

UNIVERSIDADE CESUMAR - UNICESUMAR
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BIOCONCRETO: REPARAÇÃO DE FISSURAS COM BACTÉRIAS

MARIANA PAULIN SANTARÉM

MARINGÁ – PR

2022

Mariana Paulin Santarém

BIOCONCRETO: REPARAÇÃO DE FISSURAS COM BACTÉRIAS

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Cesumar – UNICESUMAR como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Judson Ribeiro.

MARINGÁ – PR

2022

FOLHA DE APROVAÇÃO
MARIANA PAULIN SANTARÉM

BIOCONCRETO: REPARAÇÃO DE FISSURAS COM BACTÉRIAS

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Cesumar – UNICESUMAR como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Judson Ribeiro.

Aprovado em: 04 de novembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Judson Ricardo Ribeiro da Silva

Profa. Dra. Thaise Moser Teixeira

Prof. Esp. Anderson Rodrigues

BIOCONCRETO: REPARAÇÃO DE FISSURAS COM BACTÉRIAS

Mariana Paulin Santarém

RESUMO

O presente artigo trata-se de uma revisão bibliográfica a respeito do bioconcreto com enfoque na utilização de bactérias para reparação de fissuras em concreto. Este estudo tem como objetivo apresentar o bioconcreto e sua importância na construção civil, partindo-se da exploração de seus processos físico e químico. A fim de justificar sua implantação, demonstra-se a partir de referências estatísticas, sua viabilidade econômica a longo prazo, relacionada aos grandes gastos com manutenções, principalmente em construções de difícil acesso, como túneis, pontes e barragens, por exemplo, além de defender sua utilização baseando-se em sua resistência, quando comparada ao concreto convencional, sua tecnologia sustentável e suscetível às novas pesquisas.

Palavras-chave: Economia; Remediação; Sustentabilidade.

BIOCONCRETE: REPAIRING CRACKS WITH BACTERIA

ABSTRACT

This article reviews the research on bioconcrete with a particular emphasis on how bacteria can be used to repair concrete cracks. This study aims to present bioconcrete and its importance in civil construction, starting with the exploration of its physical and chemical processes. It is demonstrated from statistical references that its implementation will be economically viable over the long term, due to high maintenance costs, particularly in constructions that are difficult to access such as tunnels, bridges and dams, besides defending its use based on its resistance when compared to conventional concrete, its sustainable technology and susceptibility to new research.

Keywords: Economy; Repairing; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizados na construção civil. Sendo constituído por aglomerante (cimento), agregados miúdo (areia) e graúdo (brita) e água, podendo conter aditivos (LIMA *et al.*, 2014). É um material versátil e durável, porém, deficiente na resistência à tração, que segundo Mânica (2019) tende a fissurar ou se romper. Portanto, a fim de suprir sua deficiência, é empregado juntamente à armadura, obtendo assim a resistência necessária para ambos os esforços (JONKERS *et al.*, 2010).

No concreto armado, o concreto tem como finalidade o cobrimento da armadura, que por sua vez, protege o mesmo contra agentes extrínsecos que possam corroer a armadura. Contudo, o surgimento de manifestações patológicas na estrutura é inevitável, sendo o mais comum as fissuras. Segundo Silva A. (2018), a fissuração pode ser desencadeada por diversos fatores, desde o modo de preparo do concreto, relacionado à proporção e qualidade dos materiais utilizados, quanto pela influência de fatores externos como a variação térmica, contato com produtos químicos e grandes tensões.

Embora a existência de fissuras em uma edificação não apresente riscos eminentes à integridade da construção, são facilitadoras de ingresso de água e agentes agressores, tornando-se porta de entrada para outras patologias como: a corrosão das armaduras, a desagregação do concreto e seu desgaste. De acordo com Silva A. (2018), o tipo de condição que o concreto for submetido definirá qual o tipo de patologia será desenvolvida, seja esta condição intrínseca ou extrínseca a ele.

Desta forma, é necessário a busca por alternativas de remediação destas patologias de forma eficiente e que possua uma boa aderência ao concreto original, uma vez que reparos em concreto demandam tempo e mão-de-obra, ocasionando muitos gastos com manutenção. Neste contexto, uma alternativa é o uso do bioconcreto, composto pela adição de bactérias encapsuladas e lactato de cálcio à mistura do concreto, em substituição ao uso do concreto comum (SILVA, A., 2018).

Segundo Euzébio, Alves e Fernandes (2017), a remediação de fissuras é um campo de pesquisa em crescimento e diversos esforços têm sido empreendidos no desenvolvimento de novas tecnologias. Neste cenário, tem-se como objetivo, no presente estudo, apresentar o bioconcreto, um material que possui características que permitem a interrupção de fissuras e porosidades interligadas, por meio da precipitação de carbonato de cálcio metabolizada por bactérias, indicando a sua importância na construção civil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 METODOLOGIA

O presente estudo baseia-se em uma revisão bibliográfica exploratória, com o intuito de descrever os processos em sua totalidade, referentes à autocicatrização do concreto, partindo da definição do conceito de bioconcreto. A pesquisa bibliográfica tem como objetivo, portanto, o uso dos diversos materiais publicados sobre o assunto como base analítica (GIL, 2002).

Utilizou-se como fonte de pesquisa artigos científicos, livros, revistas e monografias, retiradas da ferramenta de pesquisa do Google, Google Acadêmico e SciELO, através das palavras chaves: bioconcreto, tratamento de fissuras com bactérias e Henk Jonkers, dispondo, portanto, como referência cerca de 22 resultados para este tema, publicados entre 2009 e 2019.

A metodologia utilizada neste estudo foi baseada no método de encapsulamento de bactérias do gênero bacillus, produtoras de calcário e formadoras de esporos, adicionadas à mistura do concreto, juntamente com o seu catalisador, o lactato de cálcio. Trata-se de uma pesquisa desenvolvida em 2006 na Universidade Técnica de Delft na Holanda pelo microbiologista Henk Jonkers e o engenheiro especialista em materiais de construção Eric Schilangen, segundo a Revista GC (2018).

Por se tratar de um tema relativamente recente, há poucos experimentos utilizando-se destes parâmetros com resultados relevantes no Brasil, é, portanto, um assunto amplamente aberto a novas pesquisas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 FISSURAÇÃO DO CONCRETO

As fissuras são manifestações patológicas das estruturas de concreto, decorrentes de tensões de tração acima da capacidade resistente do concreto (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Atua, portanto, como um mecanismo de alívio de tensões, quando os esforços solicitantes nos materiais ou em suas conexões ultrapassam os esforços resistentes.

No entanto, as fissuras podem ser geradas por diversos fatores, como contração ou retração térmica, retração de secagem, deformação plástica ou expansão de materiais no interior do concreto (TOMAZ, 1989). Neste contexto, podem ocorrer tanto em estado fresco quanto em

estado enrijecido do concreto. Todavia, sua causa pode ser diagnosticada através de sua localização, configuração e padrão de abertura no concreto. Segundo Oliveira (2012), as fissuras são classificadas pela variação de aberturas a seguir:

Tabela 1 – Classificação da fissura quanto à abertura

| Tipo de Lesão | Abertura |
|---------------|---------------------|
| Fissura | até 0,5 mm |
| Trinca | de 0,5 mm a 1,5 mm |
| Rachadura | de 1,5 mm a 5,0 mm |
| Fenda | de 5,0 mm a 10,0 mm |
| Brecha | acima de 10,0 mm |

Fonte: Oliveira (2012).

Os processos naturais e atividades humanas podem criar rachaduras e fissuras nas estruturas de concreto, que são prejudiciais, pois encurtam a vida útil da edificação. É um fenômeno inevitável durante o processo de envelhecimento das estruturas de concreto, favorecendo o alcance de agentes agressivos à armadura de aço e conseqüentemente sua corrosão (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017).

Segundo Salomão e Pinheiro (2020), as fissuras podem não danificar seriamente a estrutura, porém podem afetar sua permeabilidade, ocasionando problemas futuros. As rachaduras ou trincas (aberturas maiores de 0,6 mm), por sua vez, podem comprometer severamente a integridade da estrutura e causar sérios danos, sendo sua profundidade proporcional às conseqüências.

3.2 BIOCONCRETO

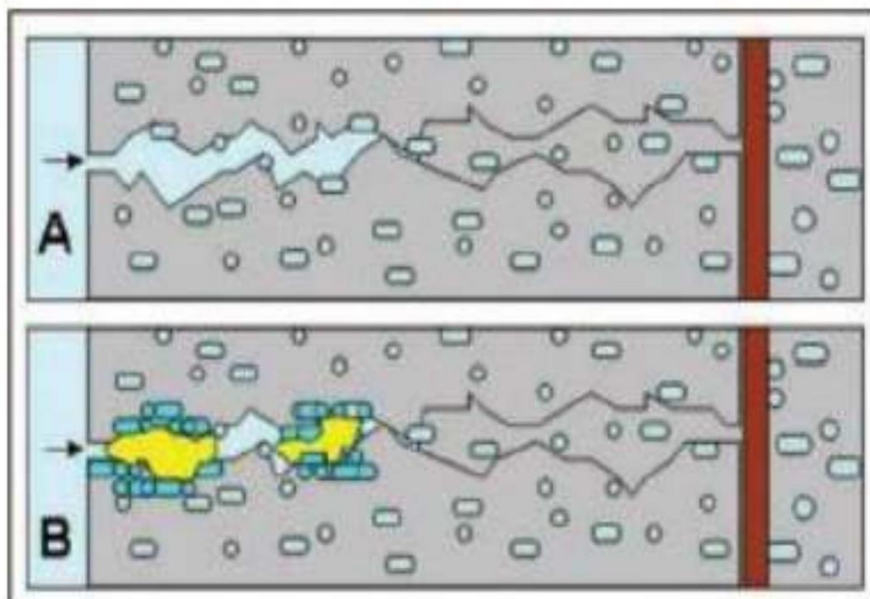
Segundo a Thorus Engenharia (2019), o bioconcreto denominado como “concreto, autocurável consiste na mistura do concreto com bactérias produtoras de calcário. Trata-se do concreto convencional, mais um elemento adicional denominado agente de cura, composto por bactérias *Bacillus Pseudofirmus* e lactato de cálcio (C6H10Ca06).

O método foi descoberto pelo microbiologista Henk Jonkers, que afirma que, de maneira semelhante à forma como nosso corpo é capaz de se regenerar, assim como o tecido ósseo produz minerais, o concreto ao se integrar às bactérias encapsuladas, podem permanecer

dormentes durante 200 anos, ativadas somente quando o material entra em contato com o meio (ar e umidade), através da exposição gerada pelo surgimento de uma fissuração. Essas bactérias quando acordadas produzem material necessário para selar a fissura, (JONKERS, 2011).

Conforme Brito e Nascimento (2018), o bioconcreto é composto pela mistura de bactérias e lactato de cálcio (alimento das bactérias) adicionadas à mistura do concreto. Sendo assim, mediante o surgimento de fissuras, em contato com a água ou oxigênio, as bactérias que se encontravam inativas no concreto se “ativam”, alimentando-se do lactato de cálcio. Euzebio, Alves e Fernandes (2017), afirmam que o processo de regeneração do concreto, se dá através da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), preenchendo e selando as fissuras formadas, protegendo, portanto, a armadura de aço (barra marrom), conforme representado na Figura 1.

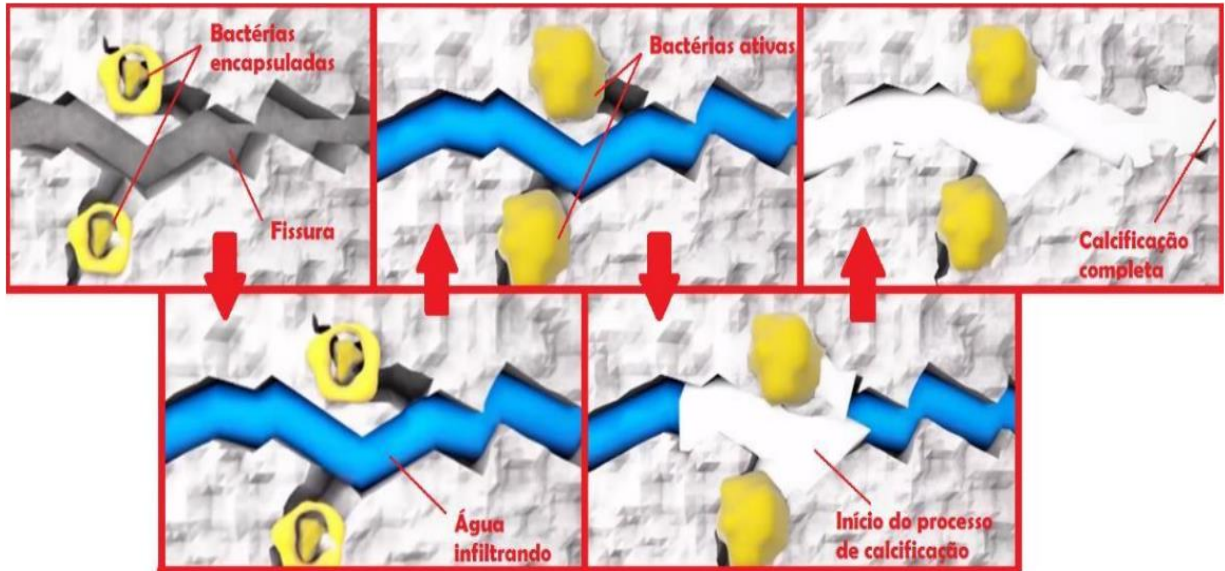
Figura 1 - Esquema de autocicatrização em bioconcreto.



Fonte: Arnold (2011).

A Figura 2 demonstra o processo de calcificação do concreto. A água uma vez que adentra o bioconcreto por meio das fissuras, ativa os esporos bacterianos presentes, quando entram em contato com a água. As bactérias, após realizar o processo de cicatrização do concreto, retornam ao seu estado de inatividade, produzindo esporos. Devido falta de condições ideais de sobrevivência, voltam a atividade somente quando em contato com a umidade e oxigênio, retomando assim, todo ciclo (PINHEIRO, 2019).

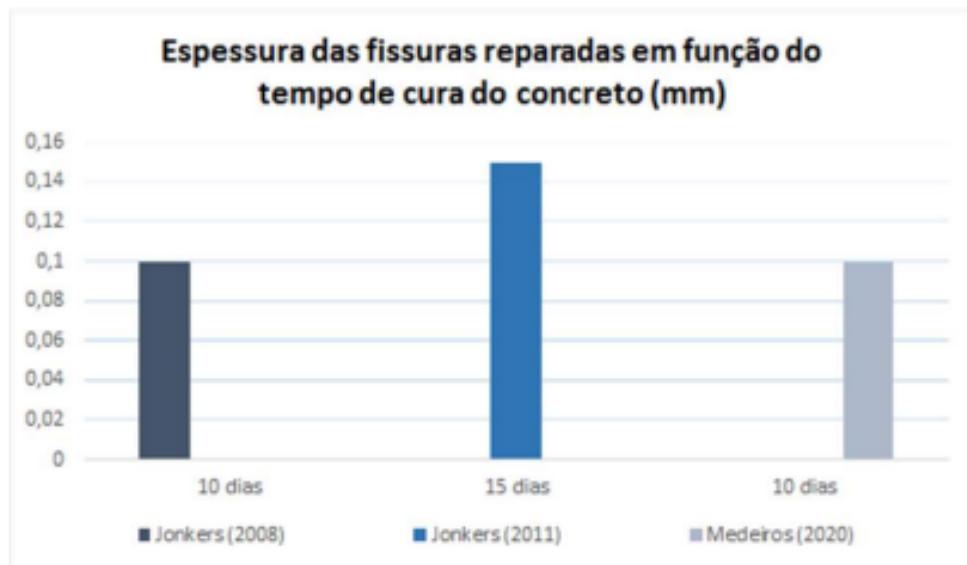
Figura 2 - Processo de calcificação do concreto



Fonte: Vendrami (2016).

Segundo Vendrami (2016), não há limitação quanto ao comprimento da reparação das fissuras por meio das bactérias, porém em parâmetros de largura abrangem até 8mm. Contudo, com relação ao tempo de cicatrização das fissuras, está diretamente interligada a espessura das mesmas, conforme apresentado pelos autores no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Autorreparação do concreto em função do tempo de cura da amostra



Fonte: Koga, Santos e Nunes (2020).

3.2.1 Bactérias

A ideia de se utilizar bactérias como aditivo à mistura para que o concreto promova sua regeneração é recente. As bactérias, por si só, têm a propriedade de se multiplicar facilmente em meios favoráveis, sejam elas autotróficas ou heterotróficas. Sua utilização em um meio como o do concreto busca aumentar a sustentabilidade, economia, resistência e diversidade do material (ARROYO *et al*, 2015).

Segundo Euzébio, Alves e Fernandes (2017), as bactérias utilizadas não podem ser patogênicas e devem resistir à alta alcalinidade por longos períodos, reagindo apenas na presença de O₂, além de serem capazes de formar esporos, a fim de garantir sua inatividade por anos, não sendo produtoras de H₂S e CO₂, e que realizem a precipitação de carbonato de cálcio após reagirem com a água ou umidade (AGARWAL; KADAM, 2017).

Mediante os critérios que influenciam a precipitação do carbonato de cálcio pelas bactérias, como o pH, a temperatura, a quantidade de ureia, os nutrientes utilizados no crescimento das bactérias, bem como, o tempo para sua precipitação, é imprescindível a atenção com essas condições, visto que a produção do bioconcreto advém do comportamento da bactéria (BORGES, 2015).

Jonkers (2015), contesta a existência de microorganismos capazes de se adaptarem ao concreto, os “*Bacillus pseudofirmus*” (Figura 3), descobertas nas proximidades de Vulcões, nos lagos alcalinos da Rússia. Essas bactérias têm como característica a facilidade de adaptação a habitações inóspitas, sendo ideal para o uso em conjunto com o concreto, que possui um índice de pH acima de 10,0, além de produtora de calcário, característica fundamental para a remediação de fissuras no concreto (JONKERS, 2015).

Figura 3 - Bactéria *Bacillus pseudofirmus*.



Fonte: Alexia (2017).

Contudo, após a descoberta do bioconcreto pelo microbiologista Hendrick Jonkers, diversas pesquisas comprovaram que a escolha do tipo de bactéria para a composição do bioconcreto não está restrita apenas na utilização da bactéria *Bacillus pseudofirmus*.

Para a seleção de bactérias para a biomineralização, é importante que a escolha se baseie na capacidade do microrganismo produzir carbonato de cálcio e formar esporos. Também é necessário levar em consideração que, para que precipitem, as bactérias necessitam de nutrientes, os quais podem ser adicionados à mistura da argamassa ou concreto (DE BELIE, 2016).

As bactérias do gênero *Bacillus* possuem uma estrutura celular simples: parede celular, sem núcleo, composta de estruturas externas, envelope celular e estruturas internas que determinam a capacidade da bactéria se desenvolver. São classificadas como bactérias Gram-positivas, medindo entre 1 e 10 μ m, e possuem uma carga negativa que possibilita a atração dos cátions como o cálcio, favorecendo o mecanismo de cimentação microbiana de bactérias ureolíticas (WONG, 2015). A aplicação de diferentes bactérias, conforme alguns autores, é apresentada no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Aplicação de diferentes organismos em áreas de construção.

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

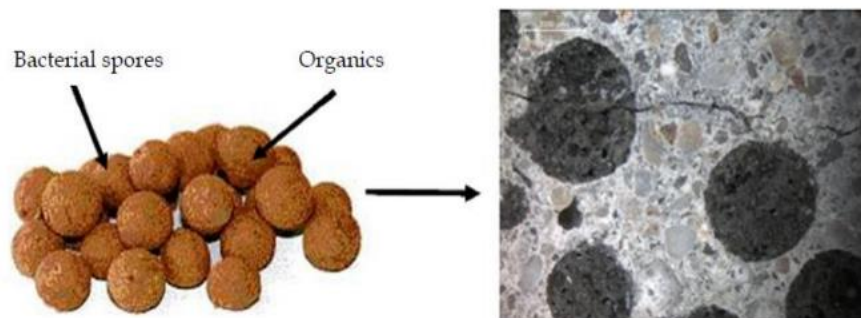
Fonte: Vekariya e Pitroda (2013).

3.2.2 Encapsulamento

Apesar de conseguirem sobreviver em estado seco até 50 anos, as bactérias quando misturadas ao concreto, conseguem resistir apenas cerca de um a dois meses (MEDEIROS, 2020). Menezes *et al.* (2013) definem a microencapsulação como o recobrimento de um material, formando cápsulas em miniaturas que propiciam o controle na liberação do seu conteúdo.

No entanto, para que se obtenha a total eficiência do bioconcreto, o processo de encapsulamento da bactéria é fundamental, a fim de atingir a resistência desejada. Utiliza-se, portanto, a argila expandida, para este processo em estudo. Na Figura 4 pode-se observar a representação deste modelo de encapsulamento e sua aplicação no bioconcreto.

Figura 4 - Argila expandida impregnada com esporos de bactérias e compostos orgânicos para utilização em Bioconcreto



Fonte: Jonkers (2011).

As microcápsulas são resistentes ao alto pH do concreto e à umidade, flexíveis sob alta umidade (como na água) e se tornam quebradiças com baixa umidade (MEDEIROS, 2020). Isso significa que as cápsulas podem suportar o processo de mistura e são facilmente rompidas com o surgimento de fissuras. Quando em contato com a água, os esporos bacterianos presentes nestas cápsulas quebram-se, podendo germinar e precipitar carbonato de cálcio (CaCO_3), garantindo o preenchimento dessas aberturas (WANG *et al.*, 2014).

3.2.3 Biomineralização

A precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), promovida por células bacterianas e suas respectivas atividades metabólicas, é definida como biomineralização e consiste na

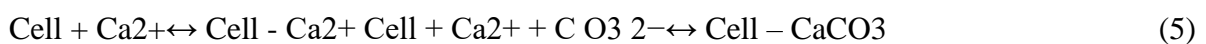
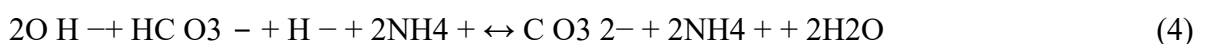
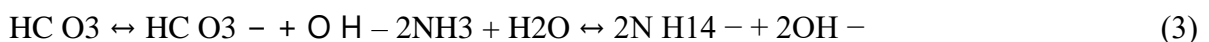
sintetização de minerais inorgânicos através de organismos vivos. Em geral, a precipitação de carbonato de cálcio é uma função linear resultante dos produtos da concentração de íons de Ca^{2+} (cátion bivalente) e CO_3^{2-} (ânion bivalente). Nesse caso, prevalece a cinética das reações, caso um dos reagentes esteja em excesso (ACHAL *et al.*, 2015).

No processo de biomineralização a urease hidrolisa a ureia, produzindo amônia e carbonato. O produto resultante se hidrolisa espontaneamente, para produzir outra molécula de amônia e ácido carbônico. Estes produtos equilibram-se em meio aquoso, formando bicarbonato e amônio, além de íons hidróxidos, resultando na elevação do pH, de acordo com a Pontifícia Universidade Católica de Goiás do Curso de Engenharia Civil, 2020/2024. O pH pode alterar o equilíbrio do bicarbonato, gerando íons carbonato, que na presença de íons solúveis de cálcio se precipitam como carbonato de cálcio (CaCO_3) (DHAMI; REDDY; MURKHERJEE, 2013).

As bactérias influenciam a saturação atingível e a taxa de precipitação de carbonato de cálcio, regulando a morfologia dos cristais formados. Quando a concentração destes íons excede o produto de solubilidade, a solução do meio se torna supersaturada. Quanto mais supersaturada for a solução, maior é a chance da precipitação ocorrer (SILVA; MELO, 2018).

3.2.3.1 Processo físico-químico

Abreu *et al.* (2017) definem reações químicas geradas pelo concreto no processo de fissuração, até as geradas pelas bactérias no processo de regeneração, dispostas nas equações a seguir:



As reações químicas se iniciam quando a ureia, ao entrar em contato com o ar úmido do ambiente, passa por um processo de hidrólise que leva a formação do amoníaco (1). Outro processo de hidrólise acontece com o carbonato presente no concreto, que após o processo gera dois produtos o amoníaco e o ácido carbônico (2). Com os produtos gerados ocorrem outras duas reações, ocasionando o aumento do pH local, formando assim bicarbonato, amônio e íon hidroxila (3). Com o aumento do pH, o bicarbonato sofre desequilíbrio e forma íons carbonato (4). O último processo ocorre com a ação das bactérias. Primeiramente, a parede da bactéria, que tem carga negativa, atrai o ambiente ao qual está submetido o concreto (Ca^{2+}) e em seguida, o íon carbonato precipita e dá como um produto o calcário, que será o material utilizado no processo de fechamento das fissuras (5). Assim, o processo inicial de degradação do concreto, quando submetido às intempéries do ambiente, gera reações químicas naturais com a implantação das bactérias. Isso passa a ser um processo de produção de uma matéria-prima utilizada na regeneração das fissuras do material (ABREU *et al.*, 2017).

3.2.4 Importância do Bioconcreto na Construção Civil

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizado na construção civil, porém, possui uma alta tendência em formar fissuras. Essas fissuras diminuem significativamente a vida útil do concreto e levam a altos custos de reparação (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016). Sua fissuração, portanto, é um fenômeno comum. Sem o tratamento adequado e imediato, as fissuras tendem a se espalhar e eventualmente requerem custos elevados de reparação. Todavia, como este problema continua a aparecer durante um longo período, soluções de efeito pontual precisam ser aplicadas repetidas vezes (RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001). A utilização desta nova tecnologia apresentada neste estudo faz uso de bactérias que têm como principal propósito o aumento da durabilidade das estruturas, assim como a diminuição dos custos com conservação e manutenção (PELEGRINELLO; CARNEIRO, 2019).

As bactérias possuem a capacidade de precipitar carbonato de cálcio, quando expostas a um sal ácido e a um reagente como água ou oxigênio. Tendo isso em vista, a utilização no tratamento de fissuração do concreto é uma alternativa ambientalmente inócua quando comparada a alternativas como polímeros sintéticos usados atualmente (RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001). Trata-se, portanto, de uma tecnologia limpa, uma vez que não detém da utilização de produtos sintéticos para manutenção das edificações.

Em seus estudos, Reis (2017) analisa a durabilidade do bioconcreto a longo prazo (anos) e a eficiência de custo desse novo tipo de concreto. Com base nisso, defende as vantagens de sua utilização quanto à diminuição de custos de manutenção e reparação, a extensão da vida útil das construções, além do fator sustentável deste material. O primeiro estudo aplicado em campo de maior escala na Inglaterra, realizado por Al-Tabbaa *et al.*, (2019), indica que o uso de microcápsulas incorporadas ao concreto reduz entre 20 e 58% a profundidade das fissuras em relação a condição inicial, além de melhorar sua permeabilidade e resistência à compressão.

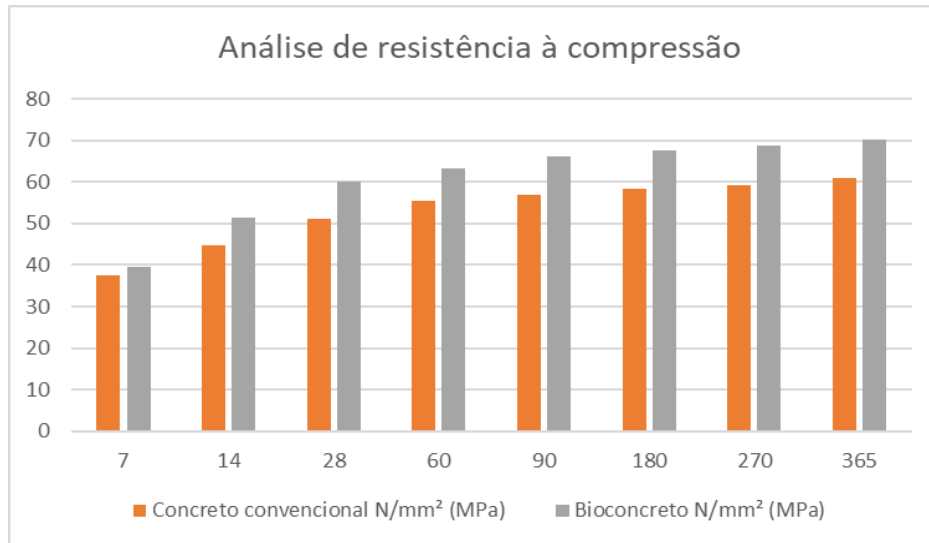
Na tabela 2, pode-se observar os resultados quanto à resistência à compressão do bioconcreto comparado ao concreto convencional durante o período de 365 dias.

Tabela 2 - Relação de resultados de ensaio de resistência à compressão do concreto.

| Dias | Concreto convencional N/mm ² (Mpa) | Bioconcreto N/mm ² (Mpa) |
|------|--|--|
| 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, Santos e Passarini (2017).

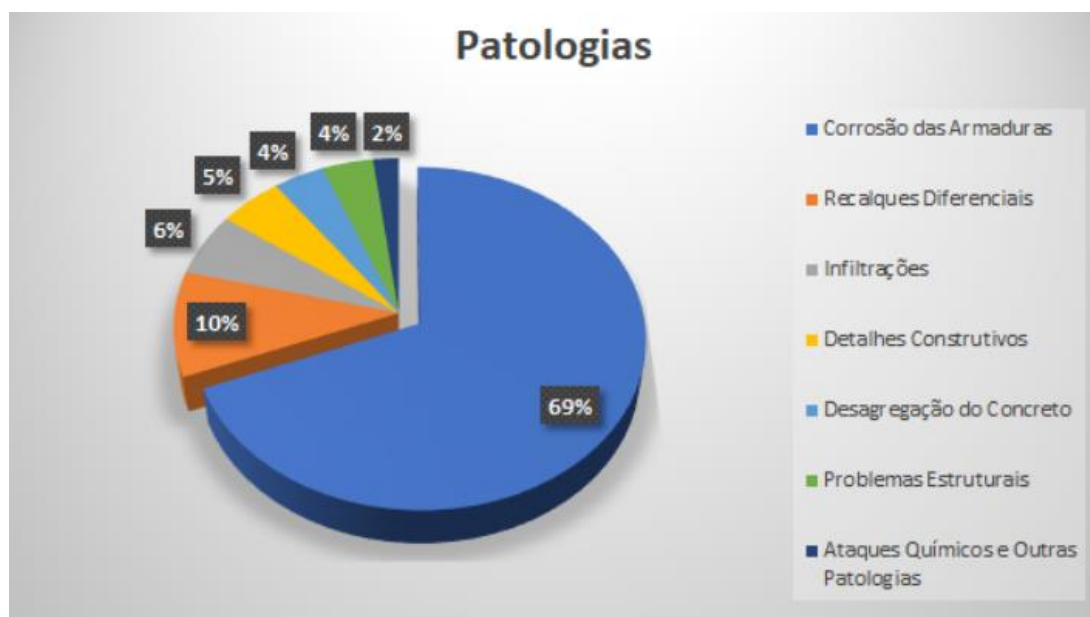
Analisando-se os dados apresentados, pode-se concluir o acúmulo progressivo de resistência em função do tempo. O bioconcreto, portanto, apresenta uma eficiência de cerca de 13% sobre o concreto convencional no período de 1 ano, diferentemente do teste realizado há 7 dias, que era de aproximadamente 2%. No Gráfico 2, pode ser observado esta comparação entre os dois concretos.

Gráfico 2 – Análise de resistência à compressão

Fonte: adaptado de Silva, Santos e Passarini (2017).

Freitas *et al.* (2021) afirmam que, este ganho de resistência se dá devido ao preenchimento dos poros presentes no concreto pelo carbonato de cálcio, precipitado pelas bactérias, ocasionando o aumento da resistência do bioconcreto.

De acordo com levantamento realizado por Silva D. H. (2018), baseado em 166 obras acompanhadas no período entre 2005 e 2015, observa-se a percentagem média das principais patologias presentes nas construções (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Análise Patológica

Fonte: Silva D. H. (2018).

Mediante os dados apresentados, podemos concluir que as patologias decorrentes da corrosão das armaduras são predominantes na maioria das obras da engenharia civil. Sendo assim, o bioconcreto se apresenta como uma solução para este problema (ARAUJO *et al.*, 2019).

A corrosão resultante do surgimento de infiltrações, seja por capilaridade, vazamentos, fissuras ou trincas, são ocasionadas por efeitos de cargas e esforços sobre a estrutura, de maneira que o oxigênio entre em contato com a armadura, resultando na oxidação (ARAUJO *et al.*, 2019). Todavia, o investimento em manutenção, é fundamental, e, portanto, um custo inevitável. Caso não seja realizado, pode colocar em risco toda estrutura, intervindo em seu tempo de vida útil e estabilidade (SCHMIDT, 2019).

Estruturas construídas em lugares sujeitos à água, tais como túneis, construções subterrâneas e ambientes marinhos são particularmente vulneráveis à corrosão do aço. Procedimentos de reparo de estruturas de concreto convencionais, geralmente envolvem a aplicação de uma argamassa de reparo à superfície danificada (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Estes reparos podem ser demorados e caros, devido à dificuldade de se acessar a estrutura para reparo, principalmente quando elas são subterrâneas ou em grandes alturas (ARNOLD, 2011).

Segundo Andrade e Gonzales (1978), são gastos do produto nacional bruto em países em desenvolvimento, cerca de 1,25 % a 3,50 % com manutenções decorrentes de corrosão em estruturas de concreto armado. Ressaltando essa afirmação, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, mais de 40% dos custos em construções civis decorrem da carência de manutenção dessas estruturas. Contudo, Castro (2016) reitera que, em países desenvolvidos, esses custos podem equivaler a de novas construções.

No Brasil os gastos com manutenção em obras como viadutos, pontes, rodovias e passarelas são elevados, como pode-se observar no Gráfico 4, os gastos entre 2009 e 2019 executados na cidade do Rio de Janeiro.

Gráfico 4 - Gastos anuais com viadutos, pontes, passarelas e túneis.



Fonte: Schmidt (2019).

A reparação tardia das patologias contidas no concreto, podem custar caro, em média de 5 a 25 vezes a mais do que se corrigidas na fase de manutenção do projeto, podendo chegar até 125 vezes a mais do valor inicial da obra (ANDRADE; SILVA, 2012).

A tabela 3 apresenta a perspectiva do impacto econômico que pode ser gerado pela implantação do bioconcreto, uma vez que tem a capacidade de reduzir até 69% do consumo total gerado com manutenções (ABREU *et al.*, 2019).

Tabela 3 - Custo com manutenção de obras

| Ano | Despesas 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 |

Fonte: adaptado Abreu *et al.* (2019).

Contudo, um agente de autocicatrização, integrado à matriz de concreto, pouparia tanto dinheiro como inspeção manual, aumentando a durabilidade do concreto sem fazer uso de produtos poluentes (JONKERS *et al.*, 2010). Além disso, a utilização da bactéria encapsulada, juntamente com o lactato de cálcio adicionada ao concreto, tende a reduzir sua porosidade, uma vez que auxilia o preenchimento de seus vazios, aumentando conseqüentemente sua resistência à compressão.

As diversas patologias que podem ocorrer através do surgimento de fissuras no concreto no decorrer de sua vida útil, muitas vezes inviabiliza sua recuperação e manutenção devido aos elevados custos. Só nos Estados Unidos o custo calculado por ano para manutenção de estruturas de concreto chega à casa dos 20 milhões de dólares (ECHEGARAY; ROJAS; ACAPANA, 2015).

O uso do bioconcreto tem como principal benefício a redução de custos com recuperação do material, pois quando ocorre a fissuração, o concreto e as bactérias realizam a MICP (Precipitação de carbonato induzida microbiologicamente, micro-organismo), e fecham as lacunas provocadas pelos danos (SILVA, 2018).

Silva, Santos e Passarini (2017) avaliaram a capacidade de autorregeneração, a durabilidade e a eficiência do bioconcreto, concluindo que a sua utilização diminui os custos com manutenção e reparos, prolongando a vida útil das construções, além de ser um material sustentável. Segundo Mendes *et al.* (2016), o emprego de bactérias inativas à mistura do concreto, tende a garantir construções mais seguras devido à sua autonomia, sendo viável portanto em locais de difícil acesso.

O bioconcreto, por ser uma tecnologia nova no Brasil e no mundo está sendo estudada para se tornar viável para as construções, e apesar de evitar reparos futuros, ainda é um custo alto a se pagar (SILVA, 2018). De acordo com estudo realizado pelo CEFET-MG (2017), enquanto o concreto tradicional custa US\$80 (260,00), o novo produto custaria US\$110 (360,00), um aumento de quase 40%, assim precisa reduzir seu alto custo de produção para se tornar a tecnologia mais barata a competir com o concreto comum (SILVA, 2018). A redução do custo, portanto, poderá ser viável somente com a adoção do bioconcreto, em larga escala.

Segundo Abreu *et al.* (2017), mesmo sendo uma linha de pesquisa em progresso, essa tecnologia já foi utilizada no edifício Osaka, o maior prédio residencial do Japão, em uma estrutura de 60 andares. O bioconcreto no Brasil ainda é uma tecnologia nova, portanto, sua viabilidade deve ser estudada, devido ao alto custo em relação ao concreto tradicional. No entanto, devem ser levados em consideração os custos com manutenções futuras, frutos de reparos de possíveis patologias que possam surgir nas estruturas de concreto (SILVA, 2018).

No Brasil o bioconcreto é utilizado somente para manutenções pontuais (fechamento de fissuras) utilizado em bisnagas. Aos quais são vendidas em lojas especializadas (materiais de construção). Em alguns casos, o bioconcreto é utilizado na argamassa para construção de piscinas (aplicação de revestimentos). Em virtude de que a argamassa fica quase sem poros, tornando-se um produto impermeável.

Além do mais, o bioconcreto é uma tecnologia sustentável, visto que reduz a necessidade da utilização de produtos sintéticos para reparação de fissuras. Uma vez que previne o surgimento de outras patologias, como a corrosão de armaduras, por exemplo, e evita a geração de entulhos, provocada por consequentes demolições, devido à falta de manutenção e a inviabilidade de reparos.

4 CONCLUSÃO

De acordo com as pesquisas bibliográficas apresentadas, pode-se observar os benefícios da utilização do bioconcreto para a construção civil, bem como, pode ser promissor, economicamente, a longo prazo, além de sustentável. Sendo assim, apresenta-se como alternativa à redução dos custos irremediáveis com manutenções provenientes do surgimento de patologias relacionadas às fissuras, principalmente quando se trata de construções de grande porte e de difícil acesso, como barragens, túneis e pontes. É, portanto, uma tecnologia inovadora, aberta a novas pesquisas, além de sustentável, uma vez que reduz a utilização dos reparadores sintéticos e evita futuras demolições às grandes geradoras de entulho. Além disso, como foi possível observar, o aumento na resistência do concreto contendo a bactéria apresenta maior desempenho comparado ao concreto comum. Seguindo-se corretamente todos os processos, desde o encapsulamento da bactéria até a sua execução de maneira geral, eleva-se a capacidade da autocura do concreto, possibilitando sua total eficiência.

Contudo, podemos concluir que a utilização do bioconcreto é um recurso promissor no ramo da engenharia civil, e pode revolucionar as técnicas construtivas, além de ser a solução à adoção de construções mais sustentáveis e econômicas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, B. G.; ARAÚJO, C. E. S. B.; ÓRFÃO, R. B.; AMARANTE, M. S. Bioconcreto, **Diálogos Interdisciplinares**, v.8, n. 2, p. 45-55, 2019. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/dialogos/article/view/686>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- ABREU, B.; ARAÚJO, C. E.; ÓRFÃO, R.; AMARANTE, M. Bioconcreto. **Diálogos Interdisciplinares**, v. 8, n. 2, p. 45-55, 2019. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/dialogos/article/view/686>. Acesso em: 11 out. 2022.
- ABREU, C. M.; CUNHA, B. M.; TOMAZ, Y.; VITÓRIAS, M. Presença de bactérias no concreto: uma análise da biodeterioração e bioregeneração. **CONPAR POLI/UPE**, v. 1, n. 1, 2017. Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/CONPAR/article/view/612about:blank>. Acesso em: 02 jun. 2022.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; KUMARI, D.; ZHANG, Q. Biomineralization for Sustainable Construction. A Review of Processes and Applications. **Earth-Science Reviews**, v. 148, p. 1-17, 2015.
- AGARWAL, G.; KADAM, R. Bacterial concrete -a solution to crack formation. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, v. 4, n. 10, p. 1-6, 2017.
- ALEXIA, R. **Bioconcreto**: o concreto que se auto regenera. **Geotesc**, 4 maio de 2017. Disponível em: <https://www.geotesc.com.br/site/bioconcreto-o-concreto-que-se-auto-regenera/>. Acesso em: 29 set. 2022.
- AL-TABBAA, A. *et al.* First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 669-685, 2019.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. **Werkstoffe um Korrosion**, v. 29, p. 515-519, 1978.
- ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. Considerações sobre durabilidade, patologia e manutenção das estruturas. **Tecomat – Tecnologia da Construção e Materiais**, 2012. Disponível em: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2012/04/considerac3a7c3b5es-sobre-durabilidade-patologia-e-manutenc3a7c3a3o-das-estruturas.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.
- ARNOLD, D. Self-healing concrete. **Emerging Technology**, p. 39-43, 2011.
- ARROYO, L. F.; TANAKA, K. Y. M.; TEIXEIRA, T. M., ALVES, C. E. S.; FELIX, G. A. A. Concreto biológico: uma proposta sustentável. *In*: MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8.; MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO, 1., 2016. **Anais eletrônicos [...]** Maringá: Diretoria de Pesquisa, UniCesumar, 2016.
- BORGES, H. M. R. R. **Bio-cimentação como técnica de reparação de argamassas cimentícias**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2015.

BRITO, A. V.; NASCIMENTO, M. S. A implantação do Bioconcreto desenvolvido para solucionar problemas estruturais tais como: fissuras, rachaduras e trincas. **Revista Científica Semana Acadêmica**, 2018. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/bioconcreto-_pos_grad.1_artigo_0.pdf. Acesso em: 16 jun. 2022.

CASTRO, T. **Manutenção em estruturas de concreto armado baseado no conceito de manutenção centrada em confiabilidade**. 2016. 71f. Monografia (Especialista em Gerenciamento de Facilidades – MBA) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: <http://poliintegra.poli.usp.br/library/pdfs/3da1ec3bd8051e3993d1a450952005e1.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

CEFET-MG. **Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Abril de 2017. DE BELIE, N. Application of bacteria in concrete: a critical review. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 56–61, 2016. Disponível em: <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/download/14/16/>. Acesso em: 20 ago. 2022.

DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MURKHERJEE, A. Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites. **J. Microbiol Biotechnol**, v. 23, p. 707-714, 2013.

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

EUZEBIO, L.; ALVES, T.; FERNANDES, V. Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus Licheniformis*, acetato de cálcio e ureia. 2017. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO_EXPLORAT%C3%93RIO_DE_CONCRETO_COM_INTRODU%C3%87%C3%83O_DE_BACILLUS_SUBTILIS__BACILLUS_LICHENIFORMIS__ACETATO_DE_C%C3%81LCIO_E_UREIA..pdf. Acesso em: 11 jul. 2022.

FREITAS, A. A.; ROMÃO, E. M.; ANÍCIO, S. O.; BARROS, A. J. Bioconcreto: uma revisão de sua aplicação na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, e37210414270, 2021 Disponível em: https://redib.org/Record/oai_articulo3164223-bioconcreto-uma-revis%C3%A3o-de-sua-aplica%C3%A7%C3%A3o-na-constru%C3%A7%C3%A3o-civil. Acesso em: 16 jul. 2022.

GIL, A. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas 2002.

JONKERS, H. M.; THIJSEN, A.; MUYZER, G.; COPUROGLU, O.; SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230– 235, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857409000202>. Acesso em: 14 set. 2022.

JONKERS, H.M. Bacteria Based Self Healing Concrete. **Heron**, v. 56, n. 1/2, 2011. Disponível em: <https://heronjournal.nl/56-12/1.pdf>. Acesso em: 27 set. 2022.

JONKERS, H.M. **Jonkers (Países Baixos)**, 2015. Disponível em: <https://www.epo.org/news-events/events/european-inventor/finalists/2015/jonkers.html>. Acesso em: 16 ago. 2022.

KOGA, D. S.; SANTOS, L. M.; NUNES, W.C. **Bioconcreto**: autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. 2020. 10f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020.

Disponível em:

https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/895/1/Trabalho_TCC2_57_Dyennifer_%26_Lorrany.pdf. Acesso em: 05 out. 2022.

LIMA, S. F.; LIMA, C. I. V.; COUTINHO, C. O. D.; AZEVEDO, G. G. C.; BARROS, T. Y. G.; TAUBER, T. C. Concreto e suas inovações. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas -UNIT -ALAGOAS**, v. 1, n. 1, p. 31–40, 2014.

MÂNICA, G. **Utilização de microrganismo autógeno para a recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIVATES, Lajeado, Rio Grande do Sul, 2019.

MEDEIROS, D. G. C. **Uso de bactérias (*Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*) na produção de bioconcreto**. 2020. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa, 2020. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/2019.2/uso-de-bacterias-bacillus-subtilis-e-bacillus-cereus-na-producao-de-bioconcreto.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2022.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

MENDES, F. G. B.; RUAS, B. L. A.; SILVA, R. K. R.; MELO, T. M.; ELEUTÉRIO, I. A. R.; COSTA, R. A. L. GOMES. L. S. P. Concreto auto regenerativo: uma revisão bibliográfica sobre suas propriedades e benefícios para as estruturas de concreto. *In: FEPEG*, 10., 2016. **Anais [...]**. Montes Claros: Fepeg, 2016.

MENEZES, C. R.; BARIN, J. S.; CHICOSKI, A. J.; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E.; FRIES, L. L.M. *et al.* Microencapsulação de probióticos: avanços e perspectivas. **Ciência Rural**, v.43, n. 7, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000084>. Acesso em 13 jul. 2022.

OLIVEIRA, A. M. **Fissuras e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. 2012. 96f. Monografia (Especialização em Gestão em Avaliações e perícias) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PELEGRINELLO, M.; CARNEIRO, A.F. Influência da deposição de CaCO₃ oriundos de bactérias *Bacillus* em matrizes de argamassas: introdução à biocicatrização. **Revista Técnico-científica, CREA-PR**, Edição especial 4º SPPC, 2019.

PINHEIRO, I. **Concreto Biológico**: entenda como ele pode mudar a construção. 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/concreto-biologico/>. Acesso em: 01 set. 2022.

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

REIS, L. G. V. **Biotecnologia microbiana da construção**: potencial de biomineralização de bactérias ureolíticas de solo de cerrado e de rejeitos de construção civil. 2017. 103f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

REVISTA GC. Propriedades Regenerativas. **Revista GC**, n. 91, jul/ago 2018. Disponível em: <https://grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/propriedades-regenerativas>. Acesso em: 14 set. 2022.

SALOMÃO, P. E. A.; PINHEIRO, A.V. S. O potencial do concreto vivo como alternativa para regenerar estruturas expostas a ambientes agressivos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e142911819, 2020.

SCHMIDT, S. Verba da Prefeitura destinada a investimentos em túneis viadutos e pontes está zerada. **O Globo Rio**, 18 maio 2019. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/verba-da-prefeitura-destinada-investimentos-em-tuneis-viadutos-pontes-esta-zerada-23676206>. Acesso em: 21 jun. 2022.

SEIFAN, M., SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, p. 2591–2602, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>. Acesso em: 27 jul. 2022.

SILVA, A. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum**. 2018. 21f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em engenharia civil) - Fundação Carmelitana Mário Palmério – FUCAMP, Monte Carmelo, MG, 2018. Disponível em: <http://repositorio.fucamp.com.br/bitstream/FUCAMP/396/1/Avaliacaoviabilidadetecnica.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2022.

SILVA, D. G.; MELO, L. A. **Aplicação de bactérias biocimentantes no tratamento de patologias de revestimentos de argamassa**. 2018. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) -. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFG. Aparecida de Goiânia, 2018.

SILVA, D. H. Recuperação de estruturas de concreto: corrosão das armaduras – estudo levantado no Centro Oeste de Minas Gerais, 2018. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 2, p. 64-77, out. 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/recuperacao-de-estruturas>. Acesso em: 09 ago. 2022.

SILVA, F. P. C.; SANTOS, F. C. S.; PASSARINI, V. C. Bioconcreto: a tecnologia para construção sustentável. **INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation**, v. 5, n. 2, p. 41-58, 2017.

THORUS ENGENHARIA. **Bioconcreto você sabe o que é?** 2019. Disponível: <https://thorusengenharia.com.br/bioconcreto-o-que-e-concreto-regenerativo/>. Acesso em: 09 ago. 2022.

TOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: IPT, EPUSP, Pini, 1989.

VEKARIYA, M. S.; PITRODA, J. **Bacterial Concrete: new era for construction industry**. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, v. 4, n. 9, sep. 2013.

VENDRAMI, J. **Bioconcreto: o concreto que ganhou vida**, 2016. Disponível em: <http://pet.ecv.ufsc.br/2016/10/bioconcreto-o-concreto-que-ganhou-vida/>. Acesso em: 12 set. 2022.

WANG, J.Y. *et al.* Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 139-152, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613002482>. Acesso em: 26 jul. 2022.

WONG, L. S. Microbial cementation of ureolytic bacteria from the genus *Bacillus*: a review of the bacterial application on cement-based materials for cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 5-17, april 2015. Disponível em: <https://sci-hub.tw/10.1016/j.jclepro.2015.01.019>. Acesso em: 13 jul. 2022.