

UTILIZAÇÃO DE MICRORGANISMO AUTÓGENO PARA A RECUPERAÇÃO DE FISSURAS EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA

Graciela Mânica¹, Claucia Fernanda Volken de Souza²

Resumo. A utilização de microrganismos precipitantes de carbonato de cálcio ou calcita (CaCO_3) vem sendo proposta como uma alternativa para solucionar os problemas de fissuração dos materiais cimentícios sem interferir nas suas propriedades. Para adicionar os microrganismos à mistura e garantir sua sobrevivência no meio alcalino é recomendado envolvê-los em uma cápsula, juntamente com os nutrientes necessários para que ocorra a precipitação do CaCO_3 . Nesse contexto o objetivo desse trabalho foi induzir a autocicatrização de corpos de prova (CPs) de argamassa, utilizando um microrganismo precipitante do CaCO_3 , encapsulado com alginato de sódio e com alginato de sódio e amido combinados. O microrganismo utilizado foi o *Bacillus subtilis* ATCC6633 que foi encapsulado por meio de extrusão. O microrganismo foi adicionado, de forma livre e encapsulado, aos corpos de prova de concreto que tiveram as fissuras induzidas por aplicação de esforço de flexão. Após, os corpos de prova foram mergulhados em água e em água com ureia para ativação do microrganismo e, posteriormente, observou-se a recuperação das fissuras. As amostras contendo o microrganismo, encapsulado ou livre, foram comparadas aos corpos de prova de referência, onde o mesmo não foi adicionado. Ao final do período de cem dias observou-se a cicatrização das fissuras nos CPs contendo microrganismo encapsulado. Não foi verificada diferença de cicatrização entre os CPs mergulhados em água e água com ureia. Os resultados obtidos indicam a viabilidade da utilização de microrganismo autógeno para a cicatrização de fissuras em corpos de prova de argamassa.

Palavras-chave: Carbonato de cálcio; Calcita. *Bacillus subtilis*; Bioconcreto.

1 Graduanda do Curso de Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. gmanica@universo.univates.br

2 Professora Doutora do Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas – CETEC/UNIVATES. claucia@univates.br

1. Introdução

Os materiais cimentícios são os mais empregados na construção civil em todo o mundo. Isso ocorre em função de sua boa resistência à compressão e por conta do seu baixo custo quando comparado a outros materiais utilizados. Em contrapartida, a resistência à tração é limitada, o que possibilita a abertura de fissuras nas estruturas. Para compensar essa limitação, reforços com aço são comumente utilizados e, embora aumentem a vida útil e limitem a abertura de fissuras que surgem devido aos esforços de tração, elas acabam aparecendo com o passar dos anos na maioria dos casos (TITTELBOOM; DE BIELE, 2013).

As fissuras surgem por diversos fatores que podem advir tanto das propriedades do material cimentício e das interações entre seus constituintes (MEHTA; MONTEIRO, 2014), quanto da má execução do projeto ou da precária utilização dos usuários após o elemento estrutural estar concluído (MAZER, 2008). Outro fator apontado como responsável pela deterioração das estruturas é a constante exposição aos microrganismos, às intempéries e aos gases da atmosfera. Isso pode causar danos à parte estrutural, aumentando o custo de manutenção, além da degradação dos componentes do concreto. Ademais, podem haver danos ambientais caso a edificação prejudicada seja, por exemplo, uma estação de tratamento de efluentes (BERTRON, 2014).

Para resolver o problema das fissuras em estruturas de concreto ou argamassa que surgem ao longo da vida útil de uma edificação, é necessário produzir mais cimento. O processo de fabricação do cimento é apontado como um dos principais responsáveis pela emissão de gases na atmosfera devido ao alto consumo de energia durante sua produção e liberação de CO₂ do carbonato de cálcio ao liberar óxido de cálcio. (VIEIRA, 2017). Segundo Maury e Blumenschein (2012) este processo pode causar danos ambientais, bem como prejuízos para a saúde das pessoas envolvidas na produção. Os autores apontam ainda que 3% dos gases de efeito estufa são de responsabilidade da indústria do cimento, bem como 5% da emissão de CO₂. Para diminuir a produção de cimento e, conseqüentemente, a emissão de gases nocivos ao meio ambiente, alguns autores vêm propondo a autocicatrização do concreto (TITTELBOOM; DE BIELE, 2013; THIVYA; CHANDRASEKAREN, 2016; JONKERS; SCHLANGEN, 2007; WIKTOR; JONKERS, 2011).

Para regenerar as fissuras que surgem nas estruturas feitas com materiais à base de cimento, Tittelboom e De Biele (2013) citam a característica de autocicatrização autógena destes materiais, a qual se manifesta quando ocorrem, dentro da mistura já endurecida, reações que podem preencher os espaços vazios, por hidratação contínua dos próprios constituintes do concreto, ou por carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Eles mencionam ainda alguns estudos em que foram utilizados aditivos ou adições para tentar induzir esse processo, como a adição de fibras ou agentes cristalizantes à mistura de material cimentício fresco.

São conhecidas diversas técnicas utilizadas para reparar as fissuras no concreto, mas elas apresentam desvantagens como degradação ambiental e diferença de coeficiente de expansão entre os materiais cimentícios e os materiais utilizados. Em função disso, surgiu a proposta de utilização de bactérias precipitantes de carbonato de cálcio como uma alternativa de reparo não agressiva ao meio ambiente (THIVYA; CHANDRASEKAREN, 2016).

Jonkers e Schlangen (2007) apontam que, embora tenham resultados satisfatórios na autoreparação de fissuras, os aditivos e adições podem alterar a resistência característica destes materiais. Os autores propõem a utilização de microrganismos precipitadores de calcita (CaCO_3) adicionados à mistura fresca de concreto ou argamassa para reparar as fissuras sem comprometer o desempenho da estrutura. Wiktor e Jonkers (2011) observaram que ao adicionar os microrganismos diretamente à mistura, estes tinham sua atividade reduzida para apenas alguns dias, pois os componentes da mistura os esmagavam ou então a alta alcalinidade da pasta de cimento deixava-os inativos.

Vieira (2017) menciona o microencapsulamento do microrganismo, no qual o mesmo é envolto por uma cápsula, como uma forma de preservar o agente de cicatrização na fase da mistura dos materiais cimentícios, além de protegê-lo da alcalinidade existente no meio. A autora cita também a possibilidade de encapsular, junto com o microrganismo, nutrientes que auxiliarão no processo metabólico de produção de cristais. Bashir et al. (2016) reforçam a importância do encapsulamento do microrganismo quando mencionam que o pH da mistura, que pode chegar a 13, torna o ambiente altamente alcalino e a maioria das bactérias não sobrevive a ambientes com pH superior a 10.

2. Objetivo

Avaliar a capacidade de autocicatrização de corpos de prova de argamassa de cimento Portland por meio da adição do microrganismo *Bacillus subtilis* ATCC6633.

3. Referencial teórico

A autocicatrização do concreto traria enormes benefícios, uma vez que nem sempre as fissuras são visíveis ou de fácil acesso. Sem mencionarmos ainda os custos indiretos em função da produtividade e os transtornos que podem vir a surgir no entorno da obra devido à necessidade de utilização de máquinas ou caminhões para os reparos (TITTELBOOM; DE BIELE, 2013). Para que o concreto seja considerado auto-regenerador é necessário que as bactérias envolvidas no processo sejam capazes de transformar os nutrientes orgânicos adicionados à mistura em cristais de calcita inorgânicos e insolúveis e que estes fechem as fissuras (BASHIR et al., 2016).

Wiktor e Jonkers (2011) mencionam que em estudos anteriores foram comparados corpos de prova de argamassa com adição de bactérias e sem

adição de bactérias. Nos exemplares onde havia microrganismos foi possível retirar amostras de calcita precipitada nas superfícies das fissuras. Nos demais não foi possível retirar essas amostras, pois a precipitação foi mínima.

Segundo Thivya e Chandrasekaren (2016) nos estudos publicados sobre o uso de microrganismos para a autocicatrização do concreto é possível observar que todos mencionam a precipitação de CaCO_3 como a principal vantagem do processo. Também há uma variedade de propostas, sendo que em cada uma delas um tipo de bactéria é utilizado com o propósito citado. O Quadro 01 relaciona os microrganismos, os meios de cultura e as condições de crescimento utilizados pelos autores. Em todos os estudos os resultados foram comparados à amostra controle (corpos de prova sem adição de microrganismos).

Quadro 01 - Estudos realizados com diferentes microrganismos

Microrganismo	Composição do meio de cultura	Condições de crescimento	Autores
<i>Sporosarcina pasteurii</i> DSM33; <i>Bacillus cohnii</i> DSM6307; <i>Bacillus halodurans</i> DSM497 e <i>Bacillus pseudofirmus</i> DSM8715	0,2 g/L de NH_4Cl , 0,02 g/L de KH_2PO_4 , 0,225 g/L de CaCl_2 , 0,2 g/L de KCl , 0,2 g/L de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1 mL/L de solução de oligoelementos SL12B, 0,1 g/L de extrato de levedura, 6,45 g/L sal trissódico ácido e 8,4 g/L de bicarbonato de sódio	O pH do meio foi de 9,2. Culturas foram incubadas em frascos Erlenmeyer de 2 L em uma mesa agitadora a 150 rpm. O crescimento foi monitorado por microscopia	JONKERS e SCHLANGEN (2007).
<i>Bacillus subtilis</i> IFO13719	5 g/L de peptona, 5 g/L de NaCl e 3 g/L de extrato de levedura.	As bactérias foram cultivadas em meio líquido, com ureia e acetato de cálcio, em tubo de reação estéril selado.	NUGROHO, SATYARNO e SUBYAKTO (2015).
<i>Bacillus subtilis</i> JC3	Peptona, NaCl , extrato de levedura.	A cultura foi mantida em <i>slants</i> de ágar nutriente e as inclinações foram incubadas a 37 °C.	PRADEEPKUMAR et al. (2015).

Microrganismo	Composição do meio de cultura	Condições de crescimento	Autores
<i>Bacillus sphaericus</i> LMG22557	20 g/L de extrato de levedura e 20 g/L de ureia.	Cultura foi incubada a 28 °C. Os esporos colhidos por centrifugação e ressuspensos em solução salina estéril (NaCl 8,5 g/L) que foi pasteurizada.	WANG et al. (2015).
<i>Bacillus subtilis</i> ATCC6633	Plate Agar Count – PCA ³ ; 20 g/L de extrato de levedura; 20 g/L de ureia P.A; 50 g/L cloreto de cálcio dihidratado	Placas de petry foram mantidas em estufa de cultura a temperatura de 28 °C ± 2 °C.	VIEIRA (2017).

Fonte: Autores citados.

Jonkers e Schlangen (2007) adicionaram os microrganismos no concreto de duas formas distintas: adicionando os mesmos na água da mistura do concreto e imobilizando os microrganismos em cimento-pedra. Realizaram testes de verificação de esporos nas células incorporadas ao cimento-pedra, testes de resistência à tração e compressão, além da verificação da capacidade de precipitação de CaCO₃. Os resultados mostraram que apenas o *S. pasteurii* não produziu esporos, enquanto os outros três microrganismos, *B. cohnii*, *B. halodurans* e *B. pseudofirmus*, produziram esporos abundantemente. Os resultados de resistência não mostraram diferenças significativas em comparação aos corpos de prova de controle. Por fim, verificaram a precipitação de cristais semelhantes à calcita na superfície das amostras quando estas foram colocadas em meio contendo extrato de peptona e levedura.

Nugroho, Satyarno e Subyakto (2015) utilizaram cinza volante pulverizada impregnada com os microrganismos preparados em meio líquido nutriente. Foram adicionadas diferentes concentrações de *B. subtilis* nos corpos de prova para observar as implicações no teste de compressão. Também foram realizados testes de flexão e permeabilidade, além da verificação da capacidade de fechar as fissuras induzidas de 0,2 mm. O corpo de prova foi submerso em uma solução líquida com ureia e acetato de cálcio por 60 dias. Nos resultados os autores concluem que a concentração de bactérias de 10⁵ células/mL melhorou a resistência a compressão e diminuiu a permeabilidade do corpo de prova. Nos testes de flexão verificaram recuperação de rigidez após o fechamento

3 Composição: 5,0 g/L de peptona de caseína; 2,5 g/L de extrato de levedura; 1,0 g/L de D(+) glucose; -14,0 g/L de Agar-agar.

das fissuras pelos microrganismos. Também verificaram que o fechamento de fissuras podia ser observado após sete dias.

Pradeedkumar et al. (2015) imobilizaram o microrganismo livre em terra de diatomácea que foi adicionada à mistura do concreto. Em testes de resistência à compressão, os resultados foram de aumento de resistência. Mencionam ainda que, embora o microrganismo não tenha sido encapsulado, as fissuras fecharam. Porém, não fica claro no estudo se o fechamento ocorreu pela ação do microrganismo ou pela capacidade que o concreto tem de autocicatrizarse.

Wang et al. (2015) utilizaram alginato de sódio modificado como material de parede das cápsulas. Foram realizados testes para verificar germinação e a ativação da enzima urease pelos esporos, a precipitação de CaCO_3 , a capacidade do alginato de segurar os esporos dentro da cápsula, capacidade de absorção do hidrogel, influência do amido modificado nas propriedades mecânicas da argamassa e atividade bacteriana na argamassa. Os resultados comprovaram a viabilidade dos esporos e o consumo de ureia por estes após o encapsulamento, além de análises termogravimétricas que atestaram a precipitação de CaCO_3 . Também foi constatado que alguns esporos saíram da cápsula, mas não em quantidade expressiva, e que o hidrogel a base de alginato consegue absorver a umidade do ambiente, o que é benéfico para a atividade bacteriana. Por fim, os resultados em relação às propriedades do concreto mostram uma ligeira redução de trabalhabilidade e da concentração de oxigênio.

Vieira (2017) mergulhou os corpos de prova de concreto em um recipiente com capacidade para 5 L onde havia solução nutriente. Logo após adicionou os microrganismos e, 48 h depois, as amostras foram retiradas e mantidas em temperatura ambiente para secagem. Os testes realizados foram para verificação de precipitação de CaCO_3 . Como resultados a autora descreve a presença de cristais de calcita na superfície dos corpos de prova.

4. Metodologia

Os materiais constituintes do estudo foram: microrganismo, nutrientes para o meio de cultura, materiais de parede para a preparação das cápsulas e os componentes do concreto para os corpos de prova.

3.1 Determinação do meio de cultura para crescimento do microrganismo

O microrganismo utilizado para o estudo foi o *Bacillus subtilis* ATCC6633, cedido pelo Laboratório de Microbiologia da Universidade do Vale do Taquari – Univates. Os nutrientes utilizados para preparação do meio de cultura líquido para crescimento microbiano estão apresentados na Tabela 01 e compõem o meio de cultura Luria-Bertani (LB). Foram utilizadas duas composições deste meio para comparar e determinar em qual delas o microrganismo cresceria melhor. Para o meio de cultura sólido foi acrescentado ágar bacteriológico (15 g/L) aos componentes do meio líquido.

Tabela 01 – Composição dos meios de cultura testados para crescimento microbiano

Meio de Cultura 1 (MC1)		Meio de Cultura 2 (MC2)	
Extrato de Levedura	5 g/L	Extrato de Levedura	5 g/L
Cloreto de Sódio (NaCl)	10 g/L	Cloreto de Sódio (NaCl)	10 g/L
Peptona	10 g/L	Triptona	10 g/L

Fonte: adaptado de Nugroho, Satyarno e Subyakto (2015).

Para os dois meios o crescimento microbiano foi acompanhado pela determinação de sua densidade ótica (DO), em espectrofotômetro, e também por contagem de unidades formadoras de colônia (UFC) em placas de petri. As técnicas foram realizadas em triplicata.

3.2 Encapsulamento do microrganismo

As composições dos materiais de parede para preparação e formação das cápsulas utilizadas para o encapsulamento do microrganismo estão na Tabela 02.

Tabela 02 – Materiais de parede para encapsulamento do microrganismo

Composição 1		Composição 2	
Alginato	1,5 % (m/v)	Alginato	1,5 % (m/v)
-	-	Amido	1,0 % (m/v)

Fonte: Martin et al. (2013).

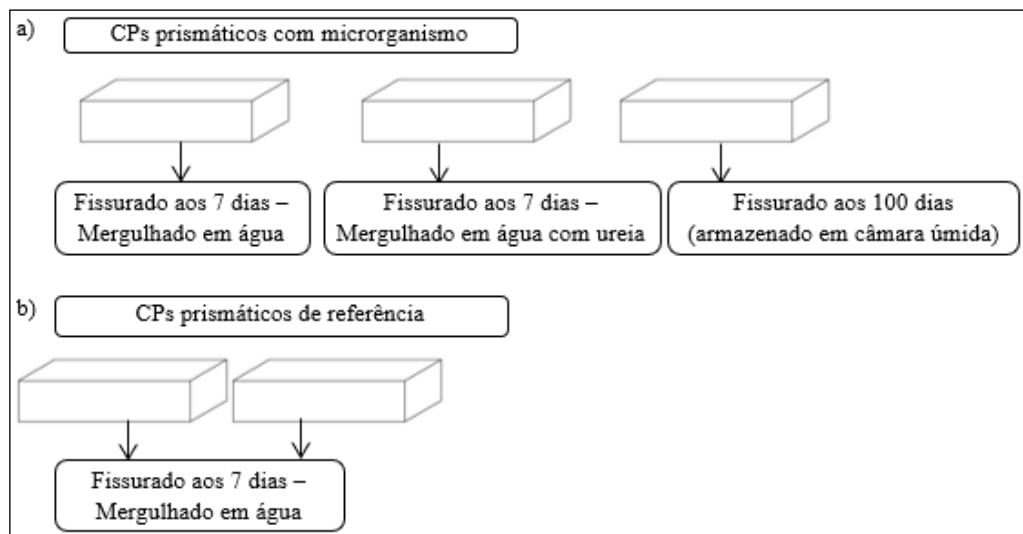
Para o encapsulamento, o microrganismo previamente crescido no meio líquido que se mostrou mais adequado, foi colocado em geladeira a 8 °C por 72 h para esporular. Após esse período, alíquotas de 10 mL do material de parede foram misturadas com alíquotas de 10 mL contendo os microrganismos esporulados. Com o auxílio de uma pipeta pasteur essa mistura foi gotejada em uma solução de cloreto de cálcio (CaCl₂) (0,5 M) formando as cápsulas com o microrganismo e o meio de cultura.

3.3 Aplicação do microrganismo nos corpos de prova de argamassa

O traço utilizado para a mistura da argamassa foi 1: 2,4: 0,48 sendo, respectivamente, cimento, areia e água, e foi proposto por Wiktor e Jonkers (2011). A argamassa foi preparada em um misturador e de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Os CPs foram moldados em fôrma prismática de medidas 4 cm x 4 cm x 16 cm para posterior aplicação de esforço na flexão para abertura de fissuras. Foram realizadas três moldagens, em datas diferentes, onde foram

moldados 3 CPs prismáticos para cada tratamento e 2 CPs de referência (sem adição de microrganismo), como mostra o esquema da Figura 01.

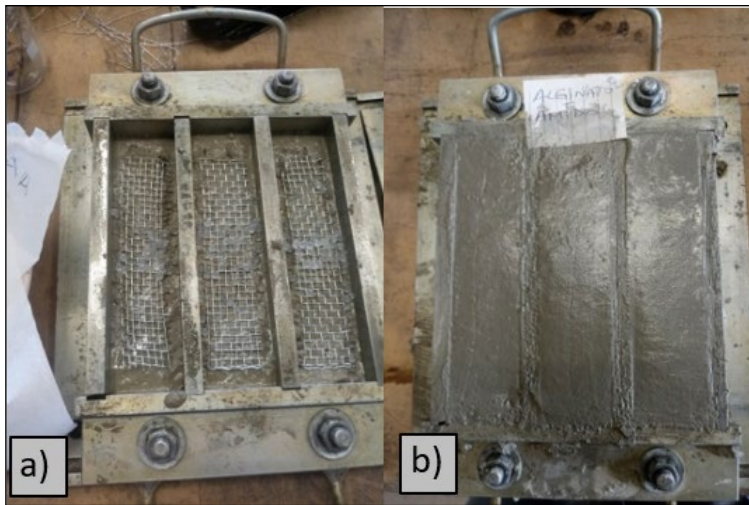
Figura 01 – Quantidade de CPs moldados e os tratamentos realizados em cada CP. a) CPs prismáticos com microrganismo; b) CPs prismáticos de referência.



Fonte: Do autor, 2020.

As cápsulas com o microrganismo foram adicionadas à argamassa já nas fôrmas, entre as duas camadas de adensamento (Figura 02). Os CPs foram para a câmara úmida - a uma temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ e umidade acima de 95% - por dois dias até serem desformados e permaneceram mais cinco dias na câmara úmida para que ocorresse a cura do concreto.

Figura 02 – Corpos de prova moldados: a) primeira camada de argamassa já adensada, com a tela e as cápsulas; b) corpos de prova de referência recém moldados.



Fonte: Do autor, 2020.

3.4 Indução das fissuras e acompanhamento da cicatrização

Para auxiliar na indução das fissuras nos CPs prismáticos foi colocada uma tela com trama de $0,5 \times 0,5$ cm em cima da primeira camada de argamassa já adensada em todos os CPs prismáticos. Após os sete dias de cura foram separados dois CPs prismáticos de cada tratamento e os dois CPs de referência para aplicação de carga e indução das fissuras em prensa hidráulica (Figura 03). Um CP prismático de cada tratamento foi armazenado em câmara úmida por 100 dias para verificação da resistência das cápsulas dentro dos CPs.

Figura 03 – CP prismático em ensaio de resistência à tração em prensa hidráulica.



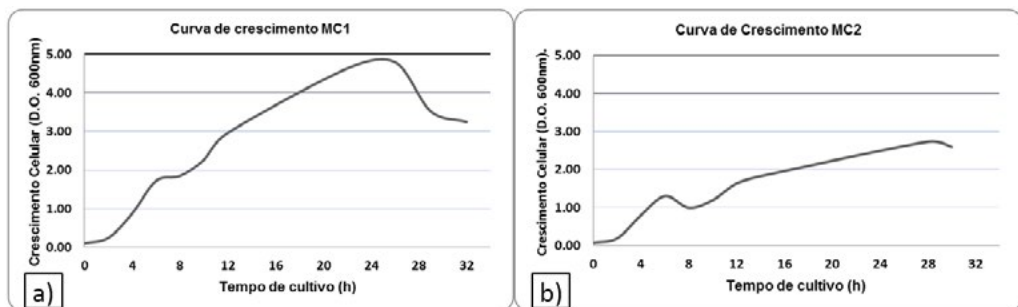
Fonte: Do autor, 2020.

4. Análise de dados

4.1 Meio de cultura e curva de crescimento microbiano

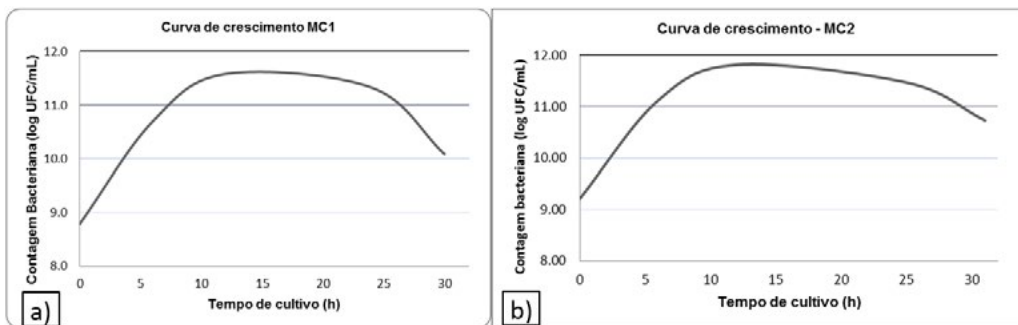
Após comparação dos resultados e das curvas de crescimento microbiano (Gráficos 1 e 2), não foi encontrada diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os dois meios de cultura. O MC1 foi escolhido em função da peptona ser um material com custo mais baixo que a triptona. Entre os estudos de referência em que essa composição de meio também foi utilizada, embora a curva de crescimento não tenha sido apresentada e outros microrganismos tenham sido utilizados, os autores relatam a ocorrência do crescimento microbiano de forma positiva (PRADEEPKUMAR, 2015; NUGROHO, SATYARNO e SUBYAKTO, 2015). Vieira (2017) utilizou o *B. subtilis* ATCC6633 e, embora a autora tenha utilizado um meio de cultura com outros componentes além dos utilizados neste trabalho, os resultados encontrados para o tempo ótimo de crescimento foram os mesmos (24 h).

Gráfico 01 - Curvas de crescimento do microrganismo em densidade ótica (DO). a) Curva de crescimento em Meio de cultura 1; b) Curva de crescimento em Meio de cultura 2.



Fonte: Do autor, 2020.

Gráfico 02 – Curvas de crescimento por log UFC/mL. a) Curva de crescimento em Meio de cultura 1; b) Curva de crescimento em Meio de cultura 2.

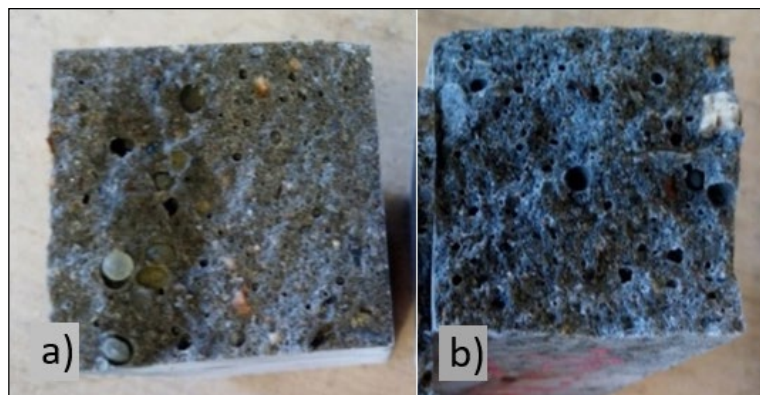


Fonte: Do autor, 2020.

4.2 Material de parede das cápsulas

Em testes prévios foram preparadas cápsulas sem microrganismo e adicionadas aos CPs prismáticos no mesmo procedimento mencionado anteriormente, onde dois CPs foram armazenados em câmara úmida e dois CPs ficaram ao ar livre. Após sete dias foi aplicada carga e os CPs foram partidos ao meio para verificação visual. Como mostra a Figura 04, as cápsulas se mantiveram intactas apenas nos CPs que foram armazenados em câmara úmida, indicando que a umidade das cápsulas foi consumida pela argamassa nos CPs que ficaram ao ar livre.

Figura 04 – Teste de durabilidade das cápsulas dentro dos CPs de argamassa. a) CP armazenado em câmara úmida com cápsula sobrevivente aos sete dias; b) CP armazenado ao ar livre sem cápsulas sobreviventes aos sete dias



Fonte: Do autor, 2020.

Com os resultados obtidos optou-se por armazenar os CPs moldados para o trabalho em câmara úmida até seu rompimento. Para fins de comparação apenas um estudo (WANG et al., 2015) utilizou alginato como material de parede e utilizou o mesmo modificado e sob outra técnica de encapsulamento. Os autores fizeram a síntese do alginato, adicionando à mistura anidrido metacrílico e hidróxido de sódio, obtendo assim uma folha de alginato modificado. A esse procedimento adicionaram esporos de microrganismo. Ainda assim, a viabilidade do alginato como agente encapsulante já havia sido mencionada pelos autores e foi comprovada neste estudo.

4.3 Cicatrização das fissuras

A indução das fissuras foi realizada aos sete dias, quando foram realizadas imagens por microscópio, como mencionado anteriormente.

Por análise visual, após 42 dias foi possível observar os primeiros sinais de cicatrização nos CPs mergulhados na ureia e com o microrganismo encapsulado (Figura 05). Ao final do período observou-se a cicatrização tanto das fissuras mergulhadas em água com ureia como daquelas mergulhadas apenas em água. Os CPs de referência, bem como os CPs com microrganismo livre, não apresentaram cicatrização visível a olho nu neste período, apenas foi possível detectar a redução das fissuras nestes por meio de observação em microscópio metalográfico.

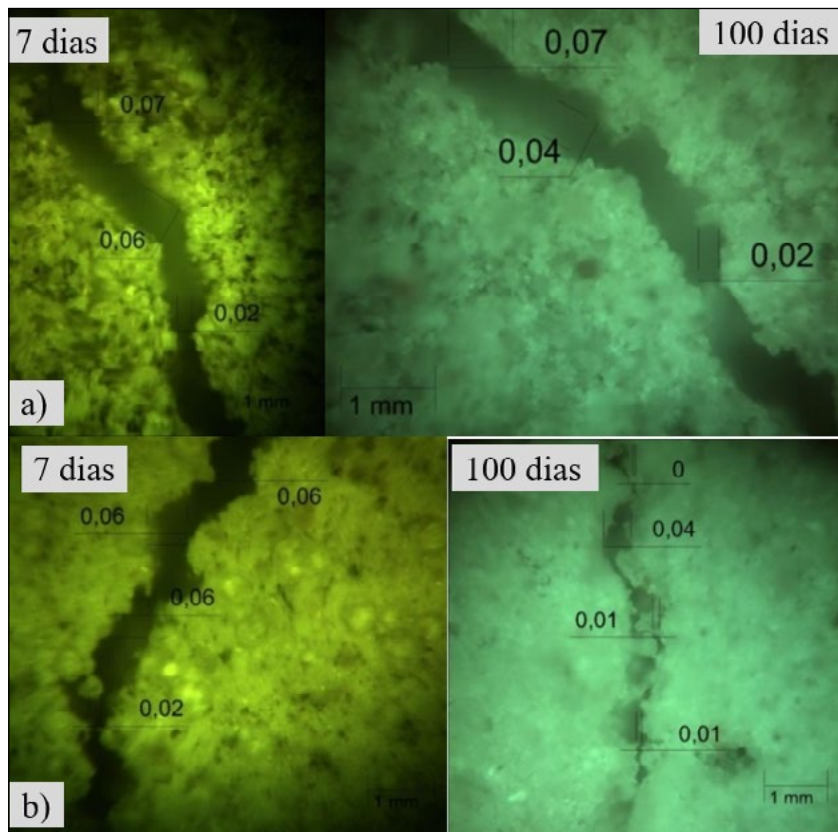
Figura 05 – Cicatrização de fissura aos 42 dias



Fonte: Do autor, 2020.

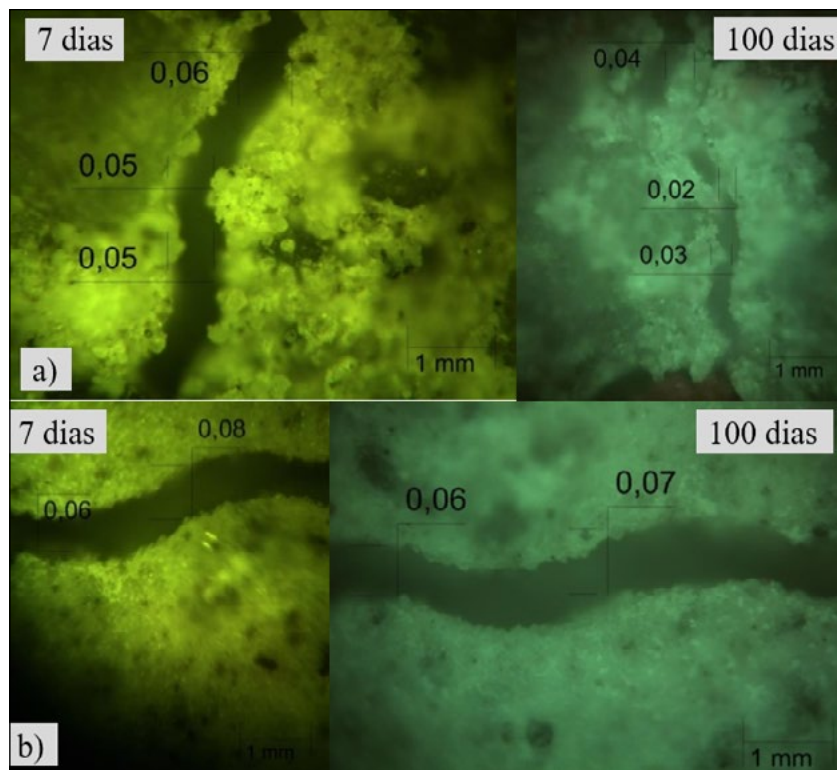
Após cem dias as imagens foram realizadas novamente em microscópio para verificar se houve formação de cristais. As Figuras 06 a 09 mostram a medição da fissura dos CPs aos sete e aos 100 dias com ampliação de 20 x, e compara os resultados dos CPs mergulhados na ureia e na água durante o período.

Figura 06 – Medição de fissuras aos sete e aos cem dias no CP com cápsula de alginato. a) CP mergulhado na ureia; b) CP mergulhado na água.



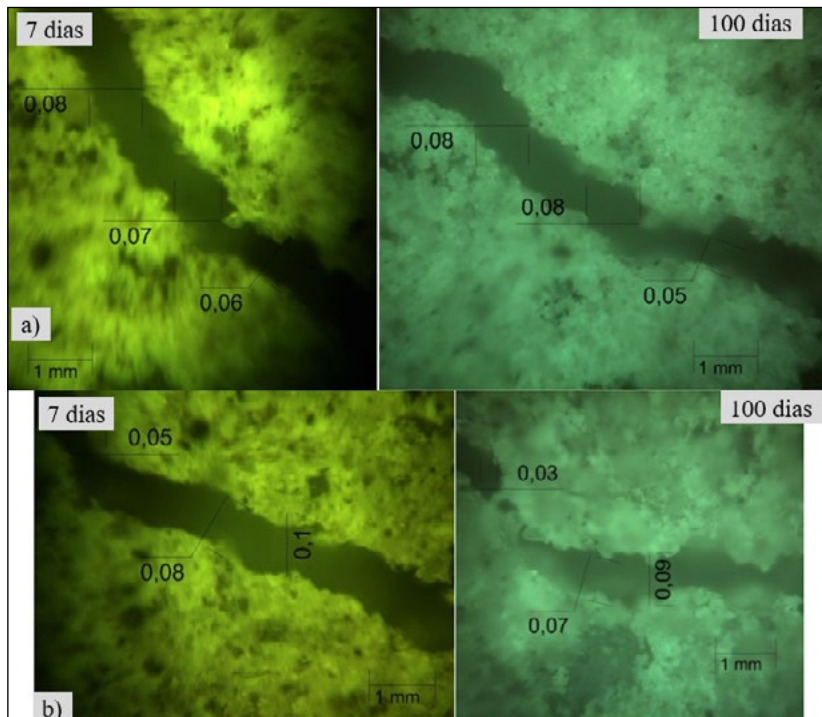
Fonte: Do autor, 2020.

Figura 07 – Medição de fissuras aos sete e aos cem dias no CP com cápsula de alginato combinado com amido. a) CP mergulhado na ureia; b) CP mergulhado na água.



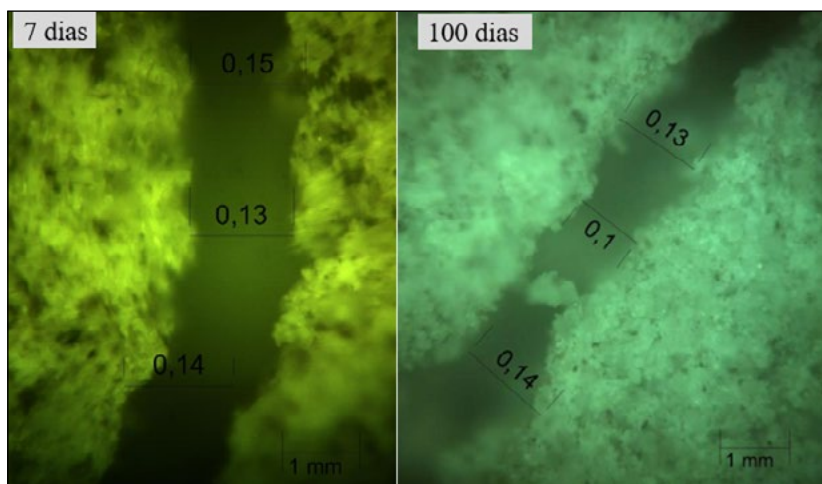
Fonte: Do autor, 2020.

Figura 08 – Medição de fissuras aos sete e aos cem dias no CP com microrganismo livre. a) CP mergulhado na ureia; b) CP mergulhado na água.



Fonte: Do autor, 2020.

Figura 09 – Medição de fissuras aos sete e aos cem dias no CP de referência mergulhado na água.



Fonte: Do autor, 2020.

Através das imagens é possível verificar que as fissuras dos CPs que continham o microrganismo encapsulado tiveram uma maior precipitação de cristais em comparação com aqueles que continham o microrganismo livre ou os CPs de referência. O resultado obtido vai de encontro ao que Wiktor e Jonkers (2011) mencionaram em seu trabalho, onde observaram que ao adicionar esporos de microrganismo diretamente na mistura este teve sua atividade reduzida. Vieira (2017) utilizou o mesmo microrganismo e um meio de cultura similar, porém utilizou aplicação externa, onde borrifou o cultivo microbiano na superfície dos CPs. Nos resultados a autora menciona a ocorrência da formação de cristais de calcita, comprovados por imagens em microscópio eletrônico de varredura.

Não foi observada diferença relevante entre os CPs mergulhados em água ou mergulhados em água com ureia no final do período. Porém, as fissuras mergulhadas em água com ureia apresentaram uma cicatrização mais rápida, como constatado por avaliação visual no decorrer do período. Vieira (2017) menciona a ureia como um facilitador e os resultados encontrados comprovaram.

A Tabela 03 mostra a média de valores em milímetros (mm) da cicatrização das fissuras no final do período.

Tabela 03 – Média de cicatrização das fissuras aos 100 dias

Tratamento	Cicatrização média (mm)	Desvio Padrão
Cápsula de alginato (mergulhado na água com ureia)	0,02	0,01
Cápsula de alginato (mergulhado na água)	0,04	0,025
Capsula de alginato com amido (mergulhado na água com ureia)	0,02	0,01
Cápsula de alginato com amido (mergulhado na água)	0,01	0,005
Microrganismo livre (mergulhado na água com ureia)	0,01	0,005
Microrganismo livre (mergulhado na água)	0,01	0,005
Referência (mergulhado na água)	0,01	0,005

Ao final do período os CPs que ficaram armazenados em câmara úmida foram rompidos para observação de resistência das cápsulas. A Figura 10 mostra que as cápsulas foram preservadas.

Figura 10 – Presença de cápsulas no interior dos CPs aos 100 dias.



6. Resultados alcançados

Com base nos objetivos elencados os resultados alcançados foram:

- A composição do meio de cultura contendo extrato de levedura, cloreto de sódio e peptona mostrou-se adequada para o crescimento do *B. subtilis* ATCC6633.
- As composições escolhidas como material de parede para as cápsulas que envolveram o microrganismo demonstraram boa resistência e durabilidade quando adicionadas aos CPs de argamassa e mantidas em condições adequadas de umidade.
- Ao comparar a cicatrização das fissuras nos CPs que continham o microrganismo encapsulado com os CPs onde o mesmo foi adicionado de forma livre, é possível perceber que no primeiro a cicatrização ocorreu de forma mais expressiva, enquanto no outro houve pouca formação de cristais nas fissuras. Entre os CPs onde o microrganismo foi adicionado encapsulado foi possível concluir que a ureia acelera o processo de precipitação da calcita pelo microrganismo.

Ao término do trabalho conclui-se que os corpos de prova contendo microrganismo encapsulado tiveram uma maior cicatrização das fissuras se

comparados com aqueles onde o microrganismo foi adicionado livre e com os corpos de prova de referência.

Embora as cápsulas tenham se mantido viáveis durante o período de cem dias, isso ocorreu em função de estarem em câmara úmida ou mergulhadas na água durante este período. Em condições de ausência de umidade isso não teria ocorrido, como mostrou o teste prévio de sete dias. Em função disso sugere-se a realização de testes com outros materiais encapsulantes ou outros métodos de encapsulamento, que mantenham o microrganismo protegido e vivo durante o período.

O acompanhamento visual da cicatrização das fissuras mostrou resultados relevantes, que foram comprovados por análise em microscópio. Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização de outro mecanismo para obtenção das imagens, onde seja possível registrar a fissura por completo e não apenas uma parte dela. Verificou-se que em algumas amostras a cicatrização total ocorreu em partes da fissura que não haviam sido registradas aos sete dias.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland** – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BASHIR et al. Bio Concrete - The Self-Healing Concrete. **Indian Journal of Science and Technology**, Punjab, Índia, v. 9, n. 47, p 1-5, December 2016. Disponível em: <<http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/105252/76393>> Acesso em 20 mai 2018.

BERTON, A. Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts. **Materials and Structures**. Netherlands, v. 47, n 11; p. 1787-1806, Nov 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617%2Fs11527-014-0433-1>> Acesso em: 20 mai 2018.

JONKERS, Henk M, SCHLANGEN, E. **Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach**. Fracture mechanics of concrete and concrete structures, Catania, Italy, v. 17, n. 22; p: 1821–1826, June 2007. Disponível em: <<http://framcos.org/FraMCoS-6/164.pdf>> Acesso em 13 mai 2018.

MAURY, Maria B.; BLUMENSCHNEIN, Raquel N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate** - Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun 2012. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12110/1/ARTIGO_ProducaoCimentoImpacto.pdf> Acesso em: 14 mai. 2018.

MAZER, Wellington. **Patologia, Recuperação e Reforço De Estruturas De Concreto**, 2008. Notas de aula. Curso De Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Curitiba – PR. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/wmazer/>>

patologia-das-construcoes/Notas_de_Aula_Ensaio.pdf/at_download/file> Acesso em: 20 de mai 2018.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo. IBRACON, 2014

NUGROHO, Ananto; SATYARNO, Iman; SUBYAKTO, Subyakto. Bacteria as Self-Healing Agent in Mortar Cracks. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 47, n. 3, p. 279-295, jul. 2015. Disponível em: <<http://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/353>>. Acesso em: 25 Mar. 2018.

PRADEEDKUMAR, A et al. An Experimental Work on Concrete by Adding *Bacillus Subtilis*. **International Journal of Emerging Technologies and Engineering**, Índia, v. 2, n. 4, April 2015. Disponível em: <<http://www.ijete.org/wp-content/uploads/2015/04/140251.pdf>> Acesso em: 14 mai. 2018.

THIVYA J., CHANDRASEKAREN M. Experimental Study On The Behavior Of Self Healing Concrete By Using *Bacillus Subtilis*. **International Journal of Advanced Engineering Research and Technology**, Índia, v. 4, n. 4, p. 138-142, April 2016. Disponível em: <<http://www.ijaert.org/wp-content/uploads/2016/04/150108.pdf>> Acesso em: 14 mai. 2018.

TITTELBOOM, Kim V, DE BIELE, N. Self-Healing in Cementitious Materials — A Review. **Materials**, Bélgica, v. 6, p. 2182-2217, 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/6/6/2182>> Acesso em 13 mai. 2018

VIEIRA, Juliana Aparecida. **Biodeposição De CaCO₃ em Materiais Cimentícios**: Contribuição ao estudo da biomineralização induzida por *Bacillus subtilis*. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/170983/001051690.pdf?sequence=1>> Acesso em: 13 mai. 2018.

WANG et al. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. **Frontiers in Microbiology**. v. 6, p. 1-14, Oct. 2015. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2015.01088/full>> Acesso em: 20 mai 2018

WIKTOR, Virginie; JONKERS, Henk M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, Delft, Holanda, v.33, Issue 7, p. 763-770, August 2011. Disponível em: <<https://sci-hub.tw/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>> Acesso em: 13 mai. 2018.