo Luis. **Análise das manifestações patológicas em pontes na cidade de Teutônia/RS**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) –

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado.

XU, J.; YAO, W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating nonureolytic bacteria-based healing agent. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 1–10, 2014.

ZAGO, Alan de Freitas. **Estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura: Bioconcreto e Concreto Autocicatrizante**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Sul de Santa Catarina – Unisul, Tubarão.

ZHANG, Wei; ZHENG, Qiaofeng; ASHOUR, Ashraf; HAN, Baoguo. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 189, p. 107892, maio 2020.

ZHANG, Wei; WANG, Danna; HAN, Baoguo. Self-healing concrete-based composites. **Self-Healing Composite Materials**, [S.L.], p. 259-284, 2020.

RELATÓRIO DE VERIFICAÇÃO DE PLÁGIO

DISCENTE: Antonio Menezes Neto, Maicon da Silva Campos.

CURSO: Engenharia Civil

DATA DE ANÁLISE: 30.10.2024

RESULTADO DA ANÁLISE

Estatísticas

Suspeitas na Internet: **0,61%**

Percentual do texto com expressões localizadas na internet [▲](#)

Suspeitas confirmadas: **0,61%**

Confirmada existência dos trechos suspeitos nos endereços encontrados [▲](#)

Texto analisado: **90,34%**

Percentual do texto efetivamente analisado (frases curtas, caracteres especiais, texto quebrado não são analisados).

Sucesso da análise: **100%**

Percentual das pesquisas com sucesso, indica a qualidade da análise, quanto maior, melhor.

Analisado por Plagius - Detector de Plágio 2.9.4
quarta-feira, 30 de outubro de 2024

PARECER FINAL

Declaro para devidos fins, que o trabalho dos discentes ANTONIO MENEZES NETO n. de matrícula **44298**, e MAICON DA SILVA CAMPOS n. de matrícula **46944**, do curso de Engenharia Civil, foi aprovado na verificação de plágio, com porcentagem conferida em 0,61%. Devendo os alunos realizarem as correções necessárias.

Assinado digitalmente por: ISABELLE DA SILVA SOUZA
Razão: Responsável pelo documento
Localização: UNIFAEMA - Ariqueme/RO
O tempo: 30-10-2024 21:14:36

ISABELLE DA SILVA SOUZA
Bibliotecária CRB 1148/11
Biblioteca Central Júlio Bordignon
Centro Universitário Faema – UNIFAEMA