

Koga, D. S.¹; Santos, L. M.²

Graduandas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

Nunes, W. C.³

Professor M. Sc., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

¹ dyennifers@hotmail.com; ² lorryny67@gmail.com; ³ wesley.cn@gmail.com

RESUMO: O concreto é o material construtivo mais utilizado do mundo, porém as estruturas têm apresentado necessidades de investimentos com manutenções devido às patologias pertinentes a este material construtivo. As aberturas superficiais, como as microfissuras, fissuras e trincas, correspondem às manifestações patológicas mais comuns em elementos estruturais de concreto, contribuindo para a perda significativa de desempenho e durabilidade no decorrer do tempo. Neste contexto, como solução para combater a perda de desempenho e, conseqüentemente, a redução da vida útil estrutural, surge o bioconcreto, produzido com adição de bactérias que produzem carbonato de cálcio (CaCO₃) através do processo de biomineralização, processo pelo qual ocorre a autorreparação das aberturas superficiais. O pesquisador e microbiologista Hendrik Marius Jonkers foi o precursor do bioconcreto e observou que se as bactérias fossem adicionadas diretamente na mistura elas teriam seu tempo de vida limitado, surgindo então a ideia de encapsulamento das bactérias em partículas de argila expandida. Em experimentos realizados, os quais foram objeto de estudo para elaboração do presente artigo, foi possível comprovar que os corpos de prova com adição de bactérias do gênero *Bacillus* tiveram capacidade de selar totalmente as fissuras superficiais. Ante a extrema relevância do assunto, realizou-se uma revisão bibliográfica exploratória pertinente à autorreparação do concreto. Os resultados finais dos experimentos levantados e analisados são apresentados no presente estudo, o que possibilitou avaliar a eficácia e aplicabilidade do bioconcreto, quanto ao desempenho e durabilidade das estruturas executadas com este material construtivo.

Palavras-chaves: bioconcreto, fissuras, aberturas superficiais, bacillus, autorreparação.

Área de Concentração: 01 – Construção Civil

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das inovações no âmbito da construção civil, o concreto, bem como seus métodos de cálculo, vem se desenvolvendo e acarretando em estruturas cada vez mais esbeltas. Contudo, ainda existe a ideia de domínio de execução do concreto em obras, principalmente em obras de pequeno porte, prejudicando o controle de produção adequado. Além disso, a exigência por prazos cada vez mais curtos, mão-de-obra precária e a tendência de diminuição de custos orçamentários faz com que as obras atuais apresentem degradação precoce, principalmente quanto às manifestações patológicas em estruturas de concreto (REIS, 2001).

Alves *et al.* (2019) afirmaram que a manifestação patológica mais comum em estruturas de concreto é o surgimento de fissuras, que podem ocorrer por diversas causas, como a cura mal executada ainda na fase executiva, retração, variações de temperatura e umidade do ar, presença de agentes agressivos, sobrecarga, erros de projeto e/ou execução. No entanto, quando se trata de pequenas fissuras ou microfissuras, estas não são tão prejudiciais à integridade estrutural do concreto. Contudo, a absorção de água e entrada de agentes agressivos são facilitados, podendo afetar a durabilidade do material por efeito de corrosão das armaduras (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), ainda que o controle tecnológico seja rigoroso nas fases de produção do concreto, como dosagem, transportes, lançamento e cura, mesmo assim poderão ocorrer casos de deterioração prematura das estruturas. Outro problema recorrente em estruturas de concreto armado é o empuxo provocado pelo lençol freático, uma ação natural do solo saturado causada pelo tempo. Os esforços de flexão exercidos sobre uma estrutura submetida a esta condição geram microfissuras que, por sua vez, permitem infiltrações por capilaridade (ARAÚJO *et al.*, 2019). Além disso, o concreto é um material originalmente alcalino devido aos componentes do cimento Portland, fazendo com que o contato com águas ácidas ocasione danos nas estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Estudos recentes mostram um novo concreto que possui capacidade de autorreparação em casos de aberturas superficiais, especialmente em elementos estruturais, como as microfissuras, fissuras e trincas. Esse método utiliza bactérias que produzem carbonato de cálcio (CaCO_3) através da liberação de hidróxido de cálcio quando o concreto é hidratado, por processo de biomineralização. Estas bactérias são adicionadas no momento da produção do concreto ou dosagem e são chamadas pelos pesquisadores de “agente de cura” (COSTA; RODRIGUES, 2018).

Essa nova tecnologia que faz uso de bactérias tem como principal propósito o aumento da durabilidade das estruturas, como também, a diminuição do custo com conservação e manutenção (CARNEIRO *et al.*, 2019). Diante disso, realizou-se uma revisão bibliográfica exploratória sobre a utilização de bactérias na produção de concreto, analisando o desempenho e durabilidade dessas estruturas através da autorreparação estrutural.

A pesquisa tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica exploratória sobre a utilização de bactérias na produção de concreto e seus benefícios para a construção civil, quanto ao desempenho e durabilidade dos elementos estruturais. Para tanto, é necessário estabelecer conceitos teóricos relacionados ao estudo proposto, que permita analisar conceitualmente o bioconcreto, caracterizar as bactérias utilizadas no processo de autocicatrização, bem como estudar a eficácia do método.

A fundamentação teórica a seguir apresentará os conceitos necessários para a compreensão do processo

de autocicatrização, desde o histórico do concreto ao surgimento de estudos referentes ao bioconcreto. Em seguida, o processo de biomineralização será caracterizado, apontando as bactérias mais utilizadas neste processo e como ocorre a autorreparação das estruturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Abordagem histórica sobre o concreto e surgimento do bioconcreto*

De acordo com Bunder (2016), a primeira concepção do concreto foi em 300 a.C., composto de agregados (cacos de pedras calcárias), areia, cal, pozolana e água. Pozolana é um material silicioso (rocha) de origem vulcânica encontrada em abundância na época, em Pozzuoli, região italiana do vulcão Vesúvio. O concreto deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de inserção de aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais. A proporção entre os materiais é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento e adensamento (HELENE; ANDRADE, 2010).

A reconstrução do Farol de Eddystone, realizado de 1756 a 1793 na Inglaterra, foi considerada um marco na evolução histórica do concreto. O projeto foi elaborado por John Smeaton, considerado o primeiro Engenheiro Civil do mundo, que determinou as características fundamentais para o cimento hidráulico através de seus experimentos. No início do século XX com enorme expansão do uso do concreto armado surgem as primeiras usinas de concreto e o primeiro arranha-céu do Brasil (Edifício Sampaio Moreira), além de várias outras obras históricas (BUNDER, 2016).

O concreto é o material construtivo mais utilizado no mundo, entretanto, sua fabricação é responsável pela maior geração de poluentes direta e indiretamente, degradação da natureza, além de ser o maior gerador de resíduos futuros no planeta (BUNDER, 2016). Conforme afirmação de Joshi *et al.* (2017), quase 80% da infraestrutura do mundo é construída em concreto armado. Devido à necessidade de investimento frequente com manutenção, existe esforço mundial na busca de soluções e estratégias que visam minimizar o

custo de reparo e reabilitação em elementos estruturais de concreto.

Segundo Alves *et al.* (2019), o pesquisador e microbiologista Hendrik Marius Jonkers publicou os primeiros estudos sobre o bioconcreto em 2007. Jonkers observou que o corpo humano, incluindo a estrutura óssea, possui a capacidade de autocura no caso de pequenas lesões e através dessa inspiração foi principiante no desenvolvimento de pesquisas que se referem a autocicatrização do concreto. Com a implantação deste novo material em construções, bem como em manutenção de estruturas já existentes, os custos de preservação diminuem significativamente.

2.2 Tipos de aberturas no concreto

As fissuras, trincas e rachaduras visíveis superficialmente nos elementos estruturais de concreto, são manifestações patológicas ocasionadas normalmente por aplicação de esforços superiores àqueles projetados para determinada estrutura (OLIVEIRA, 2012). De acordo com a classificação da NBR 15575-2:2013, fissura é o seccionamento na superfície ou em toda a seção transversal de um componente estrutural, com abertura capilar, provocado por tensões normais ou tangenciais.

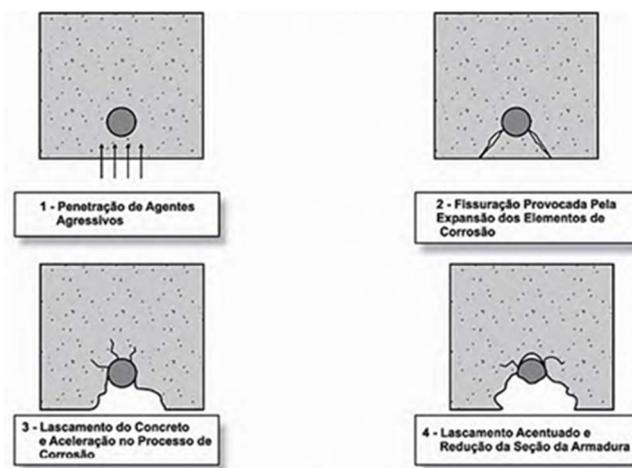
As fissuras também podem ser classificadas de acordo com sua atividade na estrutura, fator que influencia na escolha do tipo de tratamento e material que será usado na correção dos elementos de concreto (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Fissuras passivas são aquelas estabilizadas, que não se movimentam ao longo do tempo. Já as ativas podem apresentar variação de suas dimensões em decorrência do tempo (CARMONA, A.; CARMONA, T., 2013). Quanto à trinca, a NBR 15575-2:2013 classifica-a como uma expressão coloquial qualitativa aplicável a fissuras com abertura maior ou igual a 0,6 mm.

2.3 Entrada de água no concreto através das aberturas superficiais

A entrada de água no concreto, juntamente com outros agentes agressivos, gera o ataque eletroquímico responsável pela corrosão das armaduras de aço. Agentes como os cloretos, dióxido de carbono e nitritos, ao adentrarem no concreto aceleram o processo de corrosão. Quando a armadura já está em processo de

corrosão, o volume do aço afetado aumenta, gerando tensões de tração e, conseqüentemente, provoca desde a abertura de fissuras até o lascamento, ou seja, deslocamento da camada de cobrimento do concreto, assim como mostra figura 1 (MARCELLI, 2007).

Figura 1 - Processo de corrosão das armaduras de aço



Fonte: Marcelli (2007).

2.4 Processo de biomineralização

O processo de biomineralização consiste na sinterização de minerais inorgânicos através de organismos vivos. A precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), promovida por células bacterianas e suas respectivas atividades metabólicas é definida como biomineralização. Em geral a precipitação de carbonato de cálcio é uma função linear resultante do produto 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 estiver em excesso (ACHAL *et al.*, 2015).

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 de a precipitação ocorrer (SILVA; MELO, 2018).

No processo de biomineralização a urease hidrolisa a uréia, 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 hidróxido que

resultam na elevação do pH. A alteração do pH pode alterar o equilíbrio do bicarbonato, gerando íons carbonato que na presença de íons solúveis de cálcio, se precipitam como carbonato de cálcio (CaCO₃) (DHAMI *et al.*, 2013).

2.5 Bactérias do gênero *Bacillus*

As bactérias que são adicionadas ao concreto, no momento da dosagem para a produção do bioconcreto, devem ter características como resistência às tensões mecânicas, suporte de alta alcalinidade por longo tempo e tolerância ao oxigênio. Logo, o gênero *Bacillus* foi o mais indicado, não só porque é resistente a álcalis (presentes na composição do cimento Portland) e formadora de esporos, mas também, por resistir ao oxigênio com facilidade. Os esporos bacterianos se adicionados diretamente ao concreto em estado fresco, ou seja, antes de adentrar em seu estado endurecido, estes podem ter sua durabilidade comprometida, limitando-a em aproximadamente 4 meses (JONKERS *et al.*, 2008). Isto ocorre pois quando essas bactérias são inseridas diretamente na mistura, o cimento apresenta contínua hidratação, causando uma redução no diâmetro dos poros presentes no concreto de modo que o diâmetro de poros seja inferior ao dos esporos (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Quanto aos problemas de funcionalidade e durabilidade dos esporos bacterianos, pode-se ter duas soluções possíveis, sendo a primeira o encapsulamento ou paralisação dos esporos em uma matriz protetora, previamente adicionada à mistura de concreto, como também o acréscimo de agentes de retenção de ar para criar microporos no concreto, o que garante que os esporos permaneçam vivos (SOLTMANN *et al.*, 2003 apud JONKERS *et al.*, 2008).

3 METODOLOGIA

Como método balizador para a realização deste estudo, adotou-se a revisão bibliográfica exploratória, com o intuito de trazer o entendimento holístico sobre o assunto e, especificamente, a importância da autorreparação dos elementos estruturais, no contexto da tecnologia do concreto quanto ao desempenho e à durabilidade das edificações. Como os estudos pertinentes ao “bioconcreto” ainda são relativamente recentes, sobretudo no Brasil, ainda há poucos

experimentos com resultados relevantes e disponíveis sobre este assunto.

Foram considerados como fonte de pesquisa artigos científicos, monografias, dissertações e teses para que fosse possível uma abordagem com embasamentos conceituais que pudessem levar ao melhor entendimento acerca dos fatores envolvidos no processo de deterioração dos elementos estruturais de concreto, ao longo do tempo, que se manifesta a partir de aberturas superficiais que, por sua vez, na maioria dos casos, podem estar diretamente correlacionadas às patológicas do concreto. Analogamente, abordou-se o importante processo da autocicatrização, autorregeneração ou autorreparação dos elementos estruturais de concreto, sob o contexto das prerrogativas correlacionadas ao desempenho e durabilidade das edificações.

A base de dados utilizada foi o Google Acadêmico (GA), partindo da busca pelas seguintes palavras e termos: concreto, bioconcreto, Jonkers, bactérias, *bacillus*, biomineralização, autorreparação, autocicatrização, manifestações patológicas, corrosão, fissuras, aberturas superficiais, e demais assuntos pertinentes. Para apresentação e análise de resultados foram adotados como referência estudos publicados a partir de 2007, ano em que o pesquisador Henk Jonkers fez sua primeira publicação referente ao bioconcreto. Além disso, foram considerados apenas estudos que utilizaram o mesmo método experimental de Jonkers, ou seja, a inserção de bactérias encapsuladas junto ao lactato de cálcio em pastilhas (geralmente de argila expandida), ainda na fase de produção do concreto. Foram descartados os métodos de aplicação direta, em que corpos de prova confeccionados convencionalmente eram mergulhados em solução aquosa composta por bactérias e lactato de cálcio.

Dessa forma, foram escolhidos como objeto de estudo três experimentos semelhantes, sendo dois deles realizados por Jonkers em 2008 e 2011, respectivamente, e um estudo de Medeiros, publicado no corrente ano de 2020. Para facilitar a compreensão, logo adiante foram apresentados as metodologias adotadas por cada autor e os resultados obtidos, possibilitando comparar e discutir questões pertinentes. Os estudos foram denominados da seguinte forma: Autor 1a, Jonkers, *et al.* (2008); Autor 1b, Jonkers (2011); Autor 2, Medeiros (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação e análise dos resultados foram feitas com base em três estudos experimentais distintos, como já mencionado anteriormente, Autor 1a, Jonkers, *et. al.* (2008); Autor 1b, Jonkers (2011); Autor 2, Medeiros (2020).

4.1 Estrutura metodológica dos estudos analisados

4.1.1. Autor 1a (JONKERS *et al.*, 2008)

Para seleção de bactérias produtoras de calcita foram realizados ensaios para determinação do potencial de formação de esporos de três tipos de bactérias, obtidas da Coleção Alemã de Microorganismos e Culturas Celulares (DSMZ), sendo: *Bacillus cohnii* DSM 6307, *Bacillus halodurans* DSM 497 e *Bacillus pseudo firmus* DSM 8715. As cepas foram cultivadas em meio alcalino contendo 50 mM de NaHCO_3 , 50 mM de Na_2CO_3 e 20 mM de citrato de sódio, a fim de estimular a esporulação.

A fim de determinar a influência da adição de bactérias e compostos orgânicos no concreto com relação aos esforços de compressão e tração, amostras de pastas de cimento foram preparadas e testadas. Para o ensaio de compressão uma cultura de bactérias do gênero *Bacillus pseudo firmus* foi adicionada à mistura do concreto. Foram moldadas amostras de dimensão 4 x 4 x 4 cm e rompidas aos 3, 7 e 28 dias de cura. As amostras para o teste de resistência à tração foram produzidas com adição de compostos orgânicos, cerca de 0,5% do peso do cimento, moldadas em formato cilíndrico (2,2 cm de diâmetro e 3 cm de altura), e testadas após 28 dias de cura.

Para determinar a capacidade de produção de calcita através de bactérias imobilizadas, foram confeccionadas três séries de amostras, sendo: sem adições ou amostra de controle (Série A), com adição de lactato de cálcio (Série B) e com adição de lactato de cálcio e bactérias do gênero *Bacillus Cohnii* (Série C). Os corpos de prova foram confeccionados em formato cilíndrico (2,2 cm de diâmetro, 3 cm de altura) com relação água/cimento de 0,5. Após 7 dias de cura em frascos de plástico selados, os cilindros foram cortados em fatias de 0,5 cm, e, posteriormente, armazenados em

um recipiente com água de torneira. Ao final do período de 10 dias de armazenamento e formação de calcita, as fatias de pasta foram enxaguadas com água destilada e examinadas com um microscópio eletrônico de varredura ambiental (Philips XL30) para verificação dos resultados.

4.1.2. Autor 1b (JONKERS, 2011)

Em seu estudo de 2011, Jonkers observou que quando as bactérias eram adicionadas diretamente à mistura do concreto, o tempo de vida útil das bactérias era comprometido, reduzindo-o em aproximadamente dois meses. Por isso, visando aumentar sua vida útil, as bactérias incorporadas no concreto foram encapsuladas juntamente com o lactato de cálcio em partículas de argila expandida. Em seu experimento, moldou 6 corpos de prova de concreto com adição de bactérias do gênero *Bacillus* e seis corpos de prova sem adição de bactérias (controle).

Os corpos de prova de concreto com adição de bactérias foram moldados substituindo parte do material agregado (partículas entre 2 a 4 mm), por partículas de argila expandida de tamanho similar, em conjunto com o lactato de cálcio. A quantidade de esporos bacterianos por argila expandida foi de $1,7 \times 10^5$ por grama e 5×10^7 esporos bacterianos a cada dm^3 de concreto, além de mais 5% por fração de lactato de cálcio (correspondente a 15 gramas de lactato de cálcio em cada dm^3 de concreto). Antes da aplicação, as partículas de argila expandida foram secas em estufa por uma semana a 40°C , de modo que não houvesse perda de peso adicional pela evaporação de água. Os corpos de prova de controle, ou seja, sem adição de bactérias, foram moldados. Porém, nestes corpos de prova as partículas de argila não apresentavam adição de agentes bioquímicos. Houve a substituição da quantidade de agregados (areia e brita) de 50% do volume total de agregados por argila expandida.

Estabeleceu-se que todos os corpos de provas teriam formato de “discos” cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e espessura de 1,5 cm. As amostras foram curadas com água em 56 dias (2 meses) e na sequência levados para um ensaio de tração por compressão diametral, com o intuito de produzir aberturas (fissuras) nas amostras. Para isso, foram inseridas em um anel de alumínio aplicando uma tensão de compressão controlada. As aberturas superficiais que as amostras apresentaram

depois da aplicação da tensão correspondeu ao valor de 0,15 mm de espessura, com extensão de 8 cm, disposta de cima para baixo no corpo de prova, atravessando-o totalmente. Em seguida, as amostras foram submersas em água com temperatura ambiente durante duas semanas. Subseqüentemente, a permeabilidade de todas as amostras fissuradas foi quantificada por registro automático verificando a percolação no tempo durante um período de 24 horas.

4.1.3 Autor 2 (MEDEIROS, 2020).

No experimento, o autor utilizou as bactérias do gênero *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus*, porém considerou-se nesse estudo somente o gênero *Bacillus subtilis* para fins de comparação dos resultados, já que é a mesma bactéria utilizada nos ensaios dos autores 1a e 1b. As bactérias foram cedidas pelo Centro de Ciências da Saúde e Centro de Biotecnologia, ambos da Universidade Federal da Paraíba.

Os materiais usados foram: cimento, água, areia fina (com partículas de dimensões variando entre 0,105 mm e 1,190 mm), e argila expandida (15mm até 22mm). No processo de impregnação, a suspensão bacteriana foi aquecida a 80°C com agitação contínua, em seguida adicionado lactato de cálcio e após dois minutos inserido a argila expandida. Posteriormente, os agregados foram misturados ao aglomerante para a moldagem dos corpos de prova. Foram moldados 20 corpos de prova cilíndricos de dimensões 5 cm x 10 cm. A próxima etapa correspondeu à submersão das amostras em água durante o período de sete dias. Em seguida, ocorreu a formação das fissuras nas amostras por meio de uma prensa manual. As amostras foram levadas para estufa e nesta permaneceram durante o período de 24 horas, em preparo para o ensaio de absorção de água.

4.2 Resultados dos estudos realizados

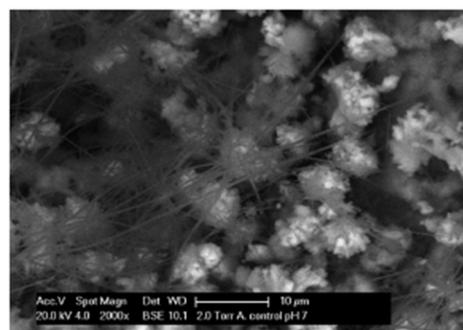
4.2.1 Avaliação dos resultados obtidos em concretos produzidos pelo Autor 1a (JONKERS *et al.*, 2008).

As três espécies bacterianas investigadas produziram esporos, enquanto que nenhuma formação de calcita foi observada em culturas abióticas (não inoculada com bactérias). A análise com microscópio mostrou que as amostras que continham pasta de cimento apresentaram diferenças significativas entre a amostra controle (sem

adições) e a amostra com adição de lactato de cálcio e bactérias.

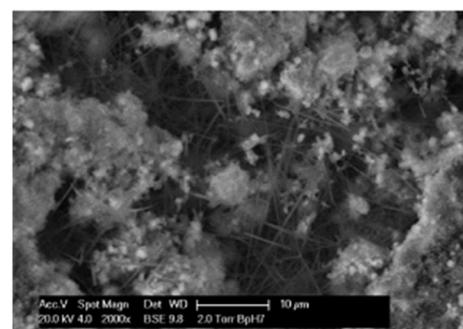
Nas amostras de controle e amostras com adição somente de lactato de cálcio observou-se a formação de grupos pequenos de calcita (entre 2 a 5 µm), bem como filamentos semelhantes a C-S-H (silicato de cálcio hidratado), assim como mostra as figuras 2 e 3. Já nas amostras em que também foram incorporadas bactérias além do lactato de cálcio, estas apresentaram C-S-H e a formação de grupos robustos de calcita (até 100µm), conforme figura 4 a seguir.

Figura 2 - Superfície da amostra da pasta de controle



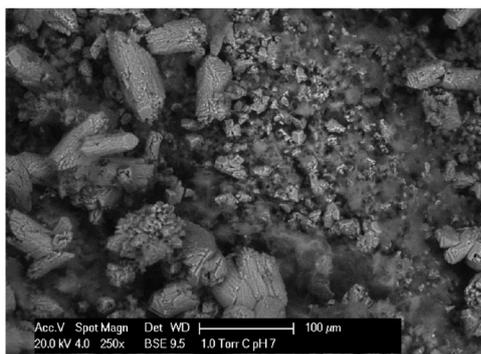
Fonte: Jonkers *et al.*, (2008)

Figura 3 - Amostra de pasta com lactato de cálcio



Fonte: Jonkers *et al.*, (2008)

Figura 4 - Amostra de pasta com lactato de cálcio e B. Cohnii



Fonte: Jonkers *et al.*, (2008)

4.2.2 Avaliação dos resultados obtidos em concretos produzidos pelo Autor 1b (JONKERS, 2011)

Jonkers realizou alguns experimentos com os concretos produzidos, sendo um deles o de resistência à compressão, no qual foi comparado os corpos de prova com substituição de parte dos agregados (areia e brita) por argila expandida, equiparando com as amostras contendo agregados e sem argila expandida. Dessa forma, houve uma redução de 50% na resistência à compressão após 28 dias de cura das amostras.

Após as amostras serem submersas em água, realizou-se o teste de percolação. Houve uma diferença significativa em relação a permeabilidade, ou seja, os corpos de prova apresentaram diferentes índices de percolação nas amostras, o que interfere na capacidade de autorreparação. Enquanto as fissuras de todas as seis amostras com adição de bactérias foram seladas, com resultado do teste de percolação de 0 ml de água/h, apenas duas das seis amostras de concreto de controle foram seladas e obtiveram resultados de percolação igual 0 ml / h. Nas outras quatro amostras os resultados ficaram entre 0 e 2 ml / h, não conseguindo selar suas fissuras.

Um exame microscópico revelou que em ambas as amostras, de controle e com bactérias, houve precipitação de minerais à base de carbonato de cálcio. Entretanto, enquanto a precipitação nas amostras de controle ocorreu em sua maioria perto da borda da fissura, deixando o restante da fissura sem precipitação e sem cicatrização, nas amostras com bactérias a precipitação mineral ocorreu dentro da fissura, por isso houve a autorreparação completa, assim como mostra a figura 5.

Figura 5 - Amostras de concreto de controle (A) e com bactérias (B) antes ao lado esquerdo e depois ao lado direito.



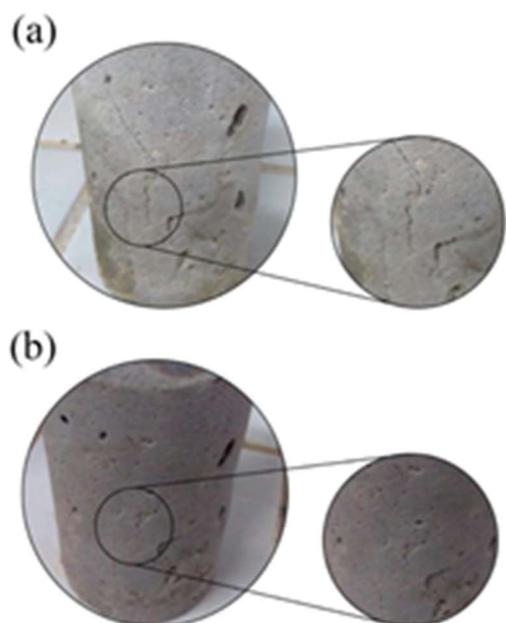
Fonte: Jonkers (2011).

4.2.3 Avaliação dos resultados obtidos pelo Autor 2 (MEDEIROS, 2020).

Os corpos de prova foram submetidos à prensa para o ensaio de compressão axial. Nesse momento, as amostras com adição de bactérias começaram a apresentar fissuras com cargas de 50 a 60 kg. Por outro lado, as amostras sem bactérias foram capazes de resistir à cargas de até 1000 kg sem a abertura de fissuras. Diante disso, é possível observar a baixa resistência à compressão em amostras com adição de bactérias. Essa diferença significativa de resistência mecânica entre amostras de controle e amostras bacterianas pode ter ocorrido pelo tipo de impregnação utilizada.

A verificação do processo de autorreparação aconteceu de forma visual, pois o autor não possuía o aparelhamento adequado. Sendo assim, não foi possível constatar a intensidade da regeneração. A seguir, a figura 6 mostra o resultado do processo depois de 10 dias.

Figura 6 – Fissuras provocadas em corpo de prova com *B. subtilis* sendo (a) 1 dia de vida e (b) 10 dias de vida.



Fonte: Medeiros (2020).

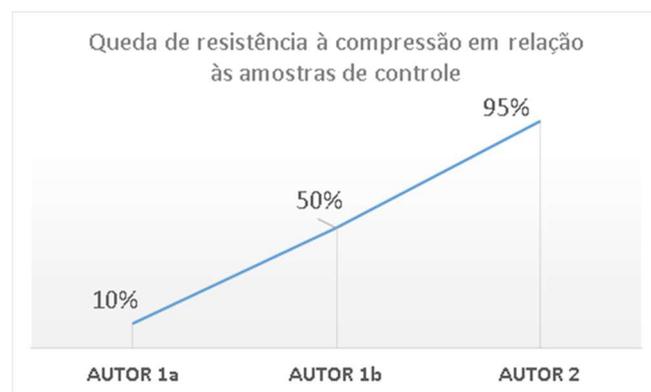
Pode-se constatar, mesmo que de forma visual, o processo de autorreparação. O fato de a fissura estudada não ter apresentado uma selagem completa se deve, provavelmente, pelo curto intervalo de tempo entre os registros fotográficos (10 dias). Contudo, de acordo com o resultado obtido no período de 10 dias, é provável que a abertura fosse completamente tamponada em um intervalo maior de tempo.

4.3 Análise dos resultados

Embora o objetivo principal deste estudo seja a análise do potencial de autocura em estruturas de concreto armado, devem ser considerados os impactos nas propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais. O Autor 1a observou queda da resistência mecânica do concreto em torno de 10% em relação à amostra de controle. Essa diminuição da resistência mecânica também foi observada nos estudos do Autor 1b, porém, de forma mais significativa, apresentando 50% de perda de resistência à compressão em amostras com substituição de agregados convencionais por argila expandida aos 28 dias, quando comparadas com corpos de prova convencionais. Nos ensaios realizados pelo Autor 2 também é possível identificar expressiva queda de resistência à compressão. Enquanto as amostras de controle suportaram cargas em torno de 1000 kg na prensa, as amostras com adição de bactérias começaram

a apresentar fissuras com cargas entre 50 e 60 kg. Na figura 7 é possível identificar os percentuais de queda de resistência à compressão das amostras com adição de bactérias quando comparadas com as amostras de controle.

Figura 7 – Queda de resistência à compressão em relação às amostras de controle.



Fonte: Dos autores, 2020.

Quanto ao tamponamento das aberturas, considerando as amostras com adição de lactato de cálcio e bactérias do gênero *Bacillus* referidas no estudo do Autor 1, estas apresentaram silicato de cálcio hidratado e a formação de grupos robustos de calcita (até 100µm). De acordo com a classificação das aberturas da NBR 15575-2:2013, com os resultados obtidos pode-se considerar o tamponamento de fissuras. Contudo, de acordo com o autor, resta ser avaliado a proporção da produção de minerais bacterianos nas superfícies, o que influencia diretamente na redução da permeabilidade e, conseqüentemente, proteção do material quanto a degradação da matriz ou corrosão das armaduras de aço.

Os estudos do Autor 1b demonstraram claramente que a adição de partículas de argila expandida carregadas com bactérias e lactato de cálcio na produção do concreto apresentou melhores resultados, quando comparado com o concreto produzido sem adição das bactérias. Tal fator é decorrente dos processos químicos e biológicos que ocorrem no concreto bacteriano. O autor deste experimento afirma ainda que as partículas de cimento não hidratadas expostas na fissura sofrerá hidratação secundária, fazendo com que o dióxido de carbono reaja com a portlandita para produzir minerais à base de carbonato de cálcio. Posteriormente, esses minerais precipitados se

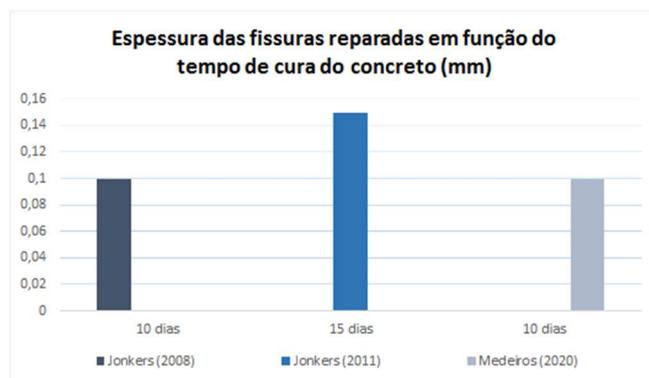
formariam nas bordas das aberturas, situação provocada pela alta solubilidade do hidróxido de cálcio.

Tendo em vista o objetivo principal do Autor 1b, ou seja, avaliar o processo de autocura com adição de bactérias através de partículas de argila expandida, os resultados encontrados foram promissores. Enquanto as amostras de concreto bacteriano apresentaram 100% de cura das aberturas induzidas em 2 meses (6 de 6 espécimes testados), os espécimes (corpos de prova) de controle apresentaram apenas 33% de cura (2 de 6). Além disso, foi registrada a autorreparação de fissuras com espessuras de 0,15 mm. No entanto, a viabilidade da aplicação prática ainda depende da minimização da quantidade de agente de cura para tornar economicamente competitivo com as atuais técnicas de reparo estrutural.

De acordo com os resultados obtidos pelo Autor 2, foi observada a eficiência na regeneração de fissuras quando adicionadas as bactérias na produção do concreto. Além disso, foi constatada influência dos agentes microbianos com relação ao tempo de endurecimento do corpo de prova, pois, após sete dias de cura, a amostra ainda apresentava instabilidade. O Autor 2, assim como o Autor 1b, também faz menção ao custo e acessibilidade dos insumos utilizados para a produção do bioconcreto, especialmente os agentes bacterianos e o lactato de cálcio.

A espessura da autorreparação do corpo de prova moldado no experimento do Autor 2 não foi mensurada devido às limitações técnicas, já expostas anteriormente. Entretanto, para fins de comparação, e de acordo com o registro fotográfico apresentado no estudo e o tempo de cura das amostras (10 dias), consideramos que o tamponamento da fissura foi semelhante ao constatado pelo Autor 1a (também considerou o período de 10 dias de cura). Dessa forma, foi possível expressar graficamente as características da abertura (fissura) autorreparada no concreto, em função do tempo gasto (decorrido) de cura, conforme mostra a figura 8 a seguir:

Figura 8 – Autorreparação do concreto em função do tempo de cura da amostra



Fonte: Dos autores, 2020.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos autores estudados, observou-se que o bioconcreto tem um futuro promissor na construção civil. O principal objetivo da adição de esporos bacterianos na produção de concreto é a formação de carbonato de cálcio, responsável pela autorreparação de aberturas superficiais. A partir da análise dos três estudos, observa-se que todos obtiveram eficácia, tanto no processo de biomineralização (formação de carbonato de cálcio) quanto no tamponamento das aberturas que tiveram às fissuras tamponadas totalmente ou praticamente toda reparada pelo processo de autocicatrização. Por outro lado, Jonkers (2011) e Medeiros (2020) afirmaram a necessidade do aprimoramento dos estudos quanto à viabilidade econômica, de forma que o custo de aplicação seja competitivo com o de reparo estrutural. Além disso, a espessura máxima de autorreparação não é ainda muito bem conhecida, podendo ainda sofrer variação de acordo com o método aplicado e o esporo bacteriano utilizado.

Mesmo que os experimentos estudados tenham mostrado uma diminuição da resistência mecânica nos concretos fissurados e autorreparados, a partir dos ensaios realizados em corpos de prova moldados com o bioconcreto, o que já poderia ser esperado, este material construtivo, produzido com a adição de bactérias específicas e adequadas, poderá contribuir muito quanto ao desempenho e durabilidade das estruturas de concreto.

O simples fato de ter a “propriedade de tamponamento” das aberturas superficiais (microfissuras e fissuras), comumente verificáveis nos elementos estruturais de concreto no decorrer do tempo, o “bioconcreto” apresenta-se como boa opção de material construtivo, sobretudo em edificações que se localizarão em ambientes altamente agressivos, como é o caso das construções à beira mar que são submetidas aos ataques por cloretos, bem como em obras que têm contato com fluidos ou gases ácidos, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. NBR 15575. Rio de Janeiro, 2013.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; KUMARI, D. et al. **Biomining for Sustainable Construction**. A Review of Processes and Applications. Earth-Science Reviews. [s.l.], 2015, v. 148.
- ALVES, L.; MELLO, M.; BARROS, S. et al. **Characterization of Bioconcrete and the Properties for Self-Healing**. 2019. Presented at the 5th Ibero-American Congress on Entrepreneurship, Energy, Environment and Technology—CIEEMAT. Portugal. 2019.
- ARAÚJO, C. E.; ABREU, B.; AMARANTE, M. et al. **Bioconcreto**. Centro Universitário de Braz Cubas. [s.l.: s.n.], 2019. v. 8, n. 2.
- BUNDE, J. **O concreto: sua origem, sua história**. Universidade de São Paulo. Faculdade de arquitetura e urbanismo. São Paulo, 2016.
- CARMONA, A. F.; CARMONA, T.; **Fissuração nas estruturas de concreto**. Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. México, 2013.
- CARNEIRO, A.F.; PELEGRINELLO, M. **Influência da deposição de CaCO₃ oriundos de bactérias Bacillus em matrizes de argamassas**. Introdução à biocicatrização. Revista Técnico- científica. CREA-PR. Paraná, 2019. ISSN 2358-5420.
- COSTA, A.; RODRIGUES, F. **Desenvolvimento de concretos autocuráveis utilizando a bactéria Bacillus Megaterium**. Revista Científica UMC. UMC Universidade. [s.l.], 2018. ISSN 2525-5250.
- DHAMI N. K.; REDDY M. S.; MURKHERJEE A. **Biomining of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites**. J. Microbiol Biotechnol 23:707-714, 2013.
- EUZÉBIO, L.; ALVES, T.; FERNANDES, V. **Bioconcreto. Estudo exploratório de concreto com introdução de Bacillus subtilis, Bacillus licheniformis, acetato de cálcio e ureia**. 2017. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento portland**. IBRACON. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Cap. 29. 2010.
- JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self healing concrete**. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8, 2008.
- JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. Frankfurter Afrikanistische Blätter, v. 8,n. 1, p. 49–79, 2011.
- KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S.C.; **A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material**. Construction and Building Materials. 2017.
- MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: Pini, 2007.
- MEDEIROS, D. P. C.; **Uso de bactérias (bacillus subtilis e bacillus cereus) na produção de bioconcreto**. Universidade Federal da Paraíba. Curso de Engenharia Civil. João Pessoa, 2020.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3a. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- OLIVEIRA, A. M. **Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. Monografia (Trabalho de final de curso de especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2012.
- REIS, L.S. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 112 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- SILVA, D. G.; MELO, L. A.; **Aplicação de bactérias biocimentantes no tratamento de patologias de revestimentos de argamassa**. 51f. Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFG. Aparecida de Goiânia, 2018.