

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CAMPUS BACABAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

WILLIAM MATHIAS MEDEIROS DA CUNHA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DO BIOCONCRETO
COMO ALTERNATIVA DO CONCRETO CONVENCIONAL: Uma revisão
bibliográfica**

Bacabal – MA

2024

WILLIAM MATHIAS MEDEIROS DA CUNHA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DO BIOCONCRETO
COMO ALTERNATIVA DO CONCRETO CONVENCIONAL: Uma revisão
bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Esp. Gabriel Gregório Sousa Pereira

Bacabal – MA

2024

C972a Cunha, William Mathias Medeiros da.

Análise da viabilidade econômica da aplicação do bioconcreto como alternativa do concreto convencional / William Mathias Medeiros da Cunha – Bacabal-MA, 2024.

00 f: il.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil Bacharelado - Universidade Estadual do Maranhão-UEMA/ Campus Bacabal-MA, 2024.

Orientador: Prof^o Esp. Gabriel Gregório Sousa Pereira

1. Bioconcreto 2. Fissuras 3. Concreto 4. Tecnologia Sustentável

CDU: 624.01: 691

Elaborada por Poliana de Oliveira Ferreira CRB/13-702 MA

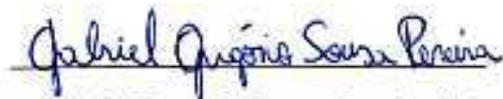
WILLIAM MATHIAS MEDEIROS DA CUNHA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DO BIOCONCRETO
COMO ALTERNATIVA DO CONCRETO CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado
em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/08/2024

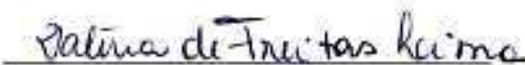
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Esp. Gabriel Gregório Sousa Pereira (Orientador)
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO



Prof. Esp. Natália Barros Falcão Cutrim
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO



Prof. Esp. Valéria de Freitas Lima
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

À Deus primeiramente;
aos meus pais, Erisvaldo e Dejeane;
aos meus irmãos, Matheus e Dennis;
e ao meu amigo, Carlos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedidas, guiando-me na conquista deste sonho, iluminando minha jornada com fé e esperança. Sua presença foi o alicerce que me sustentou nos desafios enfrentados.

À minha família, fonte inesgotável de amor e apoio, e ao meu melhor amigo, companheiro incansável nesta jornada, minha eterna gratidão. Juntos, formamos uma fortaleza de incentivo e compreensão, essenciais para minha caminhada.

Ao meu professor orientador Gabriel Gregório, por me guiar nesta etapa e aceitar me orientar.

Por fim, aos meus colegas de turma, obrigado pela parceria e pelo compartilhar de conhecimentos. Cada momento vivido contribuiu para o meu crescimento, tornando esta conquista não só minha, mas nossa. A todos, minha profunda gratidão.

“Um momento é o máximo que se pode esperar da perfeição”

(Clube da Luta - 1996, p. 122)

RESUMO

À medida que a engenharia civil evolui, o concreto, composto por agregados (grãos e miúdos), cimento e água, continua sendo essencial devido à sua versatilidade. A adição de aditivos melhora suas propriedades, como resistência e durabilidade. Contudo, técnicas construtivas inadequadas podem causar defeitos como fissuras, ameaçando a integridade estrutural. Em contrapartida, o bioconcreto, criado por Henk Jonkers e Eric Schlangen, oferece um avanço ao incorporar bactérias que regeneram fissuras automaticamente, estendendo a vida útil das estruturas e reduzindo a manutenção. Assim, o bioconcreto não só enfrenta os problemas associados ao concreto convencional, como fissuras, corrosão da armadura e outras patologias, mas também se apresenta como uma solução com grande potencial para estruturas tanto subterrâneas quanto superficiais, onde a manutenção é desafiadora, indicando um caminho para ideias inteligentes futuras na construção civil.

Palavras-chaves: Bioconcreto. Fissuras. Concreto. Tecnologia sustentável.

ABSTRACT

As civil engineering evolves, concrete, composed of aggregates (coarse and fine), cement, and water, remains essential due to its versatility. The addition of additives improves its properties, such as strength and durability. However, inadequate construction techniques can cause defects such as cracks, threatening structural integrity. On the other hand, bioconcrete, created by Henk Jonkers and Eric Schlangen, offers an advancement by incorporating bacteria that automatically regenerate cracks, extending the lifespan of structures and reducing maintenance. Thus, bioconcrete not only addresses issues associated with conventional concrete, such as cracks, reinforcement corrosion, and other pathologies, but also presents itself as a solution with great potential for both underground and surface structures where maintenance is challenging, indicating a pathway to future smart ideas in civil construction.

Keywords: Bioconcrete. Fissures. Concrete. Sustainable technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fissura	17
Figura 2 - Deterioração	18
Figura 3 - Preparação do concreto	18
Figura 4 - Processo de formação de calcário no concreto	22
Figura 5 - Progresso no processo de selagem das fissuras.....	23
Figura 6 - <i>Pont du Gard</i>	26
Figura 7 - <i>Via Appia</i>	26
Figura 8 - <i>Coliseu</i>	27
Figura 9 - <i>Pantheon</i>	27
Figura 10 - Fissuras, trincas e rachaduras	29
Figura 11 - Fissuras em estruturas de concreto podem comprometer a segurança da edificação	30
Figura 12 - As principais causas de irregularidades na construção civil	33
Figura 13 - Processo de deterioração das armaduras de aço.....	34
Figura 14 - <i>Bacillus Pseudofirmus</i>	35
Figura 15 - Protótipo de bioconcreto regenerativo	36
Figura 16 - Formação de carbonato de cálcio, dióxido de carbono, e água.....	37
Figura 17 - Regeneração natural do concreto	38
Figura 18 - Esporo bacteriano encapsulado.....	41
Figura 19 - Protótipos do ensaio prático para o estudo do bioconcreto	43
Figura 20 - Construção subterrânea, escavação de túnel.....	44
Figura 21 - Posto de salva-vidas no lago de Galder na Holanda	46
Figura 22 - Ilha artificial criada para salvar espécies selvagens.....	46
Figura 23 - Regeneração automática de base biológica	47
Figura 24 - Esporos de bactérias, argila expandida e lactato de cálcio no concreto .	50
Figura 25 - Manifestações patológicas comuns em concreto endurecido	52
Figura 26 - Custos de manutenção no Rio de Janeiro	52
Figura 27 - Observação estereomicroscópica das amostras	54
Figura 28 - Esporos germinam e selam rachaduras.....	55
Figura 29 - Teste de compressão do bioconcreto por Henk Jonkers	57
Figura 30 - Resistência à compressão do concreto convencional e do bioconcreto .	58
Figura 31 - Resistência à flexão do concreto convencional e do bioconcreto	59

Figura 32 - Resultado do teste de flexão utilizando a bactéria *Bacillus Subtilis*60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização das anomalias baseada na espessura das aberturas	31
Tabela 2 - Análise comparativa das propriedades do bioconcreto	40
Tabela 3 - Custo efetivo de manutenção empregando bioconcreto	53
Tabela 4 - Impactos ambientais e utilização de materiais	56
Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto em 7 e 28 dias.....	58
Tabela 6 - Resultados de resistência à flexão.....	59
Tabela 7 - Resultado do teste de compressão usando a bactéria <i>Bacillus Subtilis</i> ...	60

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
MICP	Precipitação de Carbonato de Cálcio Induzida
Microbiologicamente	
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
CDIAC	Centro de Análise de Informações sobre Dióxido de Carbono
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
Etec	Escola Técnica Estadual
IS	Indian Standard (Padrão indiano)
SP	São Paulo
p.	Página
a.C	Antes de Cristo
Eng	Engenheiro
Scielo	Scientific Electronic Library Online
pH	Potencial hidrogeniônico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
Ca(C ₃ H ₅ O ₂) ₂	Lactato de cálcio
H ₂ O	Água
(Ca(OH) ₂)	Hidróxido de cálcio
CaO	Cal

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
O	oxigênio
C	Carbono
kN	Quilonewtons
US\$	Dolares
£	Libras
m ³	Metro cúbico
R\$	Real
kg	Quilos
mm	Milímetro
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
Mpa	Megapascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Concreto convencional	19
1.2	Bioconcreto ou Autocicatrizante.....	21
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo geral	23
1.3.2	Objetivos específicos.....	23
1.4	Justificativa	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	Concreto: História e origem	25
2.2	Desafios do concreto convencional	28
2.2.1	Tipos de aberturas no concreto: Causas e consequências	29
2.2.2	Tipos de fissuras.....	30
2.2.2.1	Fissuras provocadas por variações térmicas	30
2.2.2.2	Fissuras por excesso de cargas.....	30
2.2.2.3	Fissuras por retração do concreto	31
2.2.2.4	Fissuras por recalque	31
2.2.3	Classificação das aberturas.....	31
2.2.4	Irregularidades na construção civil	32
2.2.5	Infiltração de água por aberturas no concreto	33
2.2.6	Processo químico do concreto convencional para sua capacidade de cura.....	34
2.3	Particularidades do bioconcreto	35
2.3.1	Processo químico do bioconcreto para sua capacidade de cura.....	36
2.3.2	Processo de biocimentação.....	38
2.3.3	Processo de biomineração	39
2.3.4	Eficiência do bioconcreto em reparos estruturais	39
2.3.5	Bactérias do gênero Bacillus	40
2.4	Preparação do bioconcreto	40
2.5	Inovação brasileira em bioconcreto autorregenerativo	42
2.6	Estruturas subterrâneas	43
2.7	Estruturas não-subterrâneas.....	45
2.8	Viabilidade econômica, custos e sustentabilidade	46

2.8.1	Eficiência e economia.....	47
2.8.2	Biotecnologia: Futuro construtivo sustentável	48
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	Descrição qualitativa.....	50
3.2	Descrição quantitativa	51
4	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	54
4.1	O bioconcreto é renovável e consome pouca energia em sua produção	55
4.2	Resultados dos testes de compressão e flexão do bioconcreto e concreto convencional.....	57
4.3	Impactos econômicos dos reparos em concreto e solução.....	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e as inovações na construção civil têm ajudado a criar técnicas mais modernas para fazer estruturas mais duráveis e bonitas. O concreto é um dos materiais mais usados no mundo por causa das suas características, propriedades, custo e versatilidade, o que o torna ideal para várias aplicações, principalmente na construção civil. No entanto, o concreto pode apresentar um comportamento mecânico frágil ao longo do tempo. Quando usado em obras, ele enfrenta tensões que, com o tempo, causam vários tipos de danos. Fissuras e desintegrações são problemas comuns que surgem por falhas na aplicação, fatores externos e excesso de partículas finas, agravados por ambientes agressivos; as figuras 1 e 2 mostram esses problemas. A principal causa de deterioração é a ação da água que, por capilaridade, infiltra-se no concreto, acelerando sua degradação e gerando perdas materiais e custos econômicos para consertar esses problemas (Andrade et al., 2022). Além disso, essa deficiência é agravada pela escolha de materiais inadequados e a pressa na execução das obras, sem a devida supervisão técnica, comprometendo a integridade das construções e levando a problemas estruturais em pouco tempo. A importância de mão de obra qualificada, a utilização de materiais adequados e a manutenção regular são essenciais para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas (Koga; Santos, 2020).

Figura 1 - Fissura



Fonte: Lima et al. (2020)

Figura 2 - Deterioração

Fonte: Silva; Teles; Barros (2020)

Para Couto et al. (2013, p. 3):

O concreto é um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita), e ar. Pode também conter adições (cinza volante, pozolanas, sílica ativa etc.) e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas.

O concreto é essencialmente uma mistura moldável, tornando-se a base de inúmeras construções devido à sua alta resistência e adaptabilidade a diversas formas e estruturas. A Figura 3 ilustra o processo de preparação dessa mistura.

Figura 3 - Preparação do concreto

Fonte: Gran Questões (2021)

O concreto contemporâneo transcende a tradicional mistura de cimento, água e agregados, graças às inovações na construção civil. Atualmente, a utilização de aditivos químicos e minerais aprimora significativamente o concreto, tornando-o mais resistente, durável e adaptável. Essas substâncias auxiliam na correção das deficiências inerentes ao cimento comum (Severo; Silva, 2023).

Na construção civil, a busca por materiais de maior durabilidade e com menores necessidades de manutenção é constante. O concreto convencional, amplamente utilizado em diversas obras, apresenta limitações, tais como vida útil reduzida e a necessidade de reparos frequentes. Nesse contexto, surge o bioconcreto como uma inovação promissora, capaz de transformar a maneira como as estruturas são edificadas, destacando-se pela sua capacidade de auto-reparação.

A introdução do bioconcreto aparece como uma solução promissora para os problemas que o setor da construção enfrenta, especialmente porque o concreto convencional se desgasta com o tempo por causa do clima e do uso. Apesar do bioconcreto ser mais caro no começo, os benefícios a longo prazo são claros. Ele precisa de menos manutenção e exige menos produção de cimento, o que acaba sendo mais em conta e ajuda a proteger o meio ambiente. Então, mesmo sendo mais caro no início, o bioconcreto oferece vantagens econômicas e ambientais importantes (Brito; Sousa, 2020).

1.1 Concreto convencional

Bunder (2016) destaca que o concreto surgiu por volta de 300 a.C., quando se misturavam pedras, areia, cal, pozolana e água. Com o tempo, essa mistura foi aprimorada, incluindo cimento, água, agregados e outros elementos como aditivos, pigmentos e fibras, com o objetivo de melhorar suas propriedades, tornando o concreto mais resistente e eficiente. Esse progresso evidencia a evolução da engenharia civil, que vem adaptando o concreto às necessidades contemporâneas da construção.

O concreto é uma invenção notável da humanidade. Ao endurecer, adquire uma robustez comparável à das pedras naturais, enquanto, no estado fresco, apresenta-se extremamente maleável. Essa característica permite a criação de construções com variados formatos e tamanhos, evidenciando sua versatilidade e importância na engenharia e na arquitetura contemporâneas (Lima et al., 2014).

Sob uma perspectiva mais ampla, o concreto convencional é bastante usado na construção civil devido suas vantagens e características únicas. Ele é muito resistente à água, pode ser moldado em diversas formas e tamanhos para diferentes partes da estrutura, tem um custo acessível e pode ser produzido diretamente no canteiro de obras. Esses fatores fazem dele uma escolha muito prática e eficiente para uma variedade de projetos (Pereira, 2019).

Segundo Schmidt (2016), o concreto se destaca por sua vasta flexibilidade produtiva, permitindo o uso de diferentes tipos de cimento e vários aditivos como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa e outros minerais. Além disso, é possível usar agregados de concreto reciclado.

No processo de produção do concreto, utiliza-se o cimento, especificamente o Cimento Portland. No Brasil, são produzidos diversos tipos de cimento, cada um com uma composição distinta. Essa diversidade de composições confere ao concreto características específicas, como maior trabalhabilidade, durabilidade e resistência. A escolha adequada do tipo de cimento é essencial para garantir a qualidade e a eficácia do projeto de construção (Pugliesi, 2018).

O cimento Portland é um material em pó fino composto por silicatos e aluminatos de cálcio, que atuam como agentes ligantes. Ele possui uma quantidade mínima de cal (CaO) livre. Ao ser misturado com água, esses compostos se hidratam, resultando no endurecimento da massa e conferindo-lhe alta resistência mecânica (Pereira, 2021).

Atualmente, no Brasil, existem cinco tipos principais de cimento Portland e três tipos especiais disponíveis:

- Cimento Portland Comum (CP-I);
- Cimento Portland Composto (CP-II);
- Cimento Portland de Alto-forno (CP-III);
- Cimento Portland Pozolânico (CP-IV);
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI);
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
- Cimento Branco (Portland Branco);
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC).

O cimento é feito principalmente de clínquer, que é uma mistura de calcário, argila e alguns produtos químicos. A sua formulação é diferenciada pela adição de outros materiais, como gesso, que ajuda a prolongar o tempo de pega do clínquer; escória, que aumenta a durabilidade em lugares na presença de sulfatos, mas pode diminuir a resistência se usada em grandes quantidades; argila pozolânica, que faz o concreto ficar mais impermeável; e calcário adicional, que é usado com mais frequência para baratear o custo do cimento (Pugliesi, 2018).

Resumidamente, o concreto convencional se destaca como um recurso flexível e essencial na construção civil e em várias outras áreas. Sua composição e métodos de fabricação oferecem um vasto leque de opções, que vão desde variantes de alta resistência, preparadas para aguentar cargas significativas, até formas mais leves, ideais para usos específicos.

1.2 Bioconcreto ou Autocicatrizante

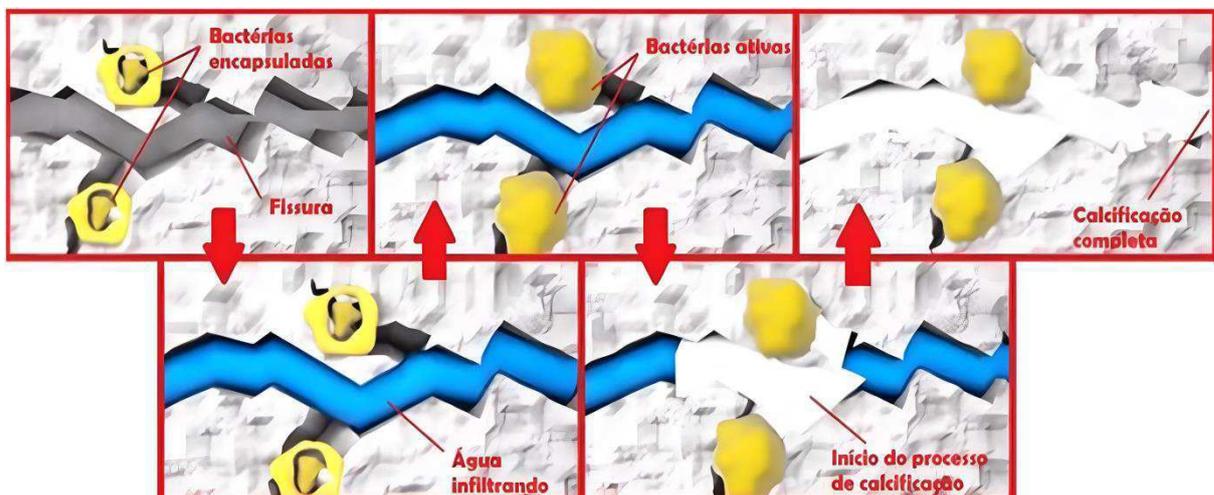
Visto que o concreto é essencial na construção civil, deve-se notar que ele pode sofrer com manifestações patológicas ao longo do tempo, perdendo força e vigência. Nessa condição, pela necessidade por estruturas alto-resistentes originou-se o bioconcreto, um material que é composto por concreto convencional adicionado de bactérias do gênero *Bacillus* e acrescentado de lactato de cálcio (alimento das bactérias), e são ativadas quando elas entram em contato com a umidade possuindo a característica microbiológica de se autoregenerar e, promete maior durabilidade e é mais amigável ao meio ambiente. As bactérias mais utilizadas para fins experimentais são: *Bacillus Coli*, *Bacillus Cohnii*, *Bacillus Pasteurii*, *Bacillus Pseudofirmus*, *Bacillus Subtilis* (Barros; Nascimento, 2019).

O bioconcreto surgiu como uma solução inteligente para os problemas recorrentes na construção civil. A ideia de criar esse material inovador veio da colaboração entre a microbiologia e a engenharia. Henk Jonkers, um microbiologista especializado no comportamento bacteriano, e Eric Schlangen, um engenheiro de materiais de construção, criaram uma tecnologia capaz de transformar o concreto convencional em algo capaz de se reparar sozinho. Inspirados pela capacidade do corpo humano de se curar, os pesquisadores desenvolveram um concreto revolucionário. Esse avanço é fruto de uma pesquisa extensa sobre a autocura de materiais como plástico, poliuretano e asfalto (Araújo et al., 2019).

O bioconcreto se destaca pelo uso de bactérias que produzem calcário, especificamente *Bacillus pseudofirmus* e *Sporosarcina pasteurii*. Essas bactérias, que vivem em ambientes alcalinos perto de vulcões, são encapsuladas em uma matriz protetora antes de serem misturadas ao concreto. Esse processo protege as bactérias das condições adversas, permitindo que fiquem dormentes por até 200 anos. Quando o concreto fissa e entra em contato com a umidade, as bactérias são ativadas e transformam lactato de cálcio em calcita, selando as fissuras no concreto (Araújo et al., 2019).

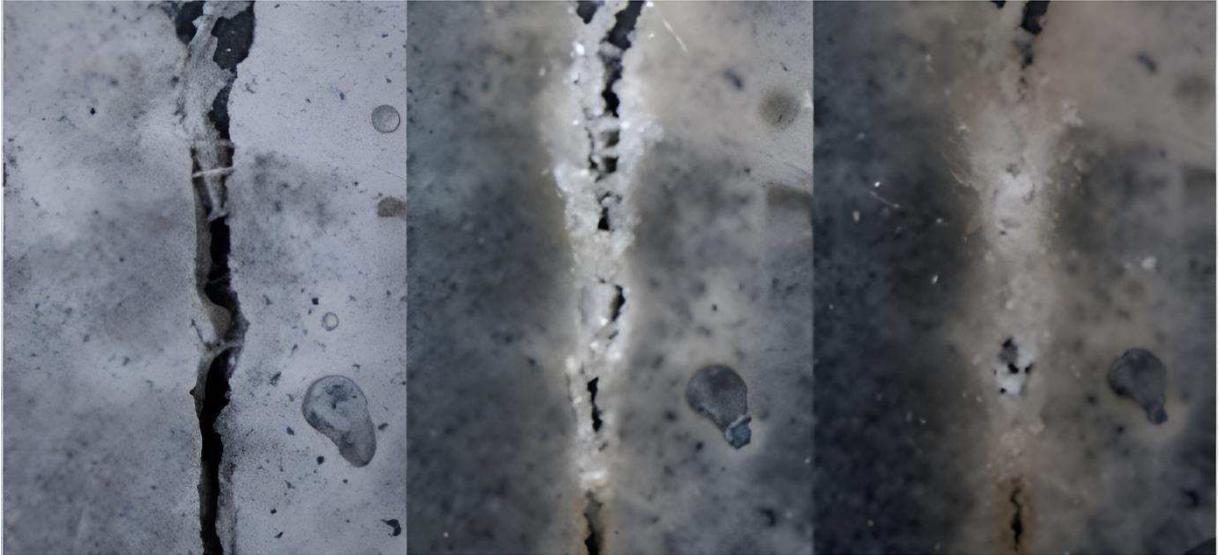
Em resumo, esse material de base biológica representa um grande avanço na engenharia civil, oferecendo uma solução autossustentável para consertar fissuras. Como mencionado anteriormente, quando a água entra nas aberturas do concreto, ativa os microrganismos que estão dentro do material. Eles consomem lactato de cálcio e produzem calcário como resultado desse processo (figura 4). Esse calcário natural então preenche as rachaduras, aumentando a durabilidade das estruturas e promovendo métodos de construção mais sustentáveis (figura 5).

Figura 4 - Processo de formação de calcário no concreto



Fonte: Nascimento (2018)

Figura 5 - Progresso no processo de selagem das fissuras



Fonte: Nascimento (2018)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este estudo visa comparar bioconcreto e concreto convencional, focando em produção, desempenho, e viabilidade econômica e técnica, destacando o bioconcreto como opção sustentável na construção.

1.3.2 Objetivos específicos

- Comparar produção de materiais focando diferenças principais;
- Avaliar resistência e auto-reparo do bioconcreto como alternativa viável do concreto convencional;
- Analisar custos do bioconcreto, comparando com o concreto convencional;
- Analisar a viabilidade econômica de substituir concreto convencional por bioconcreto;
- Investigar impactos ambientais da substituição no ciclo de vida.

1.4 Justificativa

O concreto, material central na construção civil, apresenta limitações relacionadas à durabilidade, além de ser suscetível a fissuras e desintegrações causadas pela infiltração de água. O bioconcreto, uma inovação tecnológica de base biológica com propriedades de autocura, surge como uma solução promissora para resolver essas deficiências, aumentando a vida útil das estruturas e diminuindo a necessidade de manutenção constante. Embora seu custo inicial seja mais elevado, o concreto biológico oferece benefícios econômicos substanciais em um prazo maior, incluindo uma menor frequência de reparos e manutenção, resultando em economias consideráveis. Além disso, esse material, como uma biotecnologia contribui para a sustentabilidade ambiental, diminuindo as emissões de carbono associadas ao processo de fabricação do cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto: História e origem

A história da construção e do uso de materiais de construção é uma jornada fascinante que mostra a criatividade e adaptabilidade humana. Desde o começo das civilizações, a necessidade de ter abrigos seguros e duráveis fez com que as pessoas começassem a explorar e usar materiais encontrados na natureza, que tinham características parecidas com os materiais de construção modernos, como o concreto e o cimento. Essa busca por materiais resistentes e estáveis para construir não só mostra a necessidade humana de se proteger de ameaças naturais ou causadas por outras pessoas, mas também de se proteger das condições climáticas adversas, especialmente durante os períodos mais frios e chuvosos do ano (Carvalho, 2008).

De acordo com Carvalho (2008), o uso de cal, cimento e concreto foi um passo importante na construção civil. Esses materiais trouxeram mais durabilidade e resistência às estruturas, mudando a maneira como os espaços são edificados. A adoção desses compostos não só ajudou a enfrentar melhor o clima, mas também abriu caminho para avanços técnicos, possibilitando a criação de construções mais complexas e fortes.

Durante o Império Romano, o concreto apareceu como um material revolucionário, essencial para uma época de grandes avanços na arquitetura. Esse concreto, feito de pedras, mármore, areia, cal, água e pozolana, mostrou ser muito resistente e estável, permitindo a construção de estruturas complexas e gigantescas. A habilidade dos romanos em usar esse material resultou na criação de obras icônicas, como o aqueduto *Pont du Gard* no sul da França (figura 6), a *Via Appia* em Roma (figura 7), o *Coliseu* em Roma (figura 8) e, de forma espetacular, o *Pantheon* em Roma (figura 9), cuja cúpula de 45 metros de diâmetro ainda hoje impressiona pela sua engenharia e beleza. O uso criativo do concreto pelos romanos não só facilitou o desenvolvimento de abóbadas, arcos e outras formas arquitetônicas avançadas, mas também deixou um legado na construção que inspira a engenharia e a arquitetura moderna, mostrando a importância desse material como um marco na evolução construtiva do período (Bunder, 2016).

Figura 6 - Pont du Gard



Fonte: O Blog do Bega (2014)

Figura 7 - Via Appia



Fonte: Blog do Silvano (2020)

Figura 8 - Coliseu

Fonte: Roma pra Você (2016)

Figura 9 - Pantheon

Fonte: Roma pra Você (2023)

Já no período da Revolução Industrial, os estudos e inovações tecnológicas para testar concreto deram um grande salto. Em 1818, na França, o engenheiro Louis Joseph Vicat fez experimentos importantes com cimento, criando uma técnica para medir o tempo de secagem e endurecimento do cimento usando a penetração de uma agulha na mistura. Com o aumento do uso do concreto e do concreto armado no início do século XX, surgiram problemas como acidentes e falhas nas construções por causa de erros no projeto, na execução e no uso de materiais de baixa qualidade. Para resolver esses problemas, muitos países começaram a criar

as primeiras normas técnicas para projetos e construção de estruturas em concreto armado. Um exemplo é a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2023). Essas normas, que chegaram ao Brasil nos anos 1930, foram essenciais para aumentar a segurança e a qualidade das construções em concreto armado (Bunder, 2016).

2.2 Desafios do concreto convencional

A ampla aplicação do concreto é atribuída à sua facilidade de manuseio e resistência. É composto por água, agregados como brita e areia, e cimento, o que dá uma força considerável pra ele. Por isso, é utilizado em uma variedade de construções, desde projetos menores até grandes estruturas. No entanto, ao longo do tempo, diversos fatores físicos e químicos podem alterar suas propriedades. Essas influências, tanto externas quanto internas, podem resultar no surgimento de pequenas fissuras no material (Lima, 2023).

A qualidade do concreto pode ser influenciada por diversos fatores, tanto externos quanto internos. Fatores externos incluem o clima, o vento e o ambiente físico. Internamente, destaca-se o calor gerado durante o processo de hidratação, resultante da reação química que libera energia térmica. É essencial observar que o tamanho do volume de concreto desempenha um papel crucial nesse processo; volumes maiores produzem mais calor, que pode ser dissipado para o ambiente ou absorvido pelo próprio concreto (Lima, 2023).

Couto et al. (2013, p. 2) afirma que:

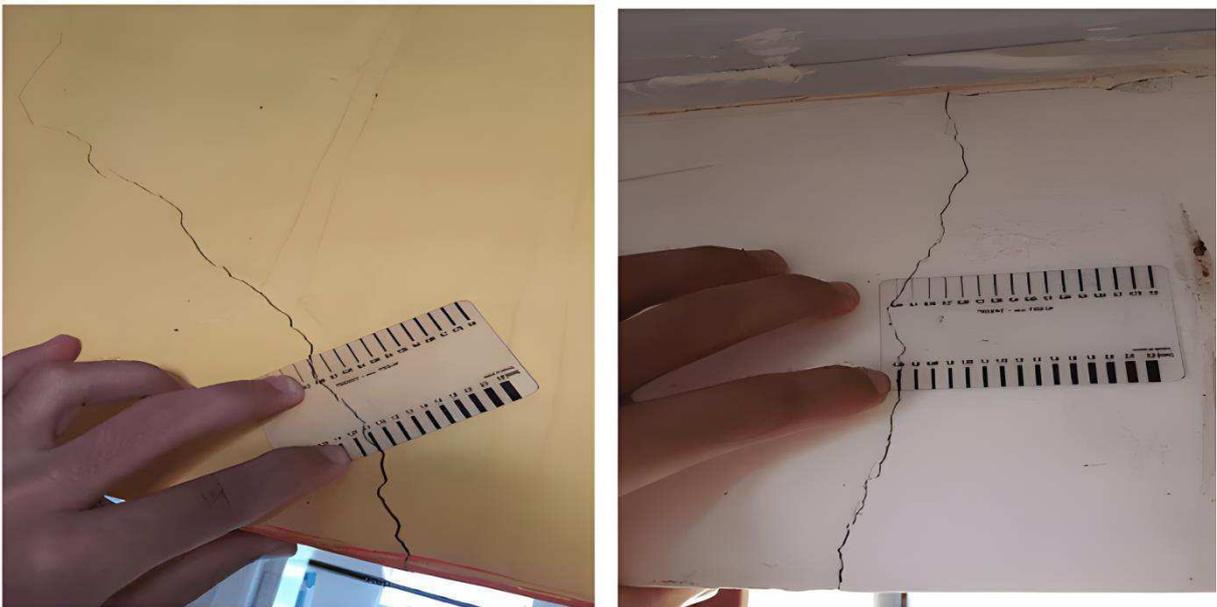
A estrutura de concreto possui uma vida útil na qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para qual foi projetada, havendo diversos fatores que acabam por interferir nessa vida útil, e por isso ela deve ser considerada como resultante de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo. Embora o concreto seja um composto rígido, alguns problemas podem ser observados com a corrosão, os ninhos e as fissuras que são frequentes nas construções, podendo até levar muitas vezes a mesma a um desmoronamento.

Nos elementos de concreto armado, a presença de fissuras reduz a firmeza do concreto e expõe a armadura à corrosão devido a fatores climáticos, tornando a estrutura menos segura e mais difícil de reparar. Para evitar tais problemas, é viável utilizar uma massa especial e uma cola de alta resistência para selar as fissuras, mas é crucial realizar manutenção regularmente (Khambenor et al., 2023).

2.2.1 Tipos de aberturas no concreto: Causas e consequências

Diversas patologias podem afetar o concreto convencional, e um dos mais comuns é a corrosão das armaduras, o que pode colocar em risco a segurança das estruturas que dependem delas. Fatores como fissuras, trincas e rachaduras estão entre os principais causadores desse tipo de deterioração (figura 10) (Faustino; Assunção, 2019).

Figura 10 - Fissuras, trincas e rachaduras



Fonte: Lima et al. (2020)

Esses fatores podem surgir por várias razões, incluindo retrações térmicas, impacto de cargas e recalque. Além disso, os principais motivos para esses problemas no concreto estão em erros de projeto e inadequações nas fases antes e depois das casas serem ocupadas. Essas falhas no setor construtivo podem resultar em grandes problemas, onde a aparição de fissuras sinaliza anormalidades. Essas fissuras, especialmente sob condições de flexão (o que acontece nas vigas), podem causar a degradação da armadura usada na estrutura. Isso acontece porque, dependendo da carga aplicada, surgem danos patológicos que não só promovem fissuras, mas também facilitam a entrada de água, contribuindo para a corrosão das armaduras. Essa cadeia de eventos realça a importância de cuidar bem das construções para evitar esses danos (Costa et al., 2021).

As fissuras visíveis em estruturas de concreto armado são um indicativo de deterioração avançada do material (figura 11), Muitas vezes isso acontece porque a armadura interna sofre corrosão por causa de uma reação química, conhecida como corrosão eletroquímica, que expande o aço de dentro para fora (Silva; Teles; Barros, 2020).

Figura 11 - Fissuras em estruturas de concreto podem comprometer a segurança da edificação



Fonte: Araújo et al. (2019)

2.2.2 Tipos de fissuras

Dentre os diversos tipos de fissuras, destacam-se aquelas causadas por variações térmicas, excesso de cargas, retração do concreto e recalques. Essas fissuras podem comprometer a integridade estrutural, tornando essencial a identificação e o tratamento adequado.

2.2.2.1 Fissuras provocadas por variações térmicas

Esse tipo de fissura é provocado por variações térmicas, decorrentes das mudanças de temperatura que causam a dilatação ou contração do material (Silva; Teles; Barros, 2020).

2.2.2.2 Fissuras por excesso de cargas

Já essas fissuras, surgem devido a erros no projeto ou na execução estrutural, embora nem sempre comprometam a integridade dos elementos, desde

que as deformações ainda estejam dentro dos limites aceitáveis para o estado de serviço (Silva; Teles; Barros, 2020).

2.2.2.3 Fissuras por retração do concreto

Outro tipo comum são as fissuras por retração do concreto, que ocorrem naturalmente durante a hidratação do cimento, mas pode piorar se tiver muito calor, pouca água ou vento forte, que faz a água evaporar rápido demais (Silva; Teles; Barros, 2020).

2.2.2.4 Fissuras por recalque

Por fim, fissuras por recalque, que aparecem quando a estrutura cede pra baixo além do que o solo aguenta, ou seja, quando a mesma excede a tensão admissível do solo, criando tensões que podem danificar a edificação se não tratarem adequadamente (Silva; Teles; Barros, 2020).

2.2.3 Classificação das aberturas

A maneira como as aberturas são classificadas, de acordo com sua espessura, é dividida em categorias como fissura, trinca, rachadura, fenda ou brecha, conforme Costa et al., (2021). A verificação dos detalhes dessa classificação se apresenta na tabela 1, onde mostra a espessura dessas aberturas.

Tabela 1 - Categorização das anomalias baseada na espessura das aberturas

ANOMALIAS	ABERTURA (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	De 0,5 a 1,5
Rachadura	1,5 a 5,0
Fenda	5,0 a 10,0
Brecha	Acima de 10,0

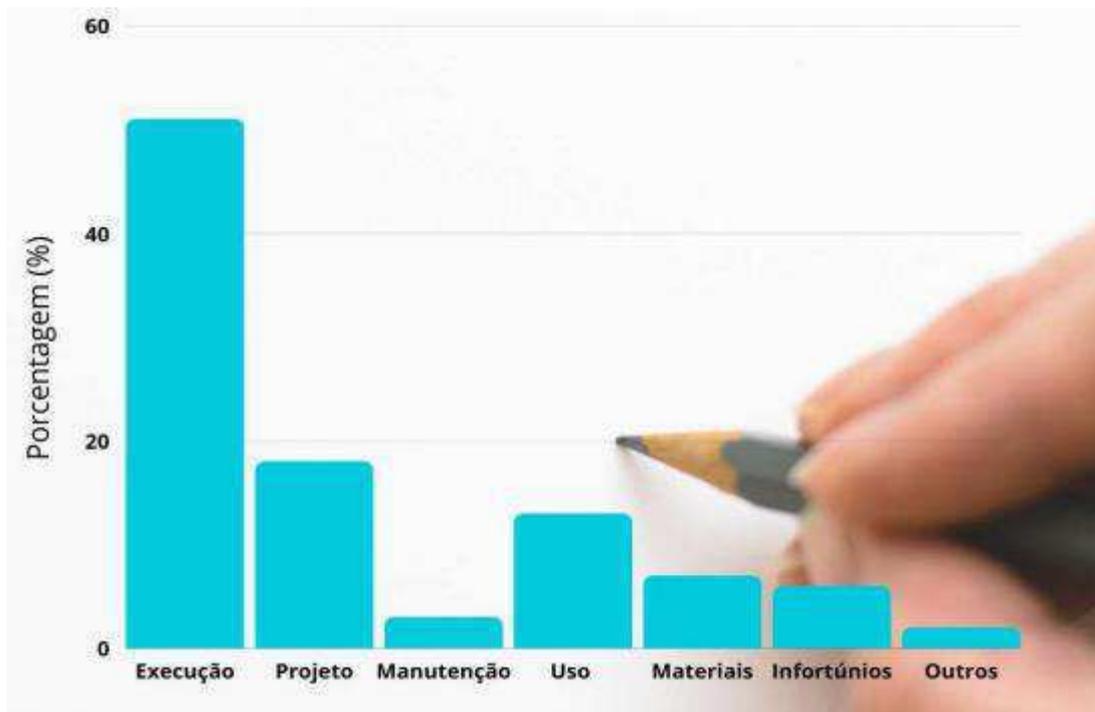
Fonte: Costa et al. (2021)

Pequenas rachaduras e fissuras são coisas comuns que aparecem nas construções, sendo um dos problemas mais frequentes. Além de afetarem a aparência, elas podem diminuir a durabilidade das estruturas e mudar suas características principais. Isso pode causar problemas mais sérios na estrutura. Conforme essas preocupações aumentam, percebe-se que trincas são partes onde um objeto se divide em pedaços menores, com tamanhos variando de 0,5 mm a 1,5 mm. Elas não apenas indicam um dano interno importante, mas também exigem uma análise detalhada para entender suas origens e consequências, garantindo que a estrutura seja estável. Em estágios mais avançados, as rachaduras são o tipo mais grave desses problemas, com larguras que podem chegar de 1,5 mm a 5,0 mm. Isso permite que coisas como luz, vento e água entrem na estrutura, o que pode impedir seu uso ou tornar muito caro consertar. A mudança de microfissuras para fissuras, depois trincas e, finalmente, rachaduras, mostra um caminho de deterioração que precisa de uma intervenção rápida e cuidadosa para manter a segurança e a utilidade dos prédios afetados (Costa et al., 2021).

2.2.4 Irregularidades na construção civil

Segundo Piancastelli (2023), na construção civil brasileira, a maioria dos problemas começa na fase de execução, o que representa 51% dos casos, como mostra o gráfico na figura 12. Erros no projeto vêm em segundo lugar, com 18%. Isso acontece porque as cargas não são avaliadas direito, há erros no cálculo da estrutura, nos materiais usados, na drenagem e na impermeabilização, e também no jeito como as armaduras são colocadas. A fase em que o prédio já está sendo usado vem depois, sendo a causa de 13% dos problemas. Dificuldades com os materiais de construção aparecem em seguida, com 7%, seguidos por eventos como desastres naturais, com 6%, manutenção ruim, com 3%, e outros fatores, com 2%. Todos esses elementos contribuem para os problemas que aparecem nas construções.

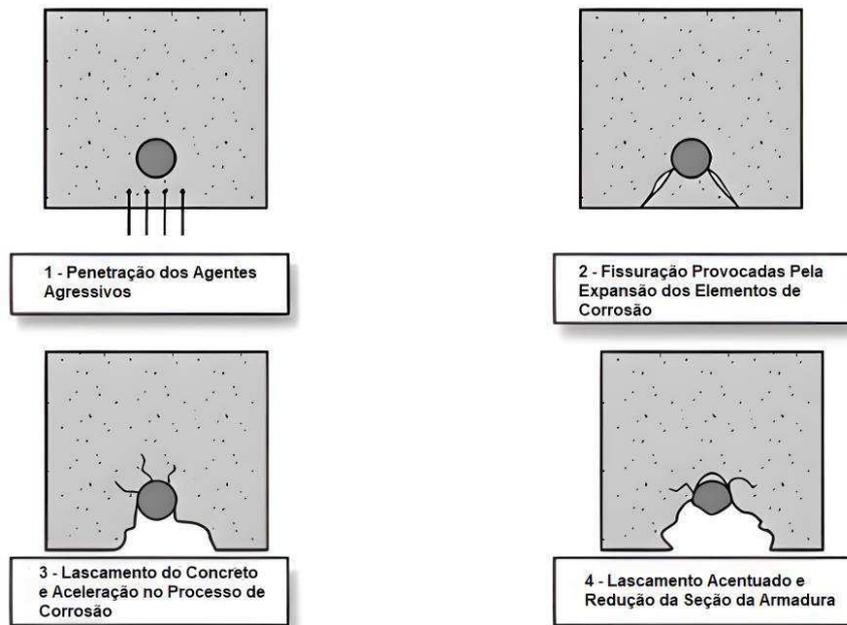
Figura 12 - As principais causas de irregularidades na construção civil



Fonte: Adaptado de Piancastelli (2023, p.3)

2.2.5 Infiltração de água por aberturas no concreto

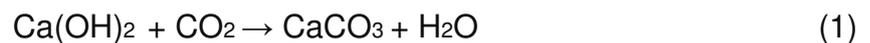
A água junto com substâncias (agentes agressivos) como cloretos, dióxido de carbono e nitritos penetram no concreto, fazendo com que o aço seja corroído mais rápido. Isso aumenta o volume do aço, causando tensões que podem levar a fissuras e até ao deslocamento da camada de cobrimento do concreto (figura 13).

Figura 13 - Processo de deterioração das armaduras de aço

Fonte: Koga; Santos (2020)

2.2.6 Processo químico do concreto convencional para sua capacidade de cura

O concreto convencional e o bioconcreto conseguem selar suas fissuras sem a necessidade da ação humana. Mas a capacidade de autocura do concreto convencional é muito limitada, muito menos que o bioconcreto. Dessa forma, o processo de carbonatação no concreto ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar se dissolve na água dentro dos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (o hidróxido de cálcio, ou portlandita, é produzido quando o cimento Portland reage com água durante a hidratação do concreto), formando carbonato de cálcio (CaCO_3) e água (H_2O) (Eq. 1) (Molyneux, 2021).



Essa reação faz o concreto ficar mais duro. Porém, ela também faz o pH do concreto baixar, o que pode deixar a armadura de aço mais vulnerável à corrosão. No concreto convencional, a cura autógena depende do cimento que não se misturou com a água e da entrada de água, que permite a hidratação secundária dessas partículas, formando hidróxido de cálcio que posteriormente reage com o CO_2 para selar fissuras com carbonato de cálcio (Molyneux, 2021).

2.3 Particularidades do bioconcreto

A criação do bioconcreto é um grande progresso na tecnologia de materiais de construção, representando uma mudança importante na busca por soluções mais ecológicas e promissoras na engenharia civil.

Criado pelo microbiologista Henk Jonkers e pelo engenheiro Eric Schlangen, o bioconcreto surgiu como uma solução para os problemas de deterioração que afetam muitas construções. Ao contrário dos métodos tradicionais que usam aço para aumentar a resistência, os cientistas se inspiraram nos processos naturais de cicatrização do corpo humano, especialmente na regeneração óssea, para desenvolver um material que se conserta sozinho (Barros; Nascimento, 2019).

Esse avanço se baseia no uso de bactérias que produzem calcário. Os cientistas usaram a bactéria *Bacillus pseudofirmus* (figura 14), encontrada em lagos alcalinos e áreas vulcânicas. Com o uso dessa bactéria, eles conseguiram provar que é possível reparar fissuras no concreto e ainda reforçar sua estrutura. Ao adicionar essas bactérias no material junto com uma mistura de nutrientes, Jonkers e Schlangen criaram um sistema onde às bactérias, encapsuladas e adormecidas no material, podem ser ativadas pela presença de água quando a cápsula de argila expandida se rompe, iniciando o processo de reparo nas aberturas e aumentando a vida útil das construções (Barros; Nascimento, 2019).

Figura 14 - *Bacillus Pseudofirmus*

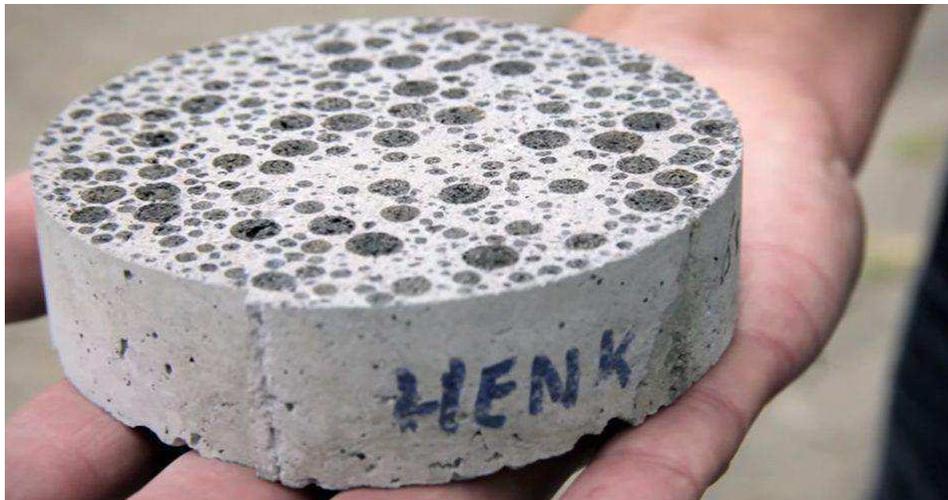


Fonte: Costa et al. (2021)

Este avanço não só indica um futuro mais sustentável na construção civil, mas também mostra como conceitos biológicos podem ser aplicados para resolver desafios da engenharia, marcando um desenvolvimento importante na história dos materiais de construção.

A figura 15 mostra um protótipo de concreto desenvolvido pelo cientista Henk Jonkers, que se destaca por suas propriedades inovadoras. Esse protótipo faz parte do desenvolvimento do concreto auto-regenerativo, que utiliza bactérias para reparar automaticamente qualquer fissura que possa aparecer.

Figura 15 - Protótipo de bioconcreto regenerativo



Fonte: Abes (2016)

2.3.1 Processo químico do bioconcreto para sua capacidade de cura

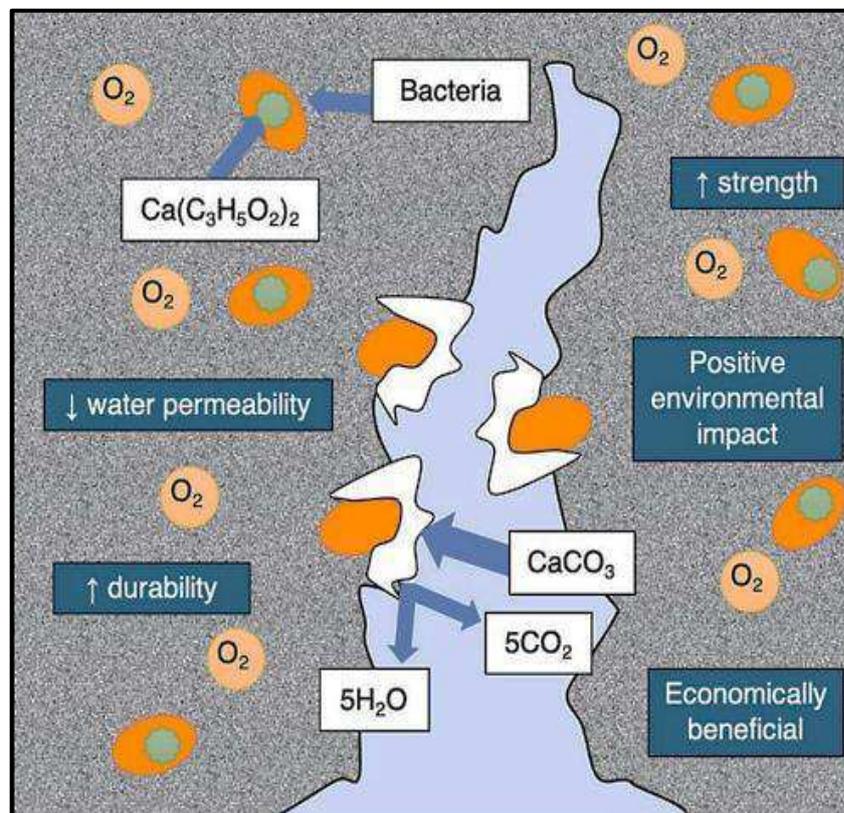
No concreto fresco, são colocadas cápsulas de argila expandida com esporos de bactérias e lactato de cálcio. Essas cápsulas protegem as bactérias até que apareça uma abertura na estrutura. Quando uma fissura se forma no concreto e a água entra na estrutura, os esporos das bactérias se hidratam, começando a germinar e ativar as bactérias. Com isso, as bactérias usam o lactato de cálcio como fonte de energia e carbono. Esse processo acontece com a presença de oxigênio (Eq. 2) (Molyneux, 202).



Com isso, o lactato de cálcio ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2)_2$) reage com o oxigênio (O_2). O resultado dessa reação é a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), dióxido de carbono (CO_2), e água (H_2O). Embora a reação produza CO_2 , o carbonato de cálcio formado captura CO_2 da atmosfera, ajudando na retenção de carbono a longo prazo. Apesar da produção de CO_2 durante a reação, o bioconcreto também absorve CO_2 do ar, resultando em um balanço positivo (Molyneux, 2021).

Por fim, o processo de fechamento das fissuras no bioconcreto é marcado pela formação de carbonato de cálcio dentro das aberturas (figura 16), efetivamente selando-as. Esse material, que é parecido com o que forma conchas e calcário, dá mais força e durabilidade ao concreto. Além disso, a precipitação de carbonato de cálcio ajuda a diminuir a porosidade do concreto, evitando que água e outras substâncias ruins entrem e acelerem a deterioração da estrutura. Como resultado, o bioconcreto com fissuras seladas e menos poroso, mostra uma melhora na resistência à compressão e tração, prolongando assim a vida útil da estrutura (Molyneux, 2021).

Figura 16 - Formação de carbonato de cálcio, dióxido de carbono, e água



Fonte: Molyneux (2021)

2.3.2 Processo de biocimentação

Esse material de construção bioregenerativo emerge como resultado da técnica MICP (Precipitação de Carbonato de Cálcio Induzida Microbiologicamente). Nesse processo as bactérias são introduzidas nos materiais cimentícios, atuando como agentes de cura de longa duração de forma natural. Essa tecnologia busca minimizar os espaços entre as partículas do concreto e reparar as fissuras causadas por patologias naturais ou por tensões mecânicas. A MICP está avançando na engenharia de materiais, oferecendo uma solução ecológica para prolongar a vida útil das estruturas de concreto, promovendo a regeneração do material de maneira eficaz e natural. Na figura 17 é exibido um exemplo de concreto com uma fissura que foi quase totalmente reparado. As fotos na figura mostram a fissura no dia em que apareceu e depois registros de 7 e 28 dias (Costa et al., 2021).

Figura 17 - Regeneração natural do concreto



Fonte: Costa et al. (2021)

A técnica de biocimentação é valorizada pelo seu potencial de melhorar a infraestrutura e a tecnologia, oferecendo métodos mais amigáveis ao meio ambiente e com menos poluição. Ao contrário do cimento convencional, que é conhecido por liberar muito CO_2 durante sua produção, a biocimentação melhora a resistência dos solos sem precisar usá-lo. Além disso, a técnica MICP é amplamente utilizada em diversas aplicações, incluindo a remediação de solos contaminados por metais, o aumento da capacidade de carga dos solos, a criação de novos materiais de construção, a restauração de estruturas de concreto, o sequestro geológico de CO_2

e processos de biomineralização. Esses usos são especialmente relevantes em contextos de geotecnia, construção civil e engenharia ambiental (Silva et al., 2021).

2.3.3 Processo de biomineração

Desde o século XIX, cientistas de várias áreas têm melhorado as técnicas e métodos para analisar substâncias químicas, com o objetivo de criar novos materiais de forma mais eficiente. Um desses avanços é a biomineração, que combina substâncias produzidas por seres vivos com a formação de cristais minerais. Esse processo é interessante porque envolve a criação e o crescimento de depósitos de cristais, que acontece graças à interação entre grandes moléculas orgânicas como proteínas e polissacarídeos (são carboidratos complexos formados por muitos açúcares simples), e íons de minerais. Curiosamente, em organismos vivos, encontra-se cerca de 60 tipos diferentes de minerais formados por processos biológicos, como magnésio, cálcio, fosfato de ferro, sulfato de estrôncio e carbonato de cálcio, mostrando a complexa e rica relação entre o orgânico e o inorgânico na natureza (Fernandes, 2022).

2.3.4 Eficiência do bioconcreto em reparos estruturais

Barros e Nascimento (2019) destacam que o bioconcreto é eficaz em reparar fissuras com até 0,8 milímetros de largura, independentemente de sua extensão, que pode variar de centímetros a quilômetros. Esse material novo pode ser usado em muitos tipos de projetos de engenharia civil, servindo tanto para construções novas quanto para reformas de estruturas já existentes.

Segundo Nascimento (2019), a expectativa em relação ao uso do bioconcreto em reparos é bem alta, principalmente por ele conseguir economizar tempo e dinheiro, já que o material consegue se regenerar sozinho. Além disso, ele é muito útil em lugares difíceis de alcançar, como locais submersos, subterrâneos, incluindo viadutos, pontes, barragens e túneis. Mesmo com a limitação sobre a largura das fissuras, o bioconcreto é uma solução promissora e pode ser usado de várias maneiras.

A tabela 2 a seguir mostra uma comparação das propriedades do bioconcreto.

Tabela 2 - Análise comparativa das propriedades do bioconcreto

Propriedades do Bioconcreto	Resultado
Tempo máximo para fechamento	3 semanas
Limite de extensão da fissura/trinca	Não possui, pode ir de centímetros a quilômetros
Limite de largura da fissura/trinca	0,8 milímetros
Custo	Estimativa de 40% mais caro do que o concreto tradicional
Vida útil da bactéria	200 anos na edificação

Fonte: Costa et al. (2021)

2.3.5 Bactérias do gênero Bacillus

Para a produção do bioconcreto, as bactérias introduzidas na mistura durante a etapa de dosagem precisam apresentar qualidades específicas, como resistência a tensões mecânicas, capacidade de suportar ambientes altamente alcalinos por períodos extensos e tolerância ao oxigênio. Dentre os vários gêneros bacterianos avaliados, o *Bacillus* se destacou. Sua escolha deve-se à sua resistência frente aos álcalis (componentes do cimento Portland), sua natureza formadora de esporos e a sua habilidade de resistir ao oxigênio, tornando-o o candidato ideal para essa aplicação. Quando esporos bacterianos são misturados ao concreto ainda fresco, antes que este endureça, a capacidade de sobrevivência desses esporos pode diminuir bastante, limitando sua eficácia a cerca de quatro meses. Isso acontece porque a contínua hidratação do cimento resulta em um estreitamento dos poros no concreto, de forma que o tamanho dos poros se torne menor que o dos esporos. Diante dos problemas com o funcionamento e a longevidade dos esporos bacterianos, surgem duas soluções possíveis. A primeira solução propõe a adição de agentes que retêm ar, introduzindo microporos na estrutura do concreto, o que facilita a sobrevivência dos esporos. A segunda envolve o encapsulamento dos esporos em uma matriz protetora antes de sua adição à mistura de concreto, protegendo-os das condições adversas (Koga; Santos, 2020).

2.4 Preparação do bioconcreto

A preparação do bioconcreto parte do concreto convencional. A construção civil está passando por uma mudança ecológica com o surgimento de novos materiais que podem se consertar sozinhos, como é o caso das técnicas aplicadas

no concreto para torná-lo capaz de se regenerar. Duas abordagens principais se destacam neste campo. Na primeira abordagem, são adicionados agentes que retêm ar na mistura de concreto, criando pequenos espaços que ajudam os esporos a sobreviverem melhor. Nesse método, quando há fissuras, as bactérias saem do estado vegetativo, e começam a consumir o lactato de cálcio disponível para iniciar o processo de reparo. Esta estratégia é simples e resolve rápido quando o concreto se danifica (Costa et al., 2021).

Já o segundo método usa o encapsulamento de esporos bacterianos e lactato de cálcio em microcápsulas feitas de argila expandida (figura 18), que são incorporadas à mistura de concreto. Essa técnica proporciona uma proteção adicional às bactérias, aumentando muito seu tempo de vida. Quando fissura, permitem a entrada de água e assim as cápsulas se rompem, liberando as bactérias que, então, consomem o lactato de cálcio e iniciam o processo de cicatrização do concreto. Este método de encapsulamento se destaca tanto pela sua capacidade de manter as bactérias viáveis quanto pela sua eficácia em prevenir danos em estruturas essenciais (Costa et al., 2021).

Figura 18 - Esporo bacteriano encapsulado



Fonte: Nascimento (2018)

Ambas as estratégias mostram como os micro-organismos podem ser usados para cuidar das construções, ajudando a economizar dinheiro com manutenção e a proteger o meio ambiente.

No entanto, o bioconcreto tem suas limitações. Uma delas é o custo inicial alto, e a outra é a sua produção, que é complicada. Para fazer bioconcreto, são usadas técnicas avançadas de incorporação de bactérias na mistura do concreto e é

preciso cuidar bem das condições biológicas, como temperatura, umidade e pH. Esse cuidado todo assegura que as bactérias possam efetivamente reparar fissuras, mas isso também aumenta os custos de produção e demanda conhecimento especializado e equipamentos específicos para manter a qualidade sempre boa.

2.5 Inovação brasileira em bioconcreto autorregenerativo

No Brasil, inspiradas pela pesquisa inovadora de Henk Jonkers e Eric Schlangen, as estudantes Lívia Colossal Rodrigues Sciascio, Letícia Percio Miguel e Maria Clara Leme Trindade deram uma grande contribuição para a área de materiais de construção. No contexto de seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) no curso técnico em edificações da Escola Técnica Estadual (Etec) Polivalente de Americana (SP), elas criaram uma versão brasileira do bioconcreto autorregenerativo. Esse material, que se inspira no trabalho pioneiro dos cientistas, promete evitar fissuras e diminuir os gastos de manutenção em construções de concreto (Gaudio, 2023).

A pesquisa original dos cientistas se concentrou no uso da bactéria *Bacillus Pseudofirmus*, que vive em ambientes extremos, como crateras de vulcões ativos, mas a aplicação dessa bactéria revelou-se economicamente inviável no Brasil devido aos altos custos de importação. Então, as estudantes decidiram usar a bactéria *Bacillus Subtilis*, abundante em território nacional e de fácil obtenção em rios e lagos. Essa bactéria é conhecida por ajudar a controlar doenças em plantações. A técnica, mostrada na figura 19 através de protótipos do teste prático, envolve adicionar ao concreto tradicional bactérias dormentes que, ao serem ativadas pela exposição ao ambiente, consomem matéria orgânica e produzem calcário, concertando assim as rachaduras no material (Gaudio, 2023).

Figura 19 - Protótipos do ensaio prático para o estudo do bioconcreto



Fonte: Etec Americana/Divulgação

A união dessa bactéria com o concreto trouxe uma solução prática e econômica, que atende às necessidades do mercado de construção no Brasil. Isso mostra como a pesquisa acadêmica é crucial para encontrar soluções sustentáveis e acessíveis para os desafios atuais.

2.6 Estruturas subterrâneas

A presença de água em obras de túneis pode causar vários problemas, desde pequenas goteiras até grandes inundações, isso pode afetar a estabilidade do terreno, danificar a construção e colocar em risco a segurança dos trabalhadores (figura 20). Por isso, é necessário tomar medidas extras para resolver o problema. Além disso, estruturas subterrâneas e marítimas têm um risco maior de corrosão nas partes de aço por causa da umidade alta (Araújo et al., 2019).

Figura 20 - Construção subterrânea, escavação de túnel



Fonte: Araújo et al. (2019)

Quando tem água em escavações subterrâneas, seja por causa da natureza ou por ações humanas, isso pode atrapalhar a construção e a estabilidade do túnel e das áreas ao redor, podendo até causar desmoronamentos em casos mais graves. Esse risco aumenta bastante quando a escavação é feita em declive ou a partir de um poço (Araújo et al., 2019).

A alta pressão e o desgaste causado pela água, junto com as paredes estruturais e a área escavada que podem não ser fortes o suficiente, podem afetar a estabilidade dos túneis. Isso exige uma boa gestão da água para garantir a segurança e a integridade estrutural. Controlar e prevenir infiltrações são essenciais para evitar atrasos e assegurar que a escavação avance sem problemas (Araújo et al., 2019).

Em lugares onde a água está sempre presente, como em áreas subterrâneas alagadas ou em regiões costeiras, as construções enfrentam um grande desafio para durar bastante tempo. Isso é principalmente por causa do aço que é usado para deixá-las firmes. A alta umidade e o contato direto com a água aceleram o processo de corrosão no aço, danificando a estrutura e encurtando a vida útil dessas construções (Nascimento, 2019).

O concreto, em sua composição, apresenta uma solução altamente alcalina em seus poros, com valores de pH variando entre 12 e 13. Essa característica se deve principalmente ao hidróxido de cálcio gerado pelas reações de hidratação dos silicatos de cimento, além dos álcalis presentes no clínquer, sendo o cimento considerado numa fase básica de sua fabricação. Essa peculiaridade alcalina do

concreto, onde o pH pode alcançar até 13 quando cimento e água são misturados, estabelece um ambiente extremamente desafiador para a sobrevivência de formas de vida. Esse ambiente, geralmente letal para a maioria dos organismos em valores de pH de 10 ou mais, guiou o início da pesquisa dos cientistas, focada na identificação de bactérias que conseguem sobreviver nesse tipo de condição muito alcalina (Araújo et al., 2019).

O bioconcreto integra bactérias do gênero *Bacillus*, que crescem bem em um ambiente alcalino criado pela liberação de hidróxido de cálcio quando o concreto é hidratado. Essas bactérias consomem lactato de cálcio e, através de seu metabolismo, produzem carbonato de cálcio (CaCO_3), que preenche os poros do concreto, aumentando sua resistência e selando fissuras em até três semanas. Os inventores desse material descobriram que, ao adicionar essas bactérias na água usada para fazer concreto, criam-se as condições ideais para as bactérias crescerem. Isso permite que o bioconcreto se repare sozinho em um ambiente alcalino (Costa et al., 2021).

Dessa forma, usar o bioconcreto como nova tecnologia faz com que construções subterrâneas fiquem mais resistentes à água, diminuindo a chance de danos e reduzindo os custos de manutenção.

2.7 Estruturas não-subterrâneas

O concreto biológico, ainda em fase experimental, busca consolidar sua presença no mercado para mostrar que funciona bem em diferentes situações complicadas. Uma das primeiras aplicações notáveis ocorreu em 2011, durante a construção de uma estação de salva-vidas (figura 21) em uma ilha artificial, a mesma se encontra situada na margem do lago Markermeer na Holanda (figura 22). Esta instalação, escolhida por sua exposição a condições severas, incluindo intensa luz solar e interação constante com água, tem se mantido excepcionalmente bem conservada, mostrando como o concreto biológico é resistente e funciona bem mesmo em lugares difíceis (Lima, 2023).

Figura 21 - Posto de salva-vidas no lago de Galder na Holanda



Fonte: Zago (2021)

Figura 22 - Ilha artificial criada para salvar espécies selvagens

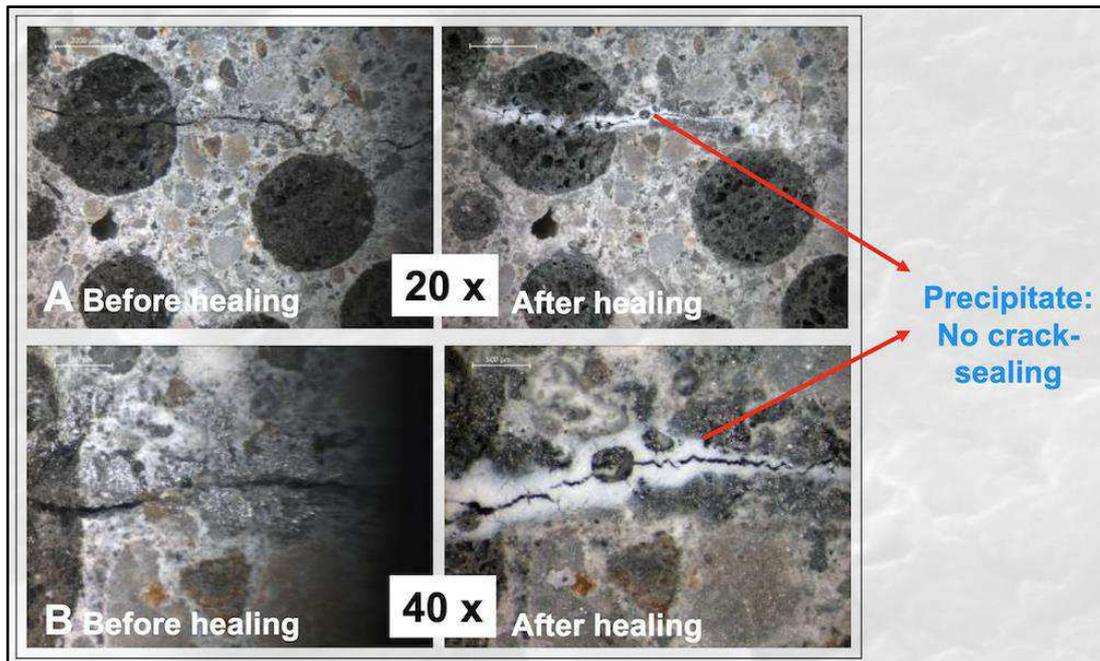


Fonte: Lima (2023)

2.8 Viabilidade econômica, custos e sustentabilidade

A figura 23 mostra uma seção de concreto que apresentava fissuras e foi posteriormente reparada. O texto da imagem descreve: *Precipitate: No crack – sealing* (Precipitado: Sem rachadura – vedação).

Figura 23 - Regeneração automática de base biológica



Fonte: Celere (2021)

2.8.1 Eficiência e economia

O material de base biológica torna as construções mais duradouras, superando o concreto convencional, pois é mais resistente e diminui a chance de consertos surpresa. Sua capacidade de preencher vazios na estrutura garante uso seguro e prolongado. Com isso, a redução de gastos com manutenção com tempo de vida mais longo é uma das promessas do material autorregenerativo, já que representa uma economia significativa em reparos estruturais. A principal dificuldade para usar essa tecnologia é que ela pode custar o dobro do concreto comum no começo. Esse fator coloca em destaque a necessidade de balancear o investimento inicial mais alto com as economias futuras proporcionadas pela diminuição das manutenções (Souza, 2021).

Ainda que o aspecto financeiro desempenhe um papel crucial na escolha entre medidas preventivas e corretivas, a experiência prática revela que os gastos associados à prevenção são inferiores aos custos de correção (ALVES et al., 2019).

A construção civil está se beneficiando de novidades que permitem materiais se consertarem sozinhos, especialmente o concreto, onde até pequenas melhorias podem economizar muito dinheiro. Esses avanços ajudam a aumentar os intervalos entre manutenções e adiar consertos, o que reduz significativamente os custos. Em

situações críticas, como evitar vazamentos de substâncias tóxicas que afetam a saúde, é crucial evitar danos nas estruturas. Por isso, materiais resistentes que se auto-reparam são extremamente importantes. Nessas situações, o preço do material fica em segundo plano frente à sua necessidade vital e à sua eficácia única (Alves et al., 2019).

Segundo Souza (2021), na Europa, todo ano são gastos mais de US\$ 6,8 bilhões (equivalente a mais de R\$ 22 bilhões) para consertar construções que estão se desgastando. O bioconcreto pode reduzir pela metade esses custos ao longo da vida útil do concreto, o que significa uma economia enorme.

2.8.2 Biotecnologia: Futuro construtivo sustentável

Utilizando organismos vivos e sistemas biológicos, a biotecnologia oferece a possibilidade de revolucionar a indústria da construção civil através da criação de soluções mais eficientes, inteligentes e benéficas ao meio ambiente. Entre esses progressos, destaca-se o desenvolvimento de materiais como o bioconcreto. Esta opção ecológica ajuda as construções a durarem mais, usa menos recursos novos e pode reduzir muito o dano ao meio ambiente (Souza, 2021).

A quantidade de cimento produzido no mundo por ano, alcança 4 bilhões de toneladas e contribui para cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), materiais baseados em biologia que são capazes de absorver carbono da atmosfera representam um caminho promissor para um futuro do setor construtivo mais verde e responsável (Souza, 2021).

3 METODOLOGIA

Este estudo utilizou a revisão bibliográfica para explorar o desenvolvimento, propriedades e aplicações do bioconcreto no âmbito da construção civil, entre outros setores. Tal abordagem envolveu uma criteriosa seleção e análise de materiais provenientes de diversas fontes, incluindo o Scielo (*Scientific ElectronicLibrary Online*), artigos acadêmicos, websites, trabalhos de conclusão de curso e publicações especializadas, tanto de âmbito nacional quanto internacional. Conforme Marconi e Lakatos (2021), a pesquisa bibliográfica permite um contato direto e aprofundado com o tema em estudo, por meio do levantamento de dados de múltiplas origens, como livros, artigos científicos, teses e dissertações. Esta estratégia metodológica viabilizou uma compreensão abrangente e atualizada sobre o bioconcreto, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento no campo da engenharia civil e áreas correlatas.

Para a coleta de dados, foram empregados descritores específicos, incluindo concreto convencional, história do concreto, bioconcreto, bactérias no concreto, biomineralização, autocicatrização, patologias no concreto, fissuras, trincas e entre outras palavras relacionadas ao tema. A seleção dos artigos baseou-se nos seguintes critérios: publicações em português e inglês, e pesquisas feitas a partir do ano de 2019.

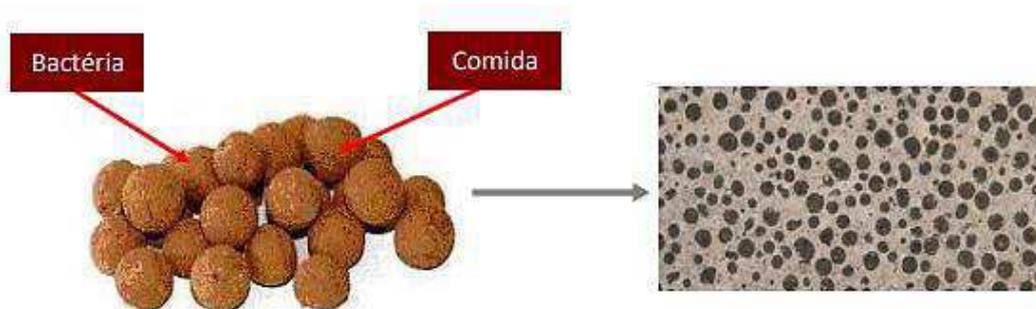
Este estudo explorou a aplicação do bioconcreto na reparação de fissuras e microfissuras em estruturas de concreto armado, analisando sua eficácia, durabilidade e viabilidade tanto técnica quanto econômica em comparação ao concreto convencional. Foi feita uma avaliação comparativa concentrando-se no rendimento estrutural, desempenho e período de vida, incluindo uma análise sobre resistência à compressão e flexão e presença de patologias. Também foram examinadas as vantagens e limitações do bioconcreto, levando em conta fatores como método de preparo, investimento em produção, manutenção e conservação, dentre outras variáveis econômicas para o concreto autocurável e para o convencional.

3.1 Descrição qualitativa

De acordo com Costa et al. (2021), existem duas abordagens fundamentais para a preparação do bioconcreto, ambas visando incorporar capacidades de autocura ao material. Na primeira estratégia, são colocadas substâncias que retêm o ar no concreto, formando pequenos espaços que ajudam os esporos a sobreviverem melhor. Essa técnica garante que, caso apareçam rachaduras, as bactérias sejam ativadas, saiam do seu estado de descanso e comecem a consumir o lactato de cálcio, dando início ao conserto. Esse método é valorizado por ser simples e por responder rapidamente aos danos.

A segunda abordagem, conforme explicado por Costa et al. (2021), usa a encapsulação de bactérias e lactato de cálcio em cápsulas feitas de argila expandida, que são depois misturadas ao concreto (figura 24). Essa ideia inovadora tem o objetivo de proteger as bactérias até que sejam necessárias. Quando aparecem rachaduras e a água entra, as cápsulas se quebram, liberando as bactérias para iniciar a reparação. Esse método faz com que as bactérias durem mais e continuem eficientes, ajudando a manter o concreto em bom estado por mais tempo.

Figura 24 - Esporos de bactérias, argila expandida e lactato de cálcio no concreto



Fonte: Nascimento (2019)

O bioconcreto traz grandes vantagens, como aumentar a lucratividade na construção e diminuir os gastos com manutenção. Isso acontece porque ele se conserta sozinho e é pensado para construções que respeitam o meio ambiente, oferecendo melhor desempenho e conforto (Costa et al., 2021).

Mesmo tendo muito potencial em várias áreas, o bioconcreto ainda enfrenta alguns desafios que precisam ser resolvidos antes de se tornar amplamente utilizado

no mercado. Um dos obstáculos mais evidentes é sua demora no processo de se concertar sozinho, podendo levar semanas ou até meses para que as bactérias formem novos depósitos de calcita e preencham as fissuras. Se comparado com métodos químicos mais simples e tradicionais (injeção de epóxi, selantes de poliuretano e misturas de concreto de reparo rápido), que reparam o concreto em 24 a 48 horas, é notável que esses métodos sejam mais rápidos. Esse desafio acontece porque a atividade microbiana depende de fatores do ambiente, como a temperatura, o pH, a quantidade de nutrientes disponíveis e como eles se espalham, e também dos processos de transformação de substâncias que ocorrem dentro deles, conforme mencionado por Costa et al. (2021).

3.2 Descrição quantitativa

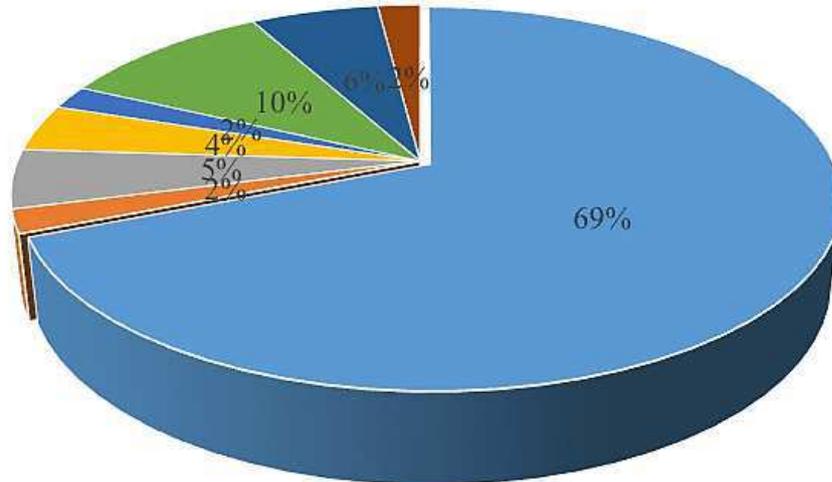
Com o passar do tempo, as construções podem apresentar problemas. Isso pode afetar a estrutura, a aparência ou o funcionamento delas, comprometendo a qualidade final. Muitas vezes, são feitas com materiais mais baratos, o que aumenta a chance de surgirem problemas como rachaduras. Essas falhas podem aparecer em diferentes momentos durante a construção, por causa de erros no projeto, materiais ruins ou técnicas de construção deficientes; ou depois que as pessoas começam a usar o espaço, devido a mau uso, falta de manutenção ou condições ambientais adversas (Lima 2023).

Segundo Silva (2018), a camada de concreto que cobre o aço é muito importante para proteger contra a corrosão. Isso acontece de duas formas, sendo a primeira, por proteção química, que impede reações ruins usando uma substância alcalina; segundo, por proteção física, que dificulta a entrada de substâncias nocivas como o dióxido de carbono (CO_2) e limita a presença de água e oxigênio, que são fundamentais para a corrosão.

Um estudo feito por Silva (2018) no Brasil analisou 166 obras e descobriu que aproximadamente 69% delas tinham problemas de corrosão na armadura, muitos começando com trincas e fissuras expostas ao ar (figura 25).

Figura 25 - Manifestações patológicas comuns em concreto endurecido

- 1 - Corrosão das armaduras
- 2 - Problemas estruturais
- 3 - Detalhes construtivos
- 4 - Desagregação do concreto
- 5 - Ataque químico
- 6 - Recalque Diferencial

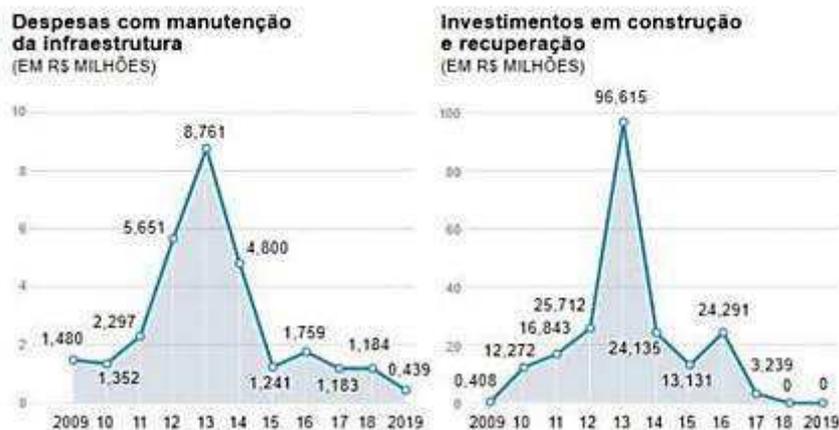


Fonte: Silva (2018)

Segundo Schmidt (2019), em um artigo para o jornal O Globo, informou que a Prefeitura do Rio de Janeiro investiu R\$ 439.000,00 em manutenções, abrangendo viadutos, pontes, passarelas e túneis. O autor comparou esses investimentos com períodos anteriores, conforme mostrado na figura 26. Esses dados foram obtidos do sistema Fincon e dos registros financeiros da prefeitura.

Figura 26 - Custos de manutenção no Rio de Janeiro

GASTOS ANUAIS COM VIADUTOS, PONTES, PASSARELAS E TÚNEIS



Fonte: Zago (2021)

Considerando as informações disponíveis e o estudo de Silva, que indica que 69% das estruturas enfrentam problemas patológicos, e comparar com os investimentos anuais da Prefeitura do Rio de Janeiro relatados por Schmidt, é possível extrair algumas conclusões sobre a viabilidade ao cruzar esses dados (Zago, 2021).

Adotando o bioconcreto, com suas propriedades autorregenerativas, as estruturas que apresentam problemas, que são 69% do total, poderiam dispensar manutenções, eliminando assim esses custos. Isso representaria uma considerável economia no orçamento para manter essas estruturas funcionando. De acordo com a tabela 3, usar essa tecnologia poderia reduzir os custos anuais de manutenção (Zago, 2021).

Tabela 3 - Custo efetivo de manutenção empregando bioconcreto

Ano	Despesa em Manutenção	69% de economia	Valor Real da Manutenção
2010	R\$ 1.352.000,00	R\$ 932.880,00	R\$ 419.120,00
2011	R\$ 2.297.000,00	R\$ 1.584.930,00	R\$ 712.070,00
2012	R\$ 5.651.000,00	R\$ 3.899.190,00	R\$ 1.751.810,00
2013	R\$ 8.761.000,00	R\$ 6.045.090,00	R\$ 2.715.910,00
2014	R\$ 4.800.000,00	R\$ 3.312.000,00	R\$ 1.488.000,00
2015	R\$ 1.241.000,00	R\$ 856.290,00	R\$ 384.710,00
2016	R\$ 1.759.000,00	R\$ 1.213.710,00	R\$ 545.290,00
2017	R\$ 1.183.000,00	R\$ 816.270,00	R\$ 366.730,00
2018	R\$ 1.184.000,00	R\$ 816.960,00	R\$ 367.040,00
2019	R\$ 439.000,00	R\$ 302.910,00	R\$ 136.090,00

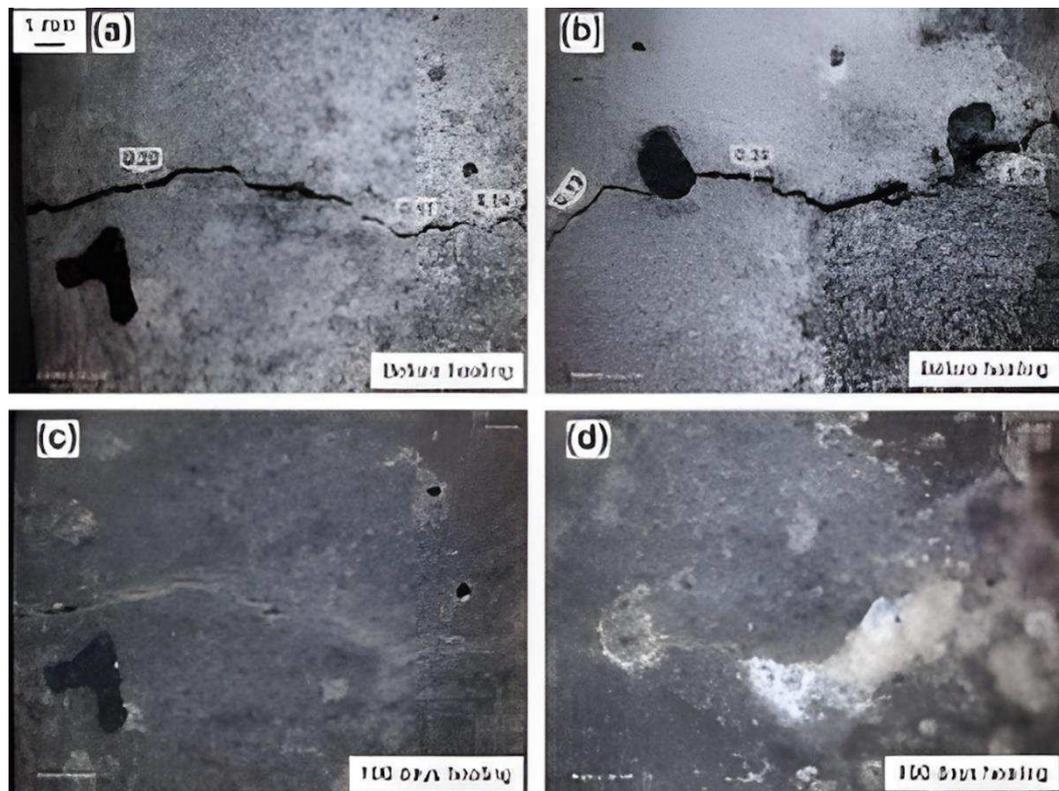
Fonte: Zago (2021)

Dessa forma, fica evidente que o uso de bactérias no concreto tem um impacto significativo. Considerando as economias potenciais em manutenção, faz sentido optar por essa nova tecnologia em vez do concreto convencional, que pode proporcionar um retorno rápido sobre o investimento (Zago, 2021).

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

A partir dos experimentos realizados pelos autores mencionados, foi observado que os microrganismos desempenham um papel eficaz no processo de precipitação de carbonato de cálcio, com resultados que comprovam sua eficiência nesse processo (figura 27). É notável que, em comparação com o concreto convencional (figura 28), o concreto de base biológica apresenta um comportamento distinto, onde o carbonato de cálcio preenche as fissuras (figura 29). Além disso, a introdução de esporos bacterianos em argilas expandidas facilitou a formação de carbonato de cálcio (Junior; Cerqueira, 2019).

Figura 27 - Observação estereomicroscópica das amostras



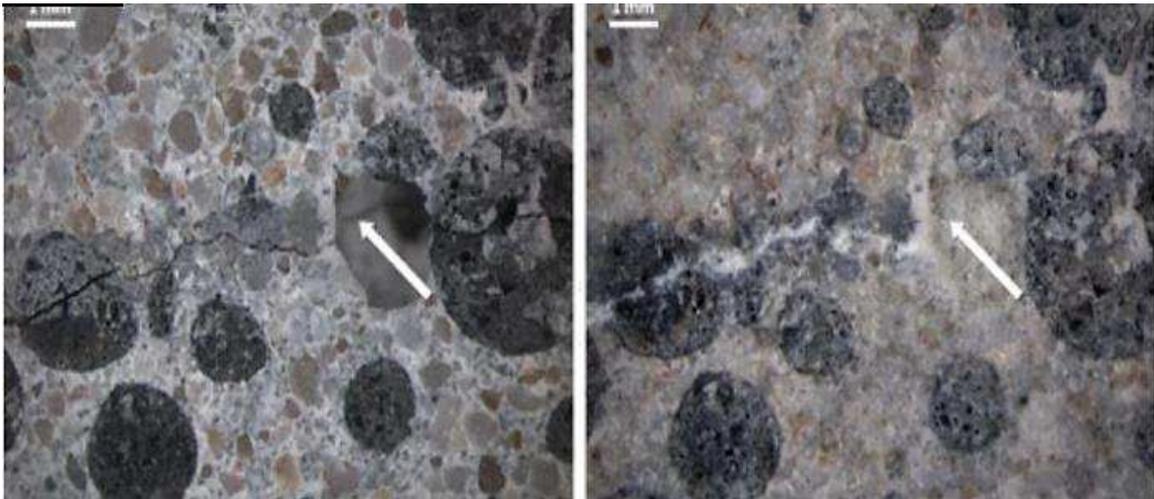
Fonte: Junior; Cerqueira (2019)

Figura 28 - Corpo de prova de concreto com fissuras



Fonte: Carvalho; Cabral (2018)

Figura 29 - Esporos germinam e selam rachaduras



Fonte: Junior; Cerqueira (2019)

4.1 O bioconcreto é renovável e consome pouca energia em sua produção

A construção civil é uma das grandes causadoras de impactos ambientais, usando muitos recursos naturais e energia e contribuindo muito para a degradação do meio ambiente. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) de 2012, o setor não só consome cerca de 40% dos recursos naturais e da energia produzida, mas também é responsável por 12% do uso de água e 55% da madeira não certificada usada globalmente. Além disso, contribui significativamente para a poluição ambiental e gera cerca de 40% do total

de resíduos sólidos urbanos (RSU), aumentando seu papel na poluição e na produção de resíduos que afetam o planeta (Santiago; Botelho; Santarém, 2021).

Os efeitos causados por essa indústria são diversos e consideráveis, necessitando de uma análise cuidadosa. A Tabela 4 apresenta detalhadamente alguns desses impactos para melhor compreensão.

Tabela 4 - Impactos ambientais e utilização de materiais

IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO
Utilização da Madeira	39% do ecossistema natural
Edifícios Brasileiros	21% da água consumida do país
Construção e Manutenção da Infraestrutura	75% do recursos naturais extraídos, sendo a maior consumidora
Cadeia Produtiva da Construção	Contribui para poluição, liberação de gases do efeito estufa, como CO_2
Risco de Contaminação Ambiental	Lixiviação de biocidas e metais pesados de alguns materiais de construção

Fonte: Santiago; Botelho; Santarém (2021)

É importante entender como a produção de cimento contribui para o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, já que o cimento é essencial na fabricação de concreto, mas emite muito CO_2 . Em 2013, estima-se que a produção de cimento no Brasil tenha emitido 610 kg de CO_2 por tonelada produzida, conforme dados do Centro de Análise de Informações sobre Dióxido de Carbono (CDIAC). Com uma demanda projetada de 3,6 bilhões de toneladas por ano até 2050. Isso representa um aumento considerável em comparação com os níveis atuais de produção de cimento, necessitando urgentemente da adoção de práticas mais sustentáveis na indústria do cimento para reduzir seu impacto ambiental (Santiago; Botelho; Santarém, 2021).

No cenário global, aproximadamente 90% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na produção de cimento originam-se da fabricação do clínquer. Este é um mineral artificial obtido pelo aquecimento de calcário, argila e outros materiais a temperaturas muito elevadas, induzindo reações físico-químicas. Para atingir essas altas temperaturas, é necessário queimar grandes quantidades de combustíveis fósseis (Santiago; Botelho; Santarém, 2021).

Portanto, é importante destacar que substituir o concreto convencional pelo bioconcreto pode reduzir bastante às emissões de CO₂ na atmosfera. Isso ocorre porque esse tipo de material biológico tem o potencial de capturar carbono da atmosfera durante o processo de calcificação. Ao utilizar mais bioconcreto em construções, haverá menos necessidade de manutenção. Isso significa menos produção de clínquer e cimento para reparos. Além disso, o bioconcreto pode prolongar a vida útil das estruturas, reduzindo a demanda por novos materiais de construção e a extração de recursos naturais adicionais. Portanto, o uso de materiais biológicos é crucial para avançar em direção a uma indústria da construção mais sustentável, representando uma estratégia essencial para mitigar o impacto ambiental e promover benefícios ambientais sempre.

4.2 Resultados dos testes de compressão e flexão do bioconcreto e concreto convencional

Nos estudos conduzidos pelos autores referenciados neste trabalho, concentraram-se em comparar a resistência do bioconcreto com o concreto convencional. Foram realizados testes para avaliar a resistência à flexão e compressão (figura 30).

Figura 30 - Teste de compressão do bioconcreto por Henk Jonkers



Fonte: Faustino; Assunção; Garcia (2020)

Segundo Raj (2016), em seu relatório de seminário para o blog Civil Engg. Seminar, os resultados dos testes de resistência à compressão e flexão mostraram que o concreto enriquecido com bactérias teve uma resistência significativamente maior em comparação com o concreto convencional (sem bactérias).

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos por meio dos testes de compressões em amostras de concreto convencional e bioconcreto de 7 e 28 dias (figura 31), enquanto a Tabela 6 mostra os resultados dos testes de flexões com o mesmo período de tempo (figura 32). Os resultados foram medidos em N/mm^2 , sendo $1 N/mm^2$ igual a $1 Mpa$ (Raj, 2016).

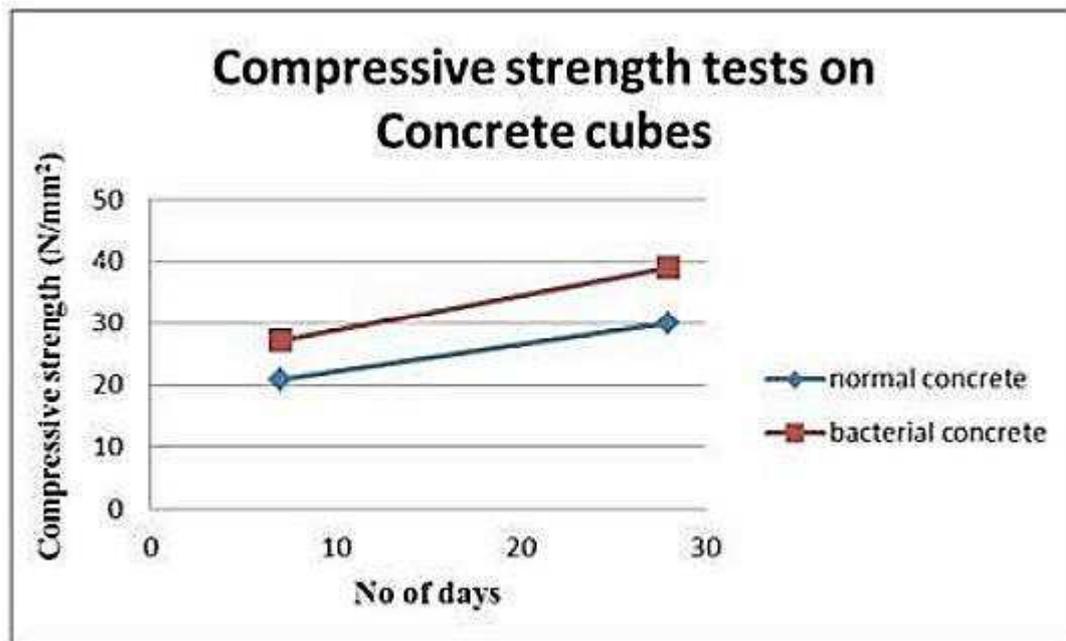
- Testes de compressões

Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto em 7 e 28 dias

Ensaio	Dias	Concreto normal (N/mm^2)	Concreto com a bactéria (N/mm^2)
1	7	20,84	27,09
2	28	29,99	38,98

Fonte: Silva et al. (2021)

Figura 31 - Resistência à compressão do concreto convencional e do bioconcreto



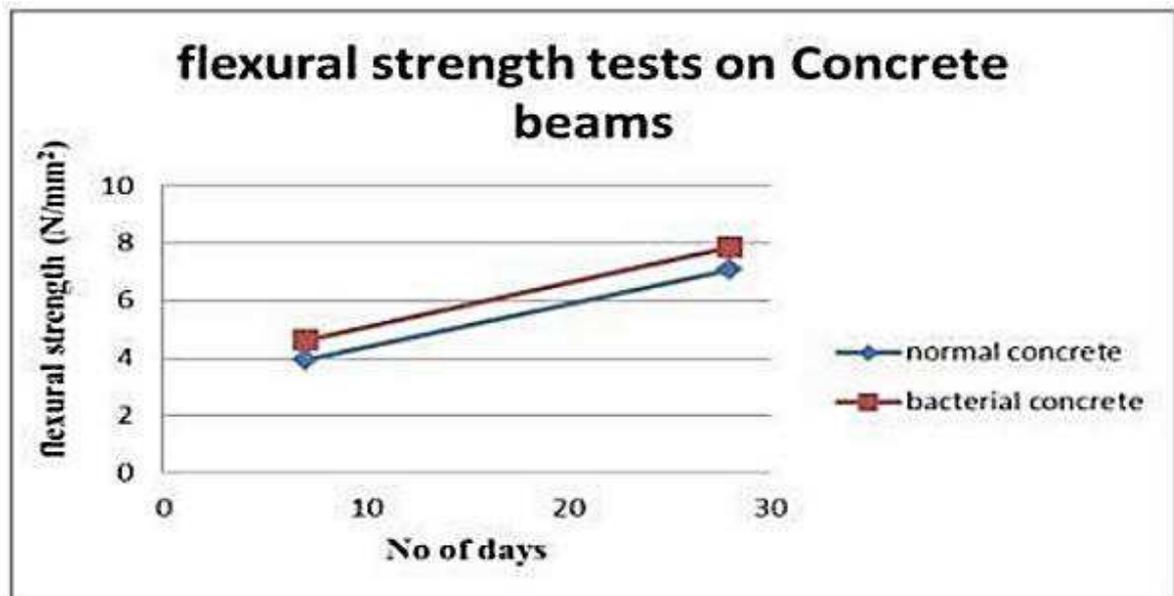
Fonte: Silva et al. (2021)

- Testes de flexões

Tabela 6 - Resultados de resistência à flexão

Ensaio	Dias	Concreto normal (N/mm ²)	Concreto com a bactéria (N/mm ²)
1	7	3,92	4,6
2	28	7,07	7,85

Fonte: Silva et al. (2021)

Figura 32 - Resistência à flexão do concreto convencional e do bioconcreto

Fonte: Silva et al. (2021)

Ao analisar as tabelas 5 e 6, assim como as figuras 31 e 32, fica claro que o bioconcreto mostrou uma resistência tanto à compressão quanto à flexão superior ao concreto convencional. Como resultado, o bioconcreto com fissuras seladas e menor porosidade apresenta uma melhora na resistência à compressão e tração, aumentando assim a vida útil da estrutura. Dessa forma, é evidente que o bioconcreto é mais eficaz no aumento da resistência comparado ao concreto tradicional.

Segundo Silva et al. (2021), testes de resistência a compressão no corpo de prova de base biológica e concreto convencional foram realizados em intervalos de 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270 e 365 dias, utilizando a bactéria *Bacillus Subtilis*. Os resultados desses testes estão apresentados na tabela 7 e na figura 33. Para a realização dos ensaios, foi empregada uma máquina de compressão com

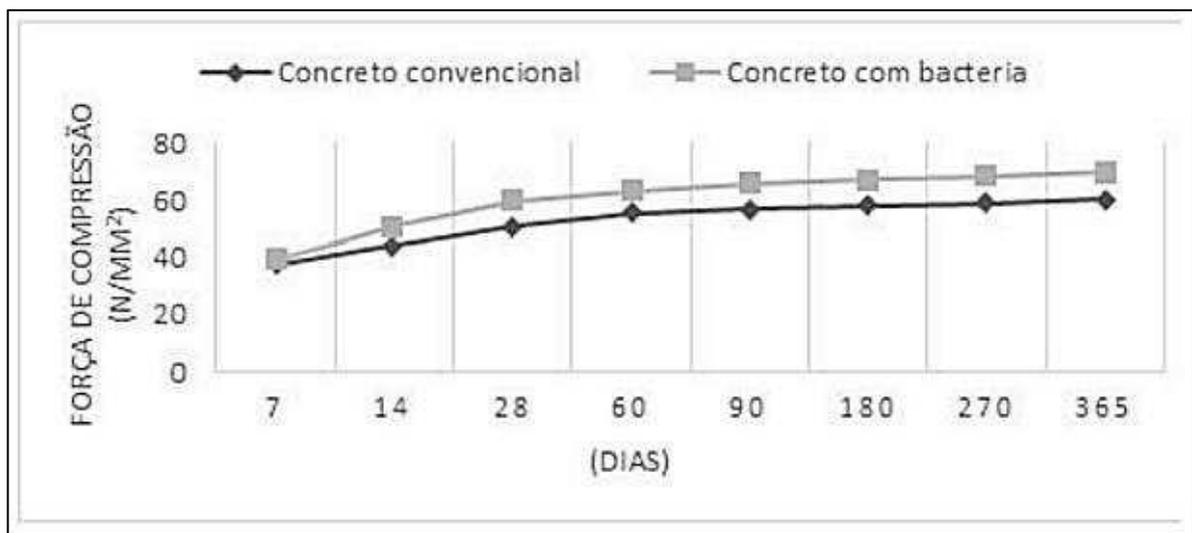
capacidade de 1000 kN equivalente a 101.971,6 kg, conforme especificado na norma IS 516:1959 - Método de Ensaio de Resistência do Concreto.

Tabela 7 - Resultado do teste de compressão usando a bactéria *Bacillus Subtilis*

Idade em dias	Concreto convencional, (N/mm ²)	Concreto com a bactéria, (N/mm ²)
7	37,57	39,48
14	44,73	51,26
28	51,19	60,17
60	55,39	63,35
90	56,97	66,27
180	58,37	67,62
270	59,17	68,84
365	60,87	70,07

Fonte: Silva et al. (2021)

Figura 33 - Resultado do teste de flexão utilizando a bactéria *Bacillus Subtilis*



Fonte: Silva et al. (2021)

Os resultados dos testes de compressões no corpo de prova do bioconcreto em cada intervalo são superiores ao do concreto tradicional, evidenciando sua melhor eficiência e resistência a compressão.

4.3 Impactos econômicos dos reparos em concreto e solução

Mesmo sendo um material resistente, o concreto acaba desenvolvendo rachaduras, o que muitas vezes exige reparos ou até substituição. Consertar essas

estruturas é complicado e pode ser caro por causa da localização e dificuldade de acesso. No mundo todo, grandes quantias de dinheiro são gastas nesses consertos, com custos estimados em £117 por m³ de concreto (R\$ 760,85 por m³). No Reino Unido, 45% da indústria da construção se dedica a reparos e manutenção. Além dos custos diretos, fechar infraestruturas para reparos gera custos indiretos altos, que podem ser até dez vezes maiores que os diretos, chegando a US\$ 63 bilhões por ano nos EUA. Usar bactérias no concreto pode diminuir bastante esses custos (Molyneux, 2021).

O custo inicial do concreto convencional varia entre £65 e £75 por m³, que em reais seria de R\$ 422,69 a R\$ 487,72 por m³, considerando £1 como R\$ 6,50. Já o concreto com bactérias custa cerca de £90 por m³ (R\$ 585,27 por m³), sendo aproximadamente 40% mais caro que o concreto convencional. Apesar desse preço inicial mais alto, o investimento em concreto bacteriano pode valer a pena pelos benefícios a longo prazo. Usar esse tipo de concreto reduz os gastos com reparos e as interrupções causadas por essas manutenções. Além de poder se auto-selar, o concreto bacteriano tem maior resistência à compressão e à tração. Ele é menos poroso, o que aumenta sua durabilidade, e sua menor permeabilidade impede a entrada de agentes nocivos, protegendo a estrutura do concreto (Molyneux, 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância do concreto nas construções é indiscutível. Ele é essencial em todas as obras e suas técnicas de produção têm evoluído bastante. Uma dessas inovações é o uso do bioconcreto, que apresenta várias melhorias em relação ao concreto convencional. Esse material utiliza colônias de bactérias do gênero *Bacillus* para reparar patologias no concreto, aumentando a eficiência, a resistência e a sustentabilidade no setor de construções. Essa inovação é importante tanto para a engenharia civil quanto para o meio ambiente, e por isso, atrai a atenção de investidores na construção civil. Seus principais benefícios incluem a redução de custos, diminuindo o investimento necessário para construir ou reparar problemas, e a melhoria na construção de edifícios, que passam a resistir melhor a fissuras e a necessitar de menos manutenções frequentes.

As revisões bibliográficas mostram que o bioconcreto é uma alternativa muito sustentável e promissora em comparação com o concreto convencional. Esse material biológico é uma novidade no mercado e oferece várias vantagens sobre o concreto tradicional, como maior resistência à compressão e à flexão, conforme indicado nas tabelas 5 e 6. Além disso, o bioconcreto também melhora a durabilidade do material.

O estudo analisou como o bioconcreto reage a problemas estruturais, usando evidências científicas e ilustrações em imagens e tabelas. Os resultados mostraram que ele pode se regenerar automaticamente, aumentando sua resistência e outras características em comparação com o concreto convencional. Dessa forma o bioconcreto é realmente eficaz, sua aplicação é correta e benéfica, com potencial para melhorar significativamente a capacidade de autoreparo do concreto.

Por fim, o uso do bioconcreto pode transformar as formas de construir, simplificar processos e promover soluções mais sustentáveis para enfrentar desafios ambientais na engenharia civil. Este material se destaca por reduzir os custos de reparo e aumentar a durabilidade das construções, graças à sua capacidade de se regenerar automaticamente. Isso pode torná-lo cada vez mais popular no mercado.

REFERÊNCIAS

ABES. **Bioconcreto que se regenera pode mudar construções**. 10 out. 2016. Disponível em: <<https://abes-es.org.br/bioconcreto-que-se-regenera-pode-mudar-construcoes/>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

ALVES, Laís. et al. Bioconcrete Characterization and Self-Healing Properties. *In: V Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Ambiente e Tecnologia - CIEEMAT*, 11-13 set. 2019, Portalegre, Portugal. Publicado em 26 dez. 2019.

ANDRADE, Ana Clara Alves et al. A estimativa do custo do projeto de concreto autocurativo à base de bactérias. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S.l.], v. 11, n. 7, e20011729908, maio 2022. Disponível em: <<file:///C:/Users/ACER%20CORI%20I5%207G/Downloads/29908-Article-341991-1-10-20220521.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

ARAÚJO, Carlos Eduardo S.B. de; ABREU, Brendon Garcia; ORFÃO, Ronaldo Barros; AMARANTE, Mayara dos Santos. Bioconcreto. *Revista Diálogos Interdisciplinares*, v. 8, n. 2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

Blog do Silvano. **Um caminho que te leva a Roma**. 2020. Disponível em: <<https://www.blogdosilvano.com.br/post/via-appia>>. Acesso em: 23 fev. 24.

BRITO, J. E. G.; SOUSA, L. C. Bioconcreto: uma inovação sustentável na construção civil. *In: Encontro de Extensão, Docência e Iniciação Científica (EEDIC)*, v. 7, nov., p.1., 2020, Quixadá, CE. Disponível em: <<http://publicacoesacademicas.unicatolicaquixada.edu.br/index.php/eedic/article/view/4310/3791>>. Acesso em: 09 mar. 2024.

BUNDER, Jeferson. **O Concreto**: Sua Origem, Sua História. Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pós-Graduação – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura, Disciplina: Tecnologia do Concreto Aplicado à Arquitetura e Urbanismo, Junho de 2016.

CARNEIRO, V. H. S. C.; GIL, L. K. S.; CAMPOS NETO, M. P. **Calor de Hidratação no Concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 67f., 2011. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/CALOR_DE_HIDRATA%C3%87%C3%83O_N_O_CONCRETO.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

CARVALHO, A. R. de; CABRAL, A. E. B. Concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 71, n. 1, e12176, 2018. Disponível: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/TGFSpW4bWKhmzKQKWN9nHfs/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

CARVALHO, J. D. **Um pouco sobre a história do concreto**. Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil. DEC. Universidade. Estadual de Maringá, PR, 2008.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão**: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, v. 55, p. 18-32, 2009.

COSTA, Lúcio de Barros et al. Bioconcreto e sua aplicabilidade na recuperação de manifestações patológicas na construção civil. *Revista Mangaio Acadêmico*, v. 6, n. 47-67, 2021. Disponível em: Disponível em: <<https://estacio.periodicoscientificos.com.br/index.php/mangaio/article/view/1553>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

COUTO, José Antônio Santos et al. **O concreto como material de construção**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 49–58, 2013. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/552>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

CLAUDINO, Cinthia Maria de Abreu; GOMES, Bruno Menezes da Cunha; NEVES, Yuri Tomaz; NASCIMENTO, Maria das Vitórias. Presença de bactérias no concreto: uma análise da biodeteriorização e bioregeneração. *Conpar2017*, Recife, ago. 2017. Disponível em: <<http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR/article/view/612>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

FAUSTINO, Ana Laura Dornelas; ASSUNÇÃO, Brenno Heliel Borges; GARCIA, Wilker Lemes. **Avaliação do desenvolvimento e eficiência do bioconcreto em relação ao concreto convencional**: um artigo de revisão. *In: Anais do 3º Simpósio de TCC das Faculdades FINOM e Tecsoma*, 2020, p. 668-678.

FERNANDES, Polyana Barbosa; LIMA, Thauany Furriel. **Análise da resistência do concreto com a inserção de bactérias do gênero *Bacillus subtilis***. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2022.

GAUDIO, Marcelo. **Alunas de Americana adaptam bioconcreto autorregenerativo com potencial de evitar rachaduras em estruturas; entenda**. g1 Campinas e Região. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2023/03/18/alunas-de-americana-adaptam-bioconcreto-autorregenerativo-com-potencial-de-evitar-rachaduras-em-estruturas-entenda.ghtml>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

Gran Questões. **Nas atividades de construção civil é utilizado, muitas vezes, o concreto. O concreto é a mistura de cimento, areia, brita e água em proporções adequadas (traço). É utilizado em elementos estruturais como vigas e pilares, em lajes, etc.** Disponível em: <<https://questoes.grancursosonline.com.br/questoes-de-concursos/conhecimentos-especificos-de-um-determinado-cargo-area/1668355>>. Acesso em: 05 jun. 2024.

JUNIOR, Agenilson; CERQUEIRA, Leilson. **Bioconcreto**: uma nova tecnologia na recuperação de estruturas. Salvador: Faculdade de Ciências e Tecnologia – Área1, 2019. Relatório Final, Programa de Iniciação Científica e Tecnológica (PICT). Orientadora: Silvana Blumen Foa.

KHAMBENOR, Rashmi et al. A comparative analysis between self-healing bioconcrete and conventional concrete. *EUR. Química. Touro*. 2023, 12(10), 2953-2960.

KOGA, D.S.; SANTOS, L.M. **Bioconcreto**: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. 2020. 10p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) Pontifícia Universidade Católica, Goiás, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/895>>. Acesso em: 28 fev. 2024.

LIMA, Sandovânio Ferreira; LIMA, Caio Ivson Vasconcelos; COUTINHO, Carlos Otávio Dantas; AZEVEDO, Gabriel Gama Carnaúba; BARROS, Tarsys Yuri Gomes; TAUBER, Thiago Campos. Concreto e suas inovações. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 31–40, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/1285>>. Acesso em: 05 abr. 2024.

LIMA, Erick Guilherme Carvalho de. **Viabilidade e aplicação do bioconcreto na construção civil: uma revisão**. 2023. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Pau dos Ferros-RN.

LIMA, Kennedy Bruno Araújo. et al. Fissuras em paredes de concreto em um conjunto residencial, localizado em São José de Ribamar – Maranhão. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 05, Ed. 04, Vol. 05, pp. 148-163. Abril de 2020. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/fissuras-em-paredes>>. Acesso: em 05 jun. 2024.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico**: projetos de pesquisa, pesquisa bibliográfica, teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597012934/>>. Acesso em: 06 abr. 2024.

Molyneux, K. Bacterial Concrete: A Sustainable Building Material with Advantageous Properties. *STEM para jovens é importante*, Março de 2021, Edição 1. Disponível em: <<https://doi.org/10.51892/ysm.1.202101>>. Acesso em: 14 de mai. 2024

NASCIMENTO, Jéssica Wanderley Souza do. O efeito da utilização de biomateriais na restauração de estruturas de concreto empregando bactérias como agentes de cura. *In: 1º Congresso Online de Engenharia de Materiais - EngMatCon*, 2019. Anais... [S.l.]: EngMatCon, 2019.

NASCIMENTO, Marlesson Soares do. **A implantação do bioconcreto desenvolvido para solucionar problemas estruturais tais como: fissuras, rachaduras, e trincas**. 2018. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universitário do Norte – Uninorte, Manaus, 2018. Disponível em: <<https://semanaacademica.org.br/artigo/implantacao-do-bioconcreto-desenvolvido-para-solucionar-problemas-estruturais-tais-como>> Acesso em: 09 mar. 2024.

O Blog do Bega. **A “Pont du Gard” Ponte Aqueduto - Obra prima da edificação antiga**. 2014. Disponível em: <<https://catafau.blogspot.com/2014/07/a-pont-du-gard-ponte-aqueduto-obra.html>>. Acesso em: 21 fev. 2024.

PEREIRA, Caio. Tipos de cimento: **Características e especificações**. Escola Engenharia, 2021. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 6 jun. de 2024.

PEREIRA, Caio. **Tipos de concretos utilizados na construção civil**. Escola Engenharia, 23 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-concreto/>>. Acesso em: 6 mar. 2024.

PIANCASTELLI, É. M. Patologias do concreto. AECweb. 28 fev 2023. Disponível em:< <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/patologias-do-concreto/6160>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

PUGLIESI, Nataly. **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. ABCP, 21/02/2018. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 6 jun. 2024.

RAJ, Athira. **Civil Engineering Seminar Topics: Bacterial Concrete**. [S.l.]: Civil. Engg. Seminar, 2016. Disponível em: <<http://civilenggseminar.blogspot.com.br/2016/06/bacterial-concrete.html>>. Acesso em: 18 abr. 2024.

Roma pra Você. O que fazer perto do Coliseu? 10+ dicas interessantes. Disponível em: <<https://romapravoce.com/10-programas-super-interessantes-perto-do-coliseu/>>. Acesso em: 21 fev. 2024.

Roma Pra Você. **Pantheon de Roma**: História, Arquitetura e Curiosidades. 2023. Disponível em: <<https://romapravoce.com/pantheon-de-roma/>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

SANTIAGO, J. M.; BOTELHO, C. V. B.; SANTARÉM, S. S. Avaliação das propriedades intrínsecas ao bioconcreto e de suas composições: Caracterização e aplicações. *In*: SANTARÉM, S. S.; RODRIGUES, F. A.; FIGUEIREDO, S. C. G. Organizadores. **Engenharia Civil**: Inovação e tecnologia no contexto da era contemporânea. Belo Horizonte: Poisson, 2021. Cap. 4, p. 48. Disponível em: <https://pesquisa.fametro.edu.br/wp-content/uploads/2023/03/Eng_CivilTec_Vol1.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2024.

SCHMIDT, H.; HENRIQUES, M.; GUILGE, M. S. Aditivos melhoram propriedades e aplicações do concreto. AECweb. 03 out 2016. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/aditivos-melhoram-propriedades-e-aplicacoes-do-concreto/14428>>. Acesso em: 06 mar. 2024.

Severo, A. C.; Silva, L. P. **Análise das propriedades físicas do concreto não estrutural em misturas utilizando resíduos de vidro e PET**. Graduandas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, 2023.

SILVA, André da et al. **Bioconcreto**: potencial do concreto vivo como solução para estruturas portuárias expostas a intempéries. Trabalho de Aplicação (Projeto de Graduação) - Curso de Engenharia Civil, ESAMC, Santos, 2021. Orientador: Alessandro Borrascchi Ferreira.

SILVA, Daniel Henrique. Recuperação de estruturas de concreto - Corrosão das Armaduras. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 10, Vol. 02, 2018. ISSN:2448-0959

SILVA, Diêgo Raffael Fernandes da. TELES, Euzébio Cardoso. BARROS, Enicléia Nunes de Sousa. Patologias em estruturas de concreto armado em ambiente industrial. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 10, Vol. 06, pp. 14-41. Outubro de 2020. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/patologias-em-estruturas>>. Acesso em: 05 jun. 2024.

SOUZA, Carolina Andrade. **Bioconcreto**: o superconcreto que se autorrepara. Celere, 12 jul. 2021. Disponível em: <<https://celere-ce.com.br/inovacao/bioconcreto/>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

The Constructor. **What are the Methods of Concrete Crack Repair?**. Disponível em: <<https://theconstructor.org/concrete/methods-of-crack-repair/886/>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

ZAGO, A. F. **Estudo comparativo entre métodos de recuperação de estruturas com processos de autocura**: Bioconcreto e concreto autocicatrizante. Orientadora: Prof. Lucimara Aparecida Schambek Andrade, Ms. 2021. 75 f. TCC (graduação) Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/19419>>. Acesso em: 06 abr. 2024.