



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MARIANA BALVEDI ZAKRZEWSKI

**PROPRIEDADES E AUTOCICATRIZAÇÃO DO BIOCONCRETO POR MEIO DA
INCORPORAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *Bacillus subtilis*
ENCAPSULADAS EM ARGILA EXPANDIDA**

ERECHIM

2022

MARIANA BALVEDI ZAKRZEVSKI

**PROPRIEDADES E AUTOCICATRIZAÇÃO DO BIOCONCRETO POR MEIO DA
INCORPORAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *Bacillus subtilis*
ENCAPSULADAS EM ARGILA EXPANDIDA**

Projeto apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Erechim.

Orientador: Dr.º Eduardo Pavan Korf

Coorientadora: MSc. Suelen Cristina Vanzetto

ERECHIM

2022

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Zakrzewski, Mariana Balvedi
PROPRIEDADES E AUTOCICATRIZAÇÃO DO BIOCONCRETO POR
MEIO DA INCORPORAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *Bacillus*
subtilis ENCAPSULADAS EM ARGILA EXPANDIDA / Mariana
Balvedi Zakrzewski. -- 2022.
44 f.

Orientador: Doutor Eduardo Pavan Korf
Co-orientadora: Mestra Suelen Cristina Vanzetto
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim, RS, 2022.

1. Bioconcreto. 2. Concreto autocicatrizante. 3.
Bacillus subtilis. I. , Eduardo Pavan Korf, orient. II.
, Suelen Cristina Vanzetto, co-orient. III. Universidade
Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

MARIANA BALVEDI ZAKRZEVSKI

**PROPRIEDADES E AUTOCICATRIZAÇÃO DO BIOCONCRETO POR MEIO DA
INCORPORAÇÃO DE BACTÉRIAS DO GÊNERO *Bacillus subtilis*
ENCAPSULADAS EM ARGILA EXPANDIDA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e
Sanitária da Universidade Federal da Fronteira
Sul.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

07/04/2022

BANCA EXAMINADORA



EDUARDO PAVAN KORF
CPF nº 00341745081

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf
Orientador



Msc. Giovanni Jordi Bruschi

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)



Prof. Dr. Helen Treichel

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)

RESUMO

As fissuras são uma patologia muito recorrente e estão presentes em grande parte das edificações, na maioria delas sem interferências estruturais, porém devem ser remediadas da forma correta para evitar o surgimento de problemas secundários. A necessidade de manutenção periódica para o tratamento dessas fissuras acaba se tornando custosa e utiliza produtos que podem vir a agredir o meio ambiente, tanto em sua produção, utilização e descarte. A alternativa estudada para a redução da necessidade de intervenções externas na estrutura é a utilização do bioconcreto. O bioconcreto consiste na inserção de cápsulas contendo bactérias, no caso escolhido *Bacillus subtilis*, que no momento do rompimento pelo surgimento de fissuras e contato com a água gera carbonato de cálcio, material cimentante que irá fazer o processo de preenchimento de fissuras. O estudo foi realizado com o intuito da identificação da eficiência do uso de *Bacillus subtilis* na produção de bioconcreto para a autocicatrização de fissuras e incremento nas propriedades mecânicas do concreto. Na primeira etapa da pesquisa foram realizados estudos de revisão bibliográfica e caracterização dos materiais utilizados para a produção do concreto, sendo eles cimento CPV-ARI, areia média, brita 1 e argila expandida 1506, obtendo as informações necessárias para o desenvolvimento dos traços de concreto. Posteriormente, os corpos de prova foram moldados em três diferentes traços de concreto, sendo eles o traço referência, traço com argila expandida e, por fim, adição de argila expandida com bactérias encapsuladas. As amostras confeccionadas foram pré-fissuradas com 70% de sua resistência à compressão aos 7 dias após a concretagem e passaram pelo processo de cura em ciclos por 90 dias. Ao final desse período foram analisadas a cicatrização das fissuras de forma visual, resistência à compressão, módulo de elasticidade e difratometria de raios-x. Com os resultados analisados foi possível concluir que a utilização das bactérias para a produção de concretos é eficiente para a cicatrização de fissuras e incremento nas propriedades mecânicas do concreto.

Palavras-chave: Bioconcreto, concreto autocicatrizante, *Bacillus subtilis*

ABSTRACT

Cracks are a very recurrent pathology, and are present in most of the buildings, usually without structural interference, but they must be remedied correctly to avoid the emergence of secondary problems. The need for periodic maintenance to treat these cracks ends up becoming expensive and uses products that can harm the environment during their production, use and disposal. The alternative studied to reduce the need for external interventions in the structure is the use of bioconcrete. The bioconcrete consists of inserting capsules containing bacteria, in this case, *Bacillus subtilis*, which at the moment of rupture due to the appearance of fissures and contact with water generates calcium carbonate, a cementing material that will fill the cracks. The study was carried out with the aim of identifying the efficiency of the use of *Bacillus subtilis* in the production of bioconcrete for the self-healing of cracks and increase in the mechanical properties of concrete. In the first stage of the research, studies of literature review and characterization of the materials used for the production of concrete were carried out, being CPV-ARI cement, medium sand, gravel 1 and expanded clay 1506, obtaining the necessary information for the development of concrete traces. Subsequently, the specimens were molded in three different concrete mixes, being the reference mix, expanded clay mix and, finally, the addition of expanded clay with encapsulated bacteria. The samples made were pre-cracked with 70% of their compressive strength at 7 days after concreting and went through the curing process in cycles for 90 days. At the end of this period, fissure healing, compressive strength, elastic modulus and x-ray diffractometry were analyzed. With the analyzed results, it was possible to conclude that the use of bacteria for the production of concrete is efficient for the healing of cracks and increase in the mechanical properties of concrete.

Key-words: Bioconcrete, self-healing concrete, *Bacillus subtilis*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Formas de cicatrização de fissuras em concreto de forma autógena.....	16
Figura 2 - <i>Bacillus subtilis</i>	19
Figura 3 - Cicatrização de fissuras com bactérias e meio de cultivo.....	21
Figura 4 - Identificação de selagem de fissuras ao longo de seis dias.....	22
Figura 5 - Fluxograma de procedimentos metodológicos a serem realizados ao longo da pesquisa.....	23
Figura 6- Curva granulométrica areia média.....	24
Figura 7-Curva granulométrica da Brita 1.....	26
Figura 8- Curva granulométrica da Argila expandida.....	27
Figura 9 - Argilas expandidas submersas em meio de cultivo com bactérias.....	30
Figura 10 - Corpos de prova concretados.....	31
Figura 11 - Forma de medição ensaio Slump test.....	33
Figura 12 - Comparativo entre resistências à compressão aos 7 dias.....	35
Figura 13 - Resistência à compressão aos 90 dias.....	36
Figura 14 - Módulo de elasticidade do concreto aos 90 dias.....	37
Figura 15 - Identificação da formação de Carbonato de cálcio e selagem da fissura em microscópio com 200x de aumento.....	38
Figura 16 - Resultado de análise de difração de raio-x.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultado da caracterização da Areia média.....	25
Tabela 2- Resultados da caracterização da brita 1.....	26
Tabela 3 - Resultados da caracterização da Argila expandida.....	27
Tabela 4 - Caracterização mecânica do cimento segundo o fabricante.....	28
Tabela 5 - Caracterização química do cimento segundo o fabricante.....	28
Tabela 6 - Caracterização física do cimento.....	29
Tabela 7 - Moldagens de corpos de prova, traços e avaliações realizadas.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
NBR	Norma Técnica Brasileira
NM	Norma MERCOSUL
CP's	Corpos de Prova

LISTA DE SÍMBOLOS

cm^3	Centímetro cúbico
g	Gramas
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
ml	Mililitro
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
Ca(OH)_2	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
Ca^{+2}	Cálcio
$\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$	Lactato de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio (Calcita)
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_3^{-2}	Carbonato
H^+	Hidrogênio
H_2CO_3	Ácido Carbônico
H_2O	Água
HCO_3	Bicarbonato
NH_2COOH	Ácido Carbônico
NH_3	Hidróxido de amônia
NH_4^+	Amônio
O_2	Oxigênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1	O CONCRETO.....	14
3.1.1	Patologias no concreto.....	15
3.2	AUTOCICATRIZAÇÃO.....	16
3.2.1	Autocicatrização autógena.....	16
3.2.2	Autocicatrização autônoma.....	17
3.3	BIOCONCRETO.....	17
3.3.1	Escolha das bactérias e encapsulamento.....	19
3.4	ESTADO DA ARTE.....	21
4	METODOLOGIA.....	23
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	23
1.1.1	Areia média.....	24
1.1.2	Brita 1.....	25
1.1.3	Argila expandida.....	26
1.1.1.1	Cimento CP V-ARI.....	27
4.2	PREPARO DOS MATERIAIS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	29
4.2.1	Encapsulamento das bactérias.....	29
4.2.2	Moldagem dos corpos de prova.....	30
4.3	SLUPM TEST.....	32
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	33
4.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	33
4.6	DIFRATOMETRIA DE RAIO-X.....	34
5	RESULTADOS.....	35
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	35
5.2	MODULO DE ELASTICIDADE.....	37
5.3	ANÁLISE VISUAL DE RECUPERAÇÃO DE FISSURAS.....	38
5.4	DIFRATOMETRIA DE RAIO - X.....	39
6	CONCLUSÃO.....	40
7	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A fissuração do concreto é a principal porta de entrada para agentes agressivos e água para dentro da estrutura. A falta de qualidade na execução, dos materiais, problemas no projeto, e até a ação do tempo podem vir a causar patologias, que estão presentes em grande parte das edificações. Fissuras são consideradas a patologia mais comum nas edificações e são o principal caminho para a entrada de agentes agressivos nas estruturas de concreto.

De forma a evitar a necessidade de manutenções corretivas, o foco das pesquisas na atualidade deve ser o desenvolvimento de um concreto que corrija suas próprias imperfeições, diminuindo os impactos ambientais gerados pela produção e utilização de produtos industrializados.

O concreto possui um processo de cicatrização natural que se dá por meio do preenchimento dos espaços das fissuras com produtos da hidratação das porções anidras de cimento Portland remanescentes no concreto (EUZÉBIO *et al.* 2017).

Os bioconcretos são concretos que possuem em sua formulação um agente biológico capaz de induzir a formação de carbonato de cálcio nos espaços vazios. As bactérias inseridas são encapsuladas a fim de que quando surgirem fissuras, entrando em contato com água, essas bactérias comecem a agir de forma a fechar as aberturas geradas (VIEIRA, 2017).

Apesar de diversos estudos na literatura sobre cicatrização do concreto, são escassos os referentes à autocicatrização de fissuras com o uso de bactérias do gênero *Bacillus*, as quais são facilmente encontradas no ambiente, e quando encapsuladas em argila expandida, podem manter-se vivas durante décadas na matriz do concreto. Dentre os estudos existentes pode-se citar Manica (2019), que avaliou a capacidade de autocicatrização de corpos de prova de argamassa utilizando *Bacillus subtilis*, onde a bactéria foi encapsulada por uma metodologia diferente, em paredes de alginato de sódio combinado com amido. Os resultados encontrados pela autora comprovaram a eficiência da utilização de bactérias inseridas no concreto, e a importância da utilização de capsulas para manter a atividade do microorganismo.

Assim, este trabalho avaliou os efeitos da introdução de bactérias *Bacillus subtilis* em bioconcretos por meio do encapsulamento em argila expandida e o processo de cicatrização de fissuras.

2 OBJETIVOS

Analisar a eficácia da incorporação de bactérias *Bacillus subtilis* na produção de bioconcretos por meio de encapsulamento por absorção em argila expandida, a fim de verificar o preenchimento de fissuras através da produção de carbonato de cálcio.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar visualmente o processo de cicatrização dos concretos fissurados produzidos com *Bacillus Subtilis* com o auxílio de lupa estereoscópica.
- Avaliar o desempenho mecânico dos bioconcretos produzidos, através da resistência à compressão simples, e módulo de elasticidade.
- Identificar a formação de carbonato de cálcio a partir dos ensaios de Difractometria de Raios-X (DRX).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O CONCRETO

O concreto armado é um processo construtivo inventado na Europa em meados do século XIX. Este processo foi bastante difundido, pois possibilitou grandes construções, vencendo grandes vãos e alcançando alturas nunca antes imaginadas. O concreto, por ser um material moldável e poder assumir os mais vários formatos, começou a ser usado em larga escala (GONÇALVES, 2015).

No mercado, existem diversos tipos de concreto como o concreto simples, armado, protendido, usinado e outros. Dentre estes, o concreto armado se destaca pela sua grande aplicabilidade, sendo o mais utilizado em todo o mundo (DA SILVA GATO, 2021).

Convencionalmente o concreto é composto por quatro elementos básicos, sendo eles o cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. O cimento é um composto seco, pulverulento que, ao receber adição de água, desenvolve propriedades aglomerantes como resultado das reações químicas que ocorrem nessa mistura, também chamadas de reações de hidratação (MANICA, 2019).

Cerca de 70 % da sua composição do concreto é constituída pelos agregados. A principal aplicação dos agregados, seja a areia ou a pedra, na fabricação do concreto é de natureza econômica, tendo em vista tratarem-se materiais de baixo custo unitário, inferior ao do cimento (GONÇALVES, 2015).

O concreto possui uma microestrutura altamente complexa e heterogênea. Assim, há uma grande dificuldade em se elaborar modelos realistas para sua estrutura microscópica. Entretanto, o conhecimento da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto e de sua relação auxilia no controle das suas propriedades (EUZÉBIO *et al.*, 2017).

Para aumentar a sustentabilidade das construções, estão sendo pesquisadas formas de reduzir o impacto causado pelo uso do concreto, como é o caso da obtenção de maiores resistências, substituição do clinker Portland por outros materiais cimentantes, e aumentar a durabilidade do concreto (GONSALVES, 2011).

O concreto deve manter a estabilidade química da solução intersticial e de mesmo modo, servir como barreira física contra a penetração de agentes agressivos a armadura (ABREU *et al.*, 2019).

3.1.1 Patologias no concreto

Patologias no concreto armado podem ser causadas por diversos fatores que incluem a fase de projeto, execução e utilização de uma estrutura.

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. (ABNT NBR 6118:2014).

A deterioração do concreto é iniciada, geralmente, por processos químicos, embora fatores físicos e mecânicos também possam estar envolvidos, em combinação ou não, com os processos químicos (GONÇALVES, 2015). Fissuras no concreto armado são consideradas a patologia mais comum, ocorrendo em grande parte das edificações, e são a principal porta de entrada para agentes agressivos no concreto.

A durabilidade das estruturas de concreto depende da facilidade que os fluidos têm em ingressar no concreto e circular em seu interior, fator determinado, entre outros aspectos, pela microfissuração do sistema. Portanto, a microfissuração é um fator que determina a durabilidade das estruturas (VENQUIARUTO, 2017).

As fissuras podem não comprometer seriamente a estrutura porém afetam a permeabilidade da mesma, podendo levar a problemas futuros. Já as rachaduras ou trincas (aberturas maiores de 0,6 mm) podem afetar seriamente a integridade da mesma e ocasionar danos sérios, sendo profundidade das mesmas proporcional às consequências (SALOMÃO, 2019).

De acordo com Achal *et al.* (2013), os reparos mais comuns de fissuras são feitos com a aplicação de polímeros sintéticos, materiais caros e possivelmente tóxicos. Além disso, não são sustentáveis, são suscetíveis a ação ultravioleta e se degradam com o tempo, necessitando manutenção periódica.

3.2 AUTOCICATRIZAÇÃO

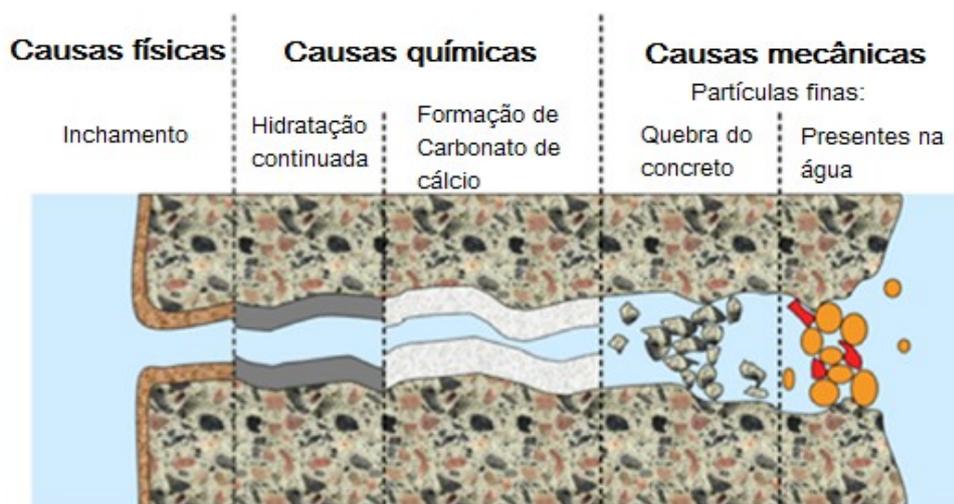
3.2.1 Autocicatrização autógena

De acordo com Moreira (2016), todo concreto possui um tipo de autocicatrização chamada cicatrização autógena, que consiste na selagem de fissuras sem a necessidade de incorporação de aditivos ao mesmo. A autocicatrização autógena do concreto é dependente do fluxo de água na estrutura, isto é a água que entre pelas fissuras expostas a atmosfera (RAJCZAKOWSKA, 2019).

Capellesso (2018) afirma que, a escolha do tipo de cimento que será utilizado tem grande influência na recuperação futura das fissuras. Tanto o C-S-H como o Ca(OH)_2 , serão base para os produtos formados na autocicatrização das fissuras por cicatrização autógena, tanto pela hidratação tardia, quanto pela carbonatação.

Existem quatro processos naturais capazes de selar fissuras, sendo eles a formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, bloqueio da fissura por impurezas presentes na água que irá infiltrar, hidratação tardia das partículas de cimento e expansão do cimento presente na matriz (TALAIEKHOZAN et al., 2014). Essas causas de fechamento das fissuras de forma autógena estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Formas de cicatrização de fissuras em concreto de forma autógena



Fonte: adaptado de AL-TABBAA apud ROOIJ (2013).

3.2.2 Autocicatrização autônoma

O objetivo da adoção de medidas que promovam os processos de auto cura é estender a vida útil de estruturas de concreto e de sistemas construtivos que utilizem materiais cimentícios (PETER et al., 2016).

A autocicatrização autônoma ou projetada se refere a matriz cimentícia desenvolvida com a finalidade de ter a propriedade autocicatrizantes, seja pela adição de elementos que reagem quimicamente com a matriz ou por elementos que reagem somente após a ocorrência do dano pela liberação de um produto específico para este fim, ambos inseridos na matriz no momento da confecção (CAPELLESSO, 2018).

Para que ocorra a autocicatrização autônoma vários tipos de materiais podem ser adicionados ao concreto, como por exemplo, os polímeros superabsorventes (PSA), os aditivos redutores de permeabilidade ou as bactérias calcinogênicas (MOREIRA, 2016). O mecanismo mais utilizado é por ativação mecânica. A tensão, associada com a formação de fissuras levam a quebra das cápsulas que contém o material autorregenerante que o por consequência será liberado (RAJCZAKOWSKA, 2019).

3.3 BIOCONCRETO

Uma alternativa para um concreto autocicatrizante que diminuirá a necessidade de intervenções na estrutura, é a utilização de microrganismos para a produção do mesmo. O bioconcreto consiste em microrganismos adicionados ao concreto convencional, que por meio de processos metabólicos conseguem reduzir, e até mesmo selar totalmente, fissuras na matriz.

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

De acordo com Vijay *et al.* (2019), no momento em que ocorrem as fissuras, são ativadas as bactérias que se encontram em dormência, fazendo assim com que as mesmas precipitem carbonato de cálcio, que será o responsável pela cicatrização das mesmas.

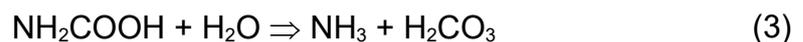
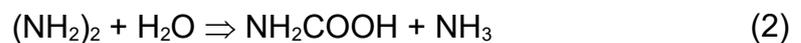
O mecanismo de formação de carbonato de cálcio por bactérias do gênero *Bacillus* se dá pela hidrólise enzimática da ureia e dióxido de carbono (JONKERS, 2011).

Os primeiros cristais produzidos na precipitação de carbonato de cálcio são amorfos e provavelmente hidratados. A precipitação, do carbonato de cálcio (CaCO_3) ocorre pela reação de equilíbrio apresentada na equação 1 abaixo:



A produção de CO_3^{-2} de bicarbonato em água (HCO_3^-) é altamente dependente do pH; o crescimento ocorre sob condições alcalinas (ponto no qual começa a atuar a bactéria). Em conclusão, a precipitação de carbonato de cálcio ocorre facilmente em ambientes alcalinos abundantes em cálcio (Ca^{+2}) e íons de carbonato (CO_3^{-2}) (GONZÁLEZ et al, 2014).

De acordo com Dhami (2014), durante a atividade da urease microbiana, 1 mol de ureia é hidrolisado intracelularmente a 1 mol de amônia e 1 mol de carbonato, como indicado na equação 2, que hidrolisa espontaneamente para formar 1 mol adicional de amônia e ácido carbônico (Equação 3) da seguinte maneira:



Esses produtos se equilibram na água para formar bicarbonato, 1 mol de hidróxido de amônio e hidróxido de sódio que aumentam. (Equações 4 e 5)



As possíveis reações bioquímicas em um meio CaCl_2 para precipitar CaCO_3 na superfície celular podem ser resumidas nas equações 6, 7 e 8 apresentadas abaixo:





Grande parte dos concretos autocicatrizantes requer que os esporos bacterianos sejam imobilizados, normalmente via encapsulamento antes de serem adicionados ao concreto (ALAZHARI et al. (2017).

Essas técnicas de imobilização oferecem várias vantagens para a remediação do concreto, uma vez que, as células encapsuladas mantêm sua atividade metabólica alta por mais tempo, e são protegidas das adversidades do ambiente (BANG, 2000).

3.3.1 Escolha das bactérias e encapsulamento

A escolha do microrganismo a ser utilizado no processo de biomineralização deve considerar que: (i) a bactéria deve ser resistente a ambientes alcalinos como o concreto, ou seja, deve pertencer ao grupo de microrganismos alcalinofílicos; (ii) deve ter capacidade de formar esporos e assim ser capaz de sobreviver a condições ambientais adversas e a ação mecânica sofrida durante o processo de produção de bioconcretos; e (iii) não deve pertencer ao grupo de microrganismos patogênicos que causem riscos à saúde das pessoas e do meio ambiente (JONKERS et al., 2010).

Os esporos de *Bacillus subtilis*, possuem a vantagem de oferecer propriedades de resistência única, uma vez que são capazes de sobreviver por longos períodos de tempo sob condições extremas de estresse, como alta temperatura, dessecação, ausência de nutrientes e exposição a solventes químicos (ALVES et al, 2018). Além disso é amplamente utilizado na produção de enzimas extracelulares em escala mundial. Possui atividade industrial devido as várias razões tais como, sua alta taxa de crescimento em ciclos curtos, estabilidade e segurança para o manuseio, já que é considerado não patogênico.

Figura 2 - *Bacillus subtilis*

Fonte: DA SILVA GATO *et al.* (2021).

De forma geral bactérias não possuem resistência suficiente para sobreviver em ambientes com pH elevado, variação de temperatura e condições de um concreto endurecido (LUO *et al.*, 2018). Por esse motivo, é optado por fazer o encapsulamento das bactérias, fazendo assim com que as mesmas mantenham a sua viabilidade durante grandes períodos de tempo.

O princípio fundamental da autocicatrização autônoma pelo encapsulamento é que, no momento em que fissuras se propagam na matriz cimentícia, ocorre a ruptura das capsulas e seu conteúdo é liberado nas fissuras, promovendo a cicatrização (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

O material geralmente apresenta estrutura esférica recoberta por uma membrana sólida ou sólida/líquida que apresente resistência, permeabilidade parcial e variação de diâmetro. O material escolhido para o revestimento pode ser projetado para liberar gradualmente o componente da cápsula (MENEZES *et al.*, 2013). Normalmente os materiais utilizados para o encapsulamento são agregados com grande absorção, porém podem ser criadas estruturas, como é o caso do alginato de sódio, utilizado no estudo realizado por Wang *et al.* (2015).

A imobilização de bactérias no estudo realizado por Jonkers (2011) foi feita com o uso de argila expandida, em substituição ao agregado graúdo do concreto. Segundo pesquisas já realizadas pelo mesmo autor, a adição dos microrganismos em capsulas prolonga substancialmente o tempo em que permanecerá viável no interior da matriz do concreto.

3.4 ESTADO DA ARTE

Um dos maiores pesquisadores na área de bioconcreto é Hendrik Marius Jonkers (2011), cientista da Universidade de Delft na Holanda. Em um dos seus estudos, Jonkers utilizou de bactérias *Bacillus pseudofirmus* e *cohnii* em solução de Lactato de cálcio imobilizadas em partículas de argila expandida para introdução ao concreto convencional, substituindo 50% dos agregados utilizados. Dessa maneira, os esporos bacterianos tem a sua vida prolongada.

Após mais duas semanas submersos foram analisadas as cicatrizações ocorridas nos corpos de prova de referência, a também com adição de bactérias. Observou-se que, apenas dois, dos seis corpos de prova de referência recuperaram suas fissuras, pelo meio de autocicatrização autógena, ou seja, sem adições. Já as amostras que possuíam adição de bactérias todas as seis amostras se mostraram completamente curadas. A Figura 3 mostram a cicatrização dos corpos de prova.

Figura 3 - Cicatrização de fissuras com bactérias e meio de cultivo



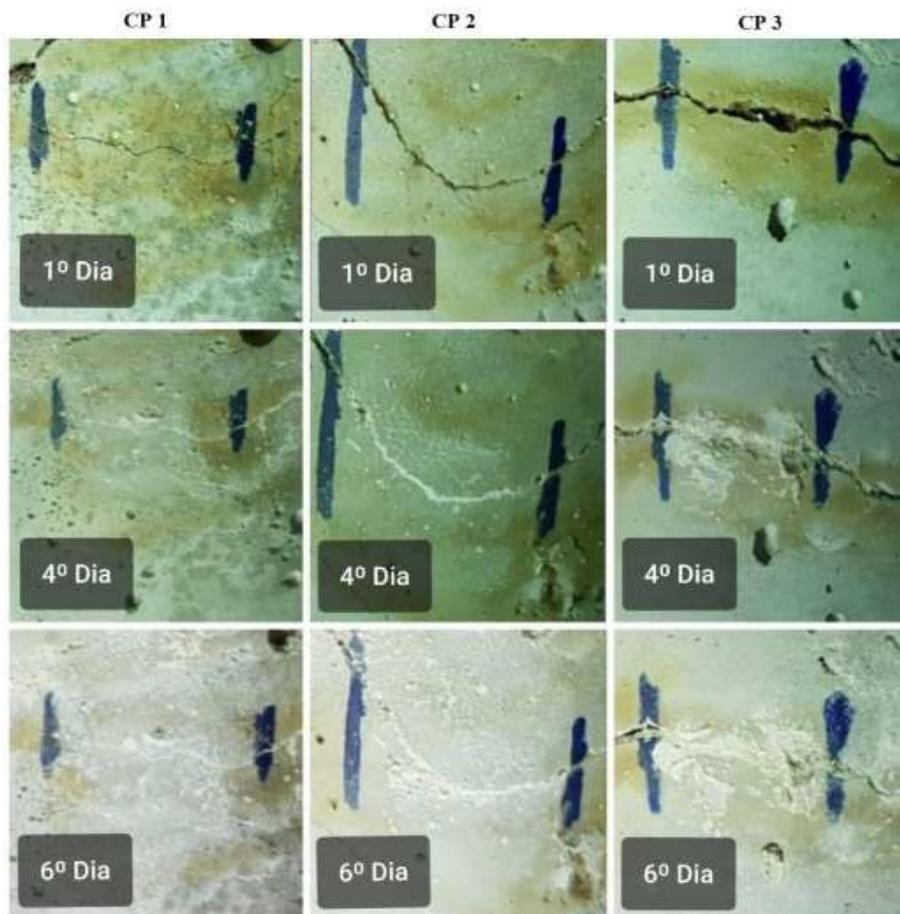
Fonte: JONKERS *et al* (2011).

Al-Tabbaa *et al* (2019), realizou o primeiro estudo para aplicação em campo de maior escala na Inglaterra, utilizando microcápsulas de silicato de sódio incorporadas no concreto. As análises tiveram duração de seis meses e foram feitas em paredes de concreto com adição de 8% de microcápsulas em relação ao volume de cimento, e fissuradas aos 35 dias de cura. Os resultados indicaram que o uso das

microcápsulas incorporadas ao concreto reduziu entre 20 e 58% a profundidade das fissuras em relação a condição inicial, e também houveram melhoras na permeabilidade e resistência à compressão.

O trabalho de Da Silva Gato *et al.* (2021) utilizou um processo de aplicação de uma solução de *Bacillus subtilis* após a geração de fissuras sem que houvesse qualquer tipo de micro-organismos inseridos na matriz do concreto. Neste caso foram analisados 3 CP's com fissuras com 0,1, 1 e 2 mm de espessura, nos quais foi aplicada a solução bacteriana, e permaneceram expostos ao ar por seis dias. Quatro dias após a aplicação das bactérias, já era possível a identificação visual da selagem das fissuras como é possível identificar na Figura 4. O subproduto gerado pelas bactérias passou por análise de espectroscopia, onde foi confirmada a presença de 97,8% de carbonato de cálcio.

Figura 4 - Identificação de selagem de fissuras ao longo de seis dias

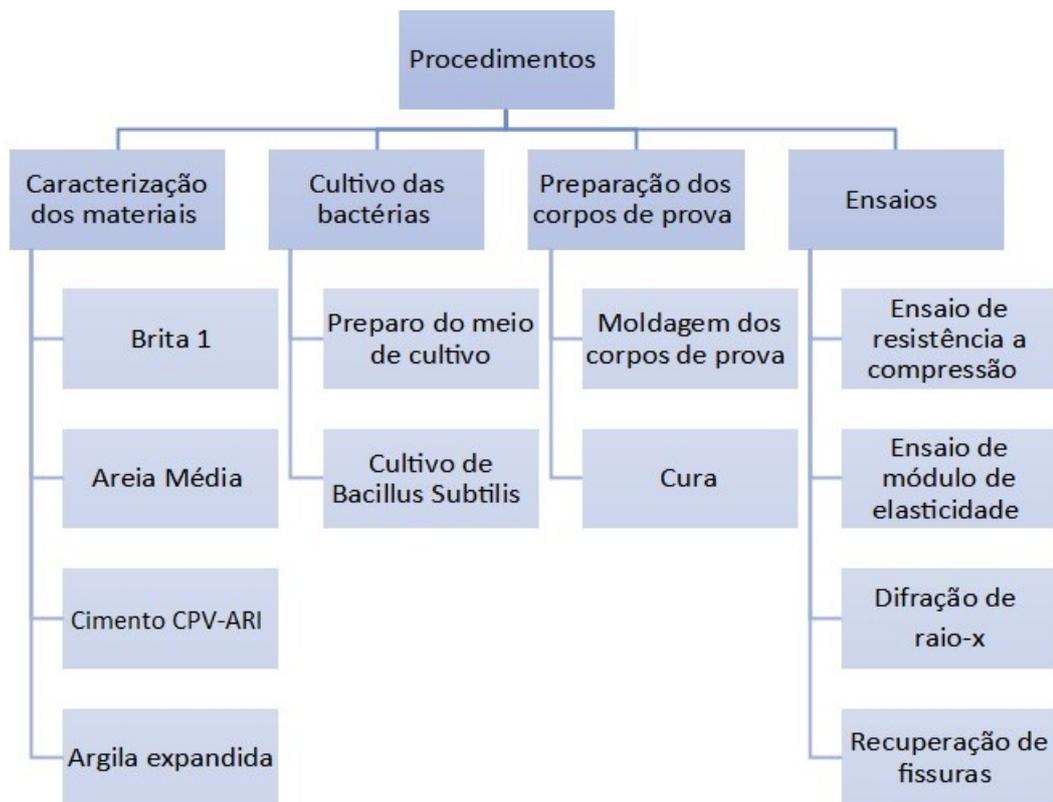


Fonte: DA SILVA GATO et al (2021).

4 METODOLOGIA

As atividades experimentais realizadas neste trabalho estão apresentadas no fluxograma correspondente a Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma de procedimentos metodológicos a serem realizados ao longo da pesquisa



Fonte: AUTORA, (2021).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção do concreto foram caracterizados em laboratório a fim de identificar suas propriedades, cada um deles seguindo suas respectivas normativas. Esses materiais são o cimento CPV-ARI, areia média, brita 1 e argila expandida e suas especificações estão descritas na NBR 7211 (ABNT, 2009).

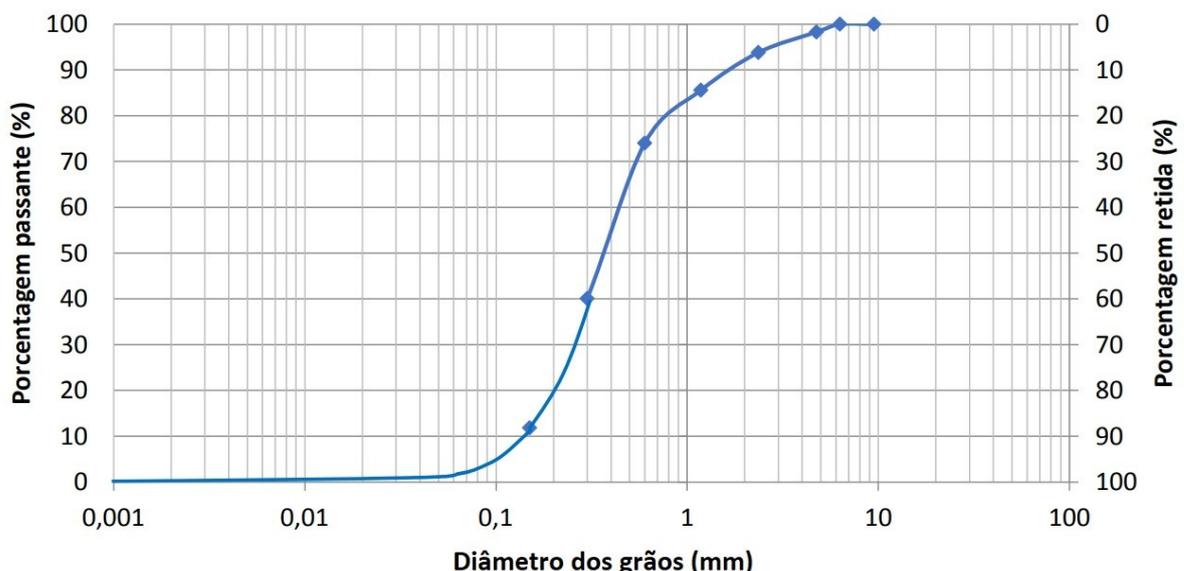
As características do cimento são disponibilizadas pelo fabricante, como é o caso da resistência à compressão, características físicas e químicas. Em laboratório foi realizada a determinação da massa específica e módulo de finura, os quais são realizados de acordo com a NBR NM 16605 (ABNT, 2017) e NBR NM 16973 (ABNT, 2021) respectivamente.

Para os agregados miúdo e graúdo, os ensaios realizados são os de granulometria, massa específica, massa unitária e absorção. Esses ensaios foram realizados de acordo com as normativas NBR NM 26 (ABNT, 2001), NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR NM 53 (ABNT, 2003). Estes ensaios compreendem aos materiais areia média, brita 1 e argila expandida.

1.1.1 Areia média

A caracterização dos agregados miúdos foi realizada, por meio de ensaios de granulometria para determinação do módulo de finura e distribuição granulométrica, como prevê a NBR NM 248 (2001). Juntamente com esses, foi determinada a massa específica e massa unitária, descritos pelas NBR NM 52 (2009) e NBR NM 45 (2009) respectivamente. Os resultados desses ensaios estão apresentados da Figura 6 e Tabela 1.

Figura 6- Curva granulométrica areia média



Fonte: AUTORA (2022).

Tabela 1- Resultado da caracterização da Areia média

Módulo de Finura	1,96
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,75
Massa Específica (g/cm ³)	2,55
Massa Unitária (g/cm ³)	1,54
Absorção de água (%)	1,84

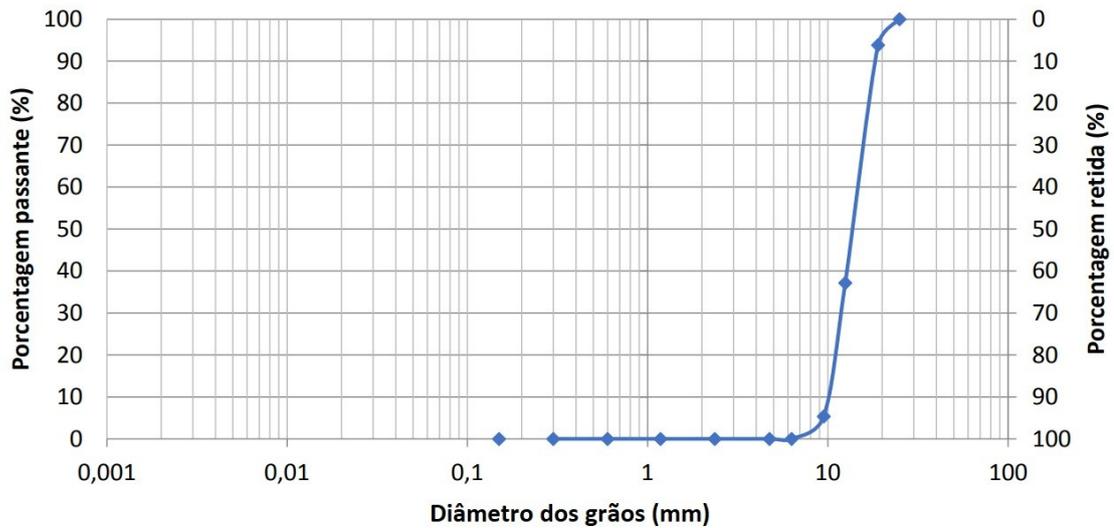
Fonte: ZAKRZEVSKI (2020).

O módulo de finura determinado granulometria apresentada na Tabela 1 foi de 1,96, classificado como zona utilizável inferior que varia de 1,55 a 2,20 como determina a NBR NM 248 (2003). Essa areia apresenta também granulometria contínua, que possui grãos de todos os tamanhos.

1.1.2 Brita 1

O agregado graúdo utilizado, a brita 1, passou pelo mesmo processo de caracterização que utilizado para a areia média em relação a granulometria, e utilizou-se o procedimento para determinação de massa específica e absorção de água de acordo com a norma NBR NM 53 (2009). A Figura 7 e Tabela 2 apresentam os resultados.

Figura 7-Curva granulométrica da Brita 1



Fonte: AUTORA (2022).

Tabela 2- Resultados da caracterização da brita 1

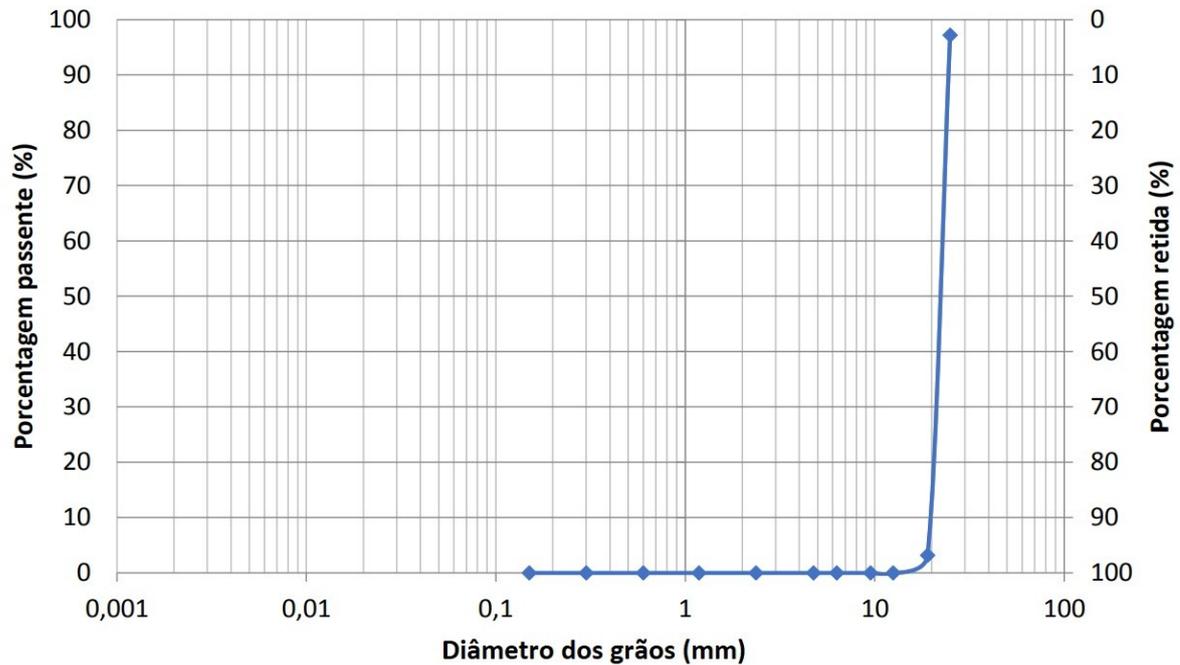
Módulo de Finura	6,58
Dimensão Máxima Característica (mm)	19,00
Massa Específica (g/cm ³)	2,92
Massa Unitária (g/cm ³)	1,60
Absorção de água (%)	0,78

Fonte: ZAKRZEVSKI (2020).

1.1.3 Argila expandida

O tipo de argila escolhida para a utilização neste concreto será do tipo 1506, que tem tamanho equivalente a brita 1, que fará um melhor preenchimento da matriz. A Figura 8 e Tabela 3 apresentam os resultados da análise granulométrica da argila expandida.

Figura 8- Curva granulométrica da Argila expandida



Fonte: AUTORA (2022).

Tabela 3 - Resultados da caracterização da Argila expandida

Módulo de Finura	1,96
Dimensão Máxima Característica (mm)	25
Massa Específica (g/cm ³)	1,22
Massa Unitária (g/cm ³)	0,45
Absorção de água (%)	7,86

Fonte: ZAKRZEVSKI (2020).

1.1.1. Cimento CP V-ARI

As características do cimento Portland CPV - ARI são especificadas pelo fabricante do aglomerante, o que está apresentado nas Tabelas 4, 5 e 6. Em laboratório somente as propriedades físicas podem ser determinadas, sendo essas análises de massa específica e módulo de finura, realizadas de acordo com as normas NBR 16605 (2017) e NBR 11579 (2013) respectivamente.

Tabela 4 - Caracterização mecânica do cimento segundo o fabricante

Características avaliadas	Tipos de cimento Portland		
	CPV-ARI		
	Fabricante	Exigência da NBR 11578	
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	23,1	14
	3 dias	40,3	≥ 24,0
	7 dias	47,5	≥ 34,0
	28 dias	53,9	-

Fonte: FABRICANTE (2020).

Tabela 5 - Caracterização química do cimento segundo o fabricante

Parâmetros avaliados (% da massa)	Tipos de cimento Portland	
	CPV-ARI	
	Fabricante	Exigência da NBR 11578
Al ₂ O ₃	4,38	-
SiO ₂	19,08	-
Fe ₂ O ₃	3,03	-
CaO	61	-
MgO	3,36	≤ 6,50
SO ₃	2,98	≤ 4,00
Perda ao fogo	3,69	≤ 4,50
CaO livre	0,81	-
Resíduo insolúvel	0,77	≤ 1
Equivalente alcalino (Na ₂ O e K ₂ O)	0,69	-

Fonte: FABRICANTE (2020).

Tabela 6 - Caracterização física do cimento

Características avaliadas	Tipos de cimento Portland		
	CPV-ARI		
	Fabricante	Laboratório URI	Exigência da NBR 11578
Massa específica (g/cm ³)	3,12	3,12	-
Expansão a quente (mm)	0	-	≤ 5,0
Tempo de pega (h: min.)	Início	02:00	-
	Fim	02:55	-
Consistência normal (%)	29,8	-	-
Finura Blaine	4.59	-	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)	0,06	2	-
Resíduo peneira #325µm (%)	0,2	-	-

Fonte: ZAKRZEVSKI (2020).

4.2 PREPARO DOS MATERIAIS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

4.2.1 Encapsulamento das bactérias

O *Bacillus subtilis* é o responsável pela cicatrização das fissuras e imperfeições que surgiram no concreto, e para que tenham a ação esperada foram encapsulados na argila expandida com granulometria equivalente a brita 1. Esse processo necessitou de uma solução bacteriana e um meio de cultivo.

O encapsulamento das bactérias nas partículas de argila expandida é feito por absorção. Com o meio de cultivo com as bactérias disponibilizado em parceria com o laboratório de engenharia de alimentos da URI, foram submergidas as partículas de argila expandida necessárias, como apresentado na Figura 9, o que faz com que haja a absorção e conseqüentemente o encapsulamento. Esse processo levou 72 horas, período necessário para a máxima absorção das bactérias na argila, e após esse período o material pode ser utilizado para a produção do bioconcreto.

Figura 9 - Argilas expandidas submersas em meio de cultivo com bactérias



Fonte: AUTORA, (2021).

4.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, assim como recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015), em três diferentes traços de concreto, que passaram por um processo de cura em ciclos.

Os traços definidos para o projeto foram:

- Traço de referência - Cimento (10,09 g), areia média (20,18 kg), brita 1 (30,27 kg), água (4,55 kg) e aditivo superplastificante (10,1 g).
- Traço 1 - Cimento (10,09 Kg), areia média (20,18 kg), brita 1 (28,53 kg), argila expandida (1,3 kg), água (4,55 kg) e aditivo superplastificante (10,1 g).
- Traço 2 - Cimento (10,09 kg), areia média (20,18 kg), brita 1 (30,27 kg), argila expandida com bactérias encapsuladas (1,3 kg), água e aditivo superplastificante (10,1 g).

Nos traços 1 e 2, em que houve a adição da argila expandida, foi substituído 15% do volume de brita 1. O quantitativo de corpos de moldados, os traços e as avaliações que foram realizadas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Moldagens de corpos de prova, traços e avaliações realizadas

Tipo de	Idade de	Resistência à	Módulo de	Análise	Resistência
---------	----------	---------------	-----------	---------	-------------

concreto	ensaio	compressão	elasticidade	visual de fissuras	média
Referência	7 dias	-	-	-	3
	90 dias	3	3	3	-
Traço 1	7 dias	-	-	-	3
	90 dias	3	3	3	-
Traço 2	7 dias	-	-	-	3
	90 dias	3	3	3	-
Total	-	9	9	9	9

Fonte: AUTORA, (2021).

No processo de concretagem, primeiramente é adicionada a brita na betoneira, seguido por parte da água, o cimento, areia, o restante da água e por fim o aditivo. O mesmo processo foi realizado nos concretos com a adição da argila expandida e argila expandida com bactérias, colocados na mistura juntamente com o agregado graúdo. A Figura 10 mostra o concreto em estado fresco já colocado nos moldes.

Figura 10 - Corpos de prova concretados



Fonte: AUTORA (2021).

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram retirados dos moldes e levados para câmara úmida, onde permaneceram por sete dias. Após

sete dias da moldagem dos CP's, foi determinada a média da resistência dessa idade com o rompimento de 3 corpos de prova de cada traço. Esse processo foi necessário para que pudesse promover a pré-fissuração do concreto, realizada na prensa hidráulica utilizando 70% da resistência à compressão encontrada, criando assim, microfissuras na matriz sem que o mesmo seja rompido.

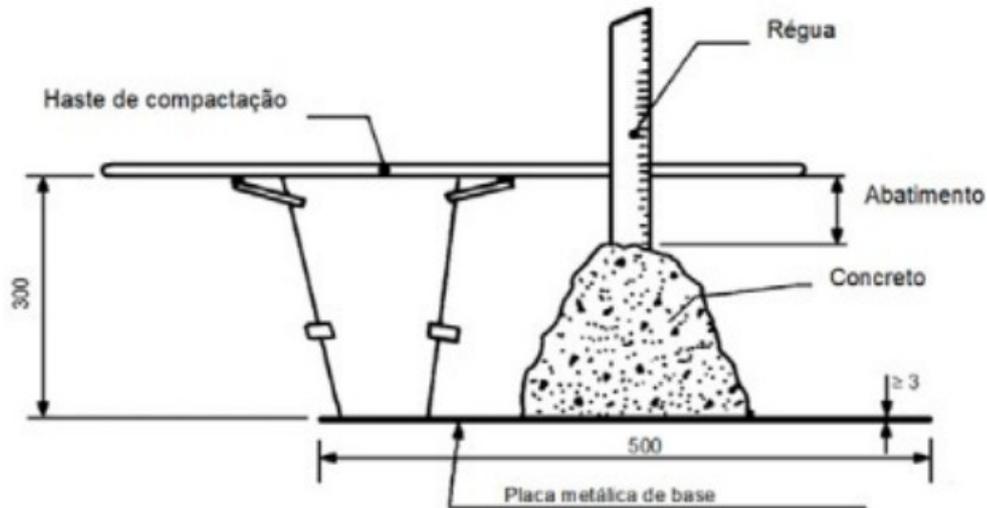
Neste mesmo período de 7 dias, corpos de prova foram destinados a análise visual de cicatrização de fissuras, após a pré-fissuração. Os mesmos foram cortados em placas com cerca de 10mm de espessura, de modo a facilitar a identificação de fissuras no concreto com o uso de microscópio óptico e lupa estereoscópica.

Todos os CP's após a pré-fissuração passaram pelo processo de cura em ciclos. No caso em questão, os corpos de prova ficaram submersos em água por 72 horas, e 72 horas expostos ao ambiente (22 ± 2 °C) até completarem 90 dias, o que configura a cura em ciclos. A utilização dessa forma de cura tem maior eficiência mencionada por outros autores, como é o caso de Valin e Lima (2010) que identificaram um aumento na resistência à compressão quando utilizando ciclos de 7 dias em cura úmida e 21 expostas ao ar em relação a cura somente exposta ao ar, ou então em câmara úmida.

4.3 Slump Test

O ensaio do concreto em estado fresco é o Slump test também chamado de abatimento de tronco de cone, que tem a função de definir a trabalhabilidade do concreto. Para isso foi seguida a NBR 16889 (ABNT, 2020), e utilizada uma forma cônica padronizada, sendo preenchida em três camadas alternadas com 25 golpes com uma haste especificada, promovendo assim o adensamento. Após o preenchimento total, o molde metálico foi retirado e colocado ao lado, posicionando a haste sobre o mesmo. Com isso é feita a medição entre a parte superior do concreto, e a haste sobre o molde, como apresentado na figura 11.

Figura 11 - Forma de medição ensaio Slump test



Fonte: ABNT (2020).

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência à compressão é um dos principais parâmetros analisados para o concreto, sendo essencial no desenvolvimento do cálculo estrutural. Nessa pesquisa foram realizados ensaios em prensa para a determinação da resistência mecânica dos concretos produzidos de acordo com a NBR 5739 (2018), a fim de determinar o efeito que o uso das bactérias tiveram sobre esse parâmetro.

Os corpos de prova cilíndricos de concreto passaram por um processo de retificação, a fim de nivelar as extremidades que ficarão em contato com a prensa e atendendo todas exigências da NBR 5739 (ABNT,2018). A ruptura foi realizada, aos 90 dias, a fim de verificar a influência das bactérias em longo prazo.

4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O ensaio do módulo de elasticidade foi executado em prensa com a utilização de um acessório específico para esse fim, o qual mede a deformação ocorrida. A normativa NBR 8522 (ABNT, 2017) determina as especificações dos corpos de prova, que permaneceram em ensaio por um tempo mínimo de 60 segundos com três ciclos de carga, e posterior rompimento total. Os resultados foram automaticamente registrados e processados pelo equipamento, que gerou um

gráfico da deformação ocorrida. Esse ensaio foi de grande importância para identificar a capacidade que o concreto possui de absorver deformações que serão geradas com aplicação de carga.

4.6 DIFRATOMETRIA DE RAIO-X

O ensaio de difratometria de raio-x foi realizado com o intuito de identificar as substâncias oriundas da ação das bactérias no concreto. Neste caso esperado é o carbonato de cálcio, responsável pela selagem das fissuras no concreto.

O equipamento utilizado para o desenvolvimento deste experimento foi o MiniFlex II- Desktop X-Ray Diffractometer, com medida de 0 a 80° passo de 0,05 graus e tempo de contagem de 5 graus por minuto. A análise qualitativa de uma amostra foi feita através da comparação de seu padrão difratométrico com padrões de referência, disponíveis em bancos de dados de difração de raios X (ANTONIASSI, 2010).

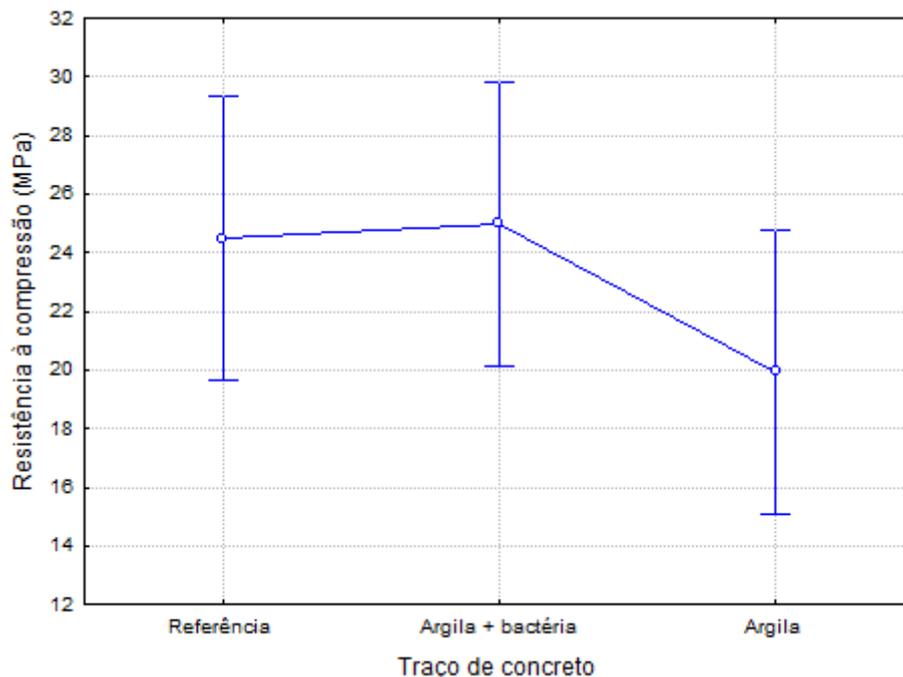
5 RESULTADOS

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O primeiro ensaio de resistência à compressão foi realizado sete dias após a concretagem e cura, isso porque, esse foi o período estabelecido para a pré-fissuração dos CP's. Os resultados obtidos foram dentro do esperado, os quais indicam um aumento da resistência à compressão quando há a adição de bactérias. Esse aumento pode ser identificado mesmo aos sete dias pelo fato de a água de amassamento do concreto ser aproveitada pelas bactérias encapsuladas, que já iniciam o processo de produção de carbonato de cálcio.

A Figura 12 apresenta um comparativo das resistências à compressão de acordo com o traço de concreto.

Figura 12 - Comparativo entre resistências à compressão aos 7 dias



Fonte: AUTORA (2021).

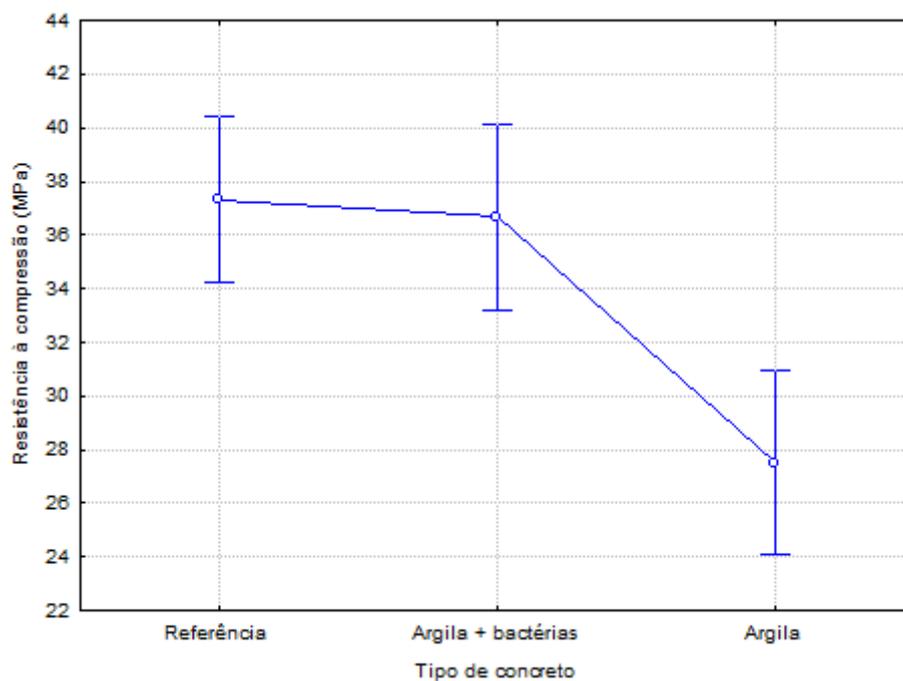
Como é possível de identificar na figura anterior, os concretos de referência e com bactérias foram os que apresentaram melhores resultados, com resistências médias de 24,49 e 24,98 MPa respectivamente, enquanto o concreto somente com argila expandida teve uma resistência de 19,94 MPa. Realizando análise e variância

ANOVA com confiabilidade de 95%, todos os valores de resistência encontrados são considerados iguais.

Já em relação às análises realizadas aos 90 dias, pode-se identificar um aumento significativo nas resistências, principalmente quando comparamos os resultados dos concretos de referência e argila com bactérias somente com o concreto com argila.

Diferentemente dos resultados aos 7 dias, nesta etapa pode-se identificar valores mais significativos discrepantes entre eles, sendo concretos de referência e argila com bactérias com resistência de 37,33 e 36,67MPa respectivamente, enquanto o resultado dos concretos somente com argila expandida teve uma resistência média de 28,38MPa. O comparativo dos resultados está apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Resistência à compressão aos 90 dias



Fonte: AUTORA (2021).

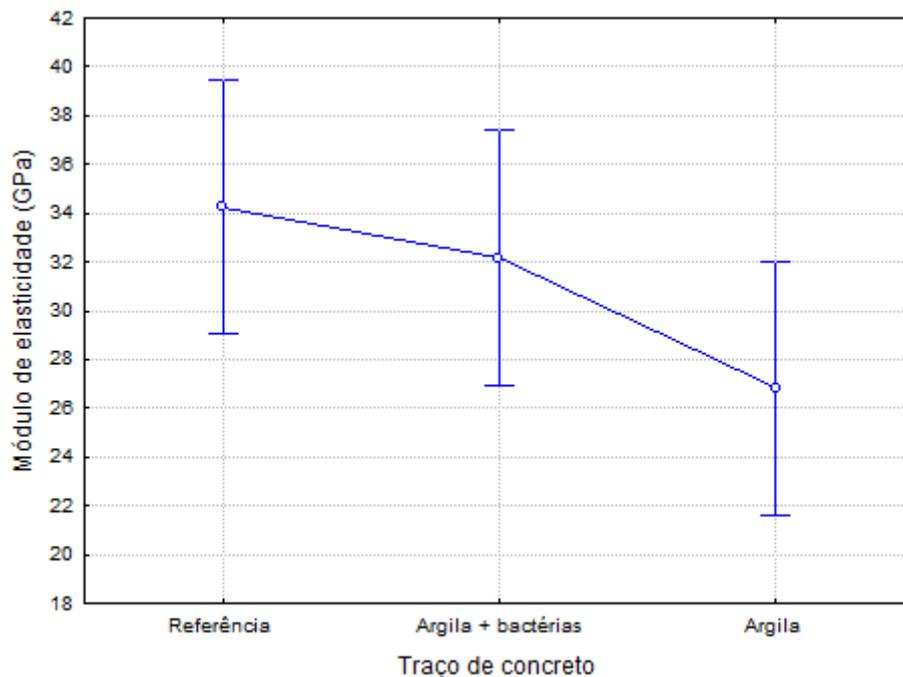
Foi possível identificar que, o uso das bactérias na confecção do concreto aumentou a resistência à compressão quando se comparado com o concreto somente com a argila expandida, atingindo valores próximos ao concreto de referência. Esse comportamento tem relação com a precipitação de carbonato de cálcio pelas bactérias encapsuladas na argila expandida.

O mesmo é identificado em diversos outros estudos, sendo um deles o realizado por Nguyen (2019), que constatou que o uso de *Bacillus subtilis* diminui a porosidade do concreto, o que conseqüentemente aumenta sua resistência à compressão, diminui a absorção de água e a permeabilidade de cloretos.

5.2 MODULO DE ELASTICIDADE

Além dos resultados obtidos por meio de ensaios de resistência à compressão, foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade. Assim como o esperado, o módulo de elasticidade referente aos concretos de referência e argila com bactérias obtiveram resultados maiores que os concretos apenas com argila, isso indica a capacidade de absorção de deformações quando uma carga é aplicada. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Módulo de elasticidade do concreto aos 90 dias



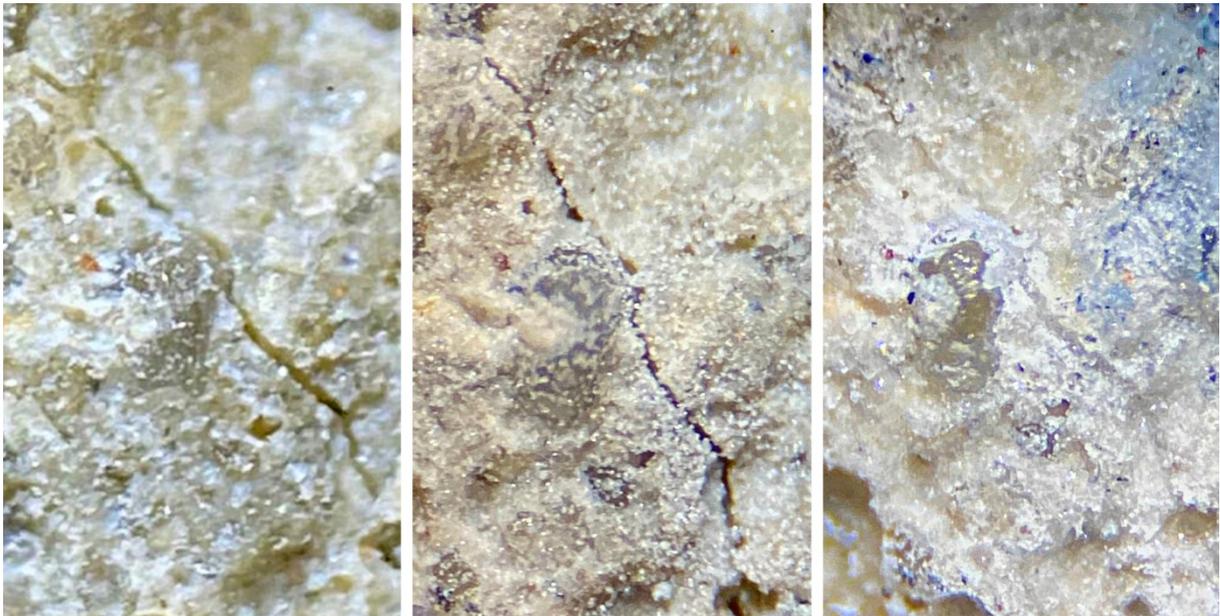
Fonte: AUTORA (2021).

Os valores médios de módulo de elasticidade para o concreto de referência foi de 34,27 GPa, argila com bactérias 32,17 GPa e somente argila 26,83 GPa. Quando comparados os resultados no gráfico apresentado anteriormente, verifica-se que, estatisticamente todos os resultados são iguais.

5.3 ANÁLISE VISUAL DE RECUPERAÇÃO DE FISSURAS

A identificação visual de fissura foi feita através do uso de uma lupa estereoscópica com aumento de 20 e 40 vezes e em pontos isolados com microscópio em aumento de 200 vezes. Foram identificadas fissuras no interior das amostras as quais foram analisadas durante todo o período de pesquisa, a fim de acompanhar o processo de cicatrização. A identificação de uma fissura foi feita inicialmente e fotografada, e a cada quinze dias acompanhando o seu resultado de cicatrização. Como é possível identificar na Figura 15, houve a selagem completa da abertura da fissura em relação ao estágio inicial, e também observa-se a presença de cristais, o que indica a atuação das bactérias para a formação do carbonato de cálcio.

Figura 15 - Identificação da formação de carbonato de cálcio e selagem da fissura em microscópio com 200x de aumento



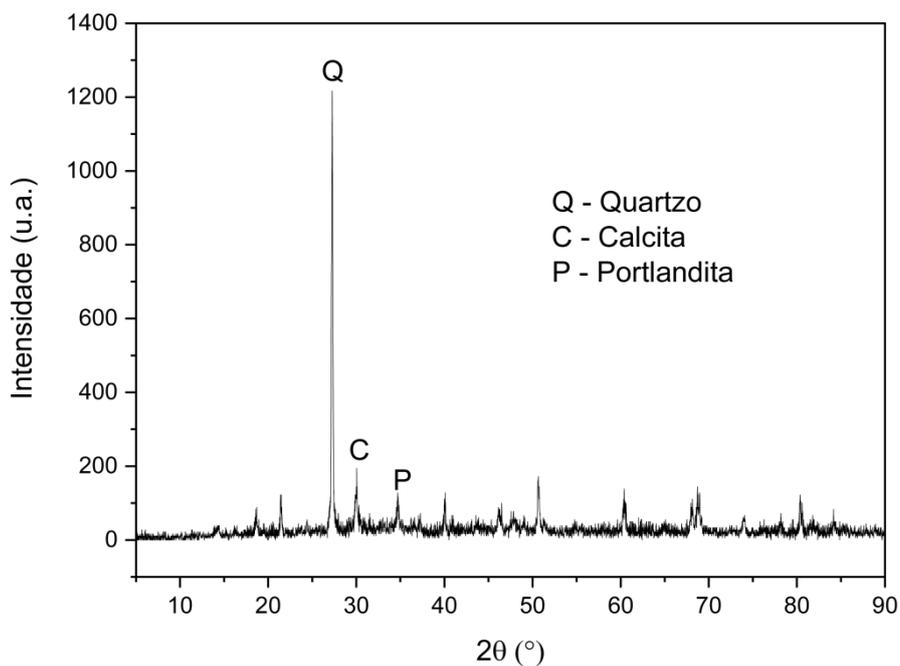
Fonte: Autora (2021).

Por esta análise, verifica-se que o período necessário para a selagem completa das fissuras foi de 45 dias, sendo as amostras submetidas ao processo de cura em ciclos juntamente com os demais CP's. Além da identificação do carbonato de cálcio atuando diretamente nas fissuras, é possível a sua identificação em grande parte da superfície do corpo de prova.

5.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS - X

A fim de verificar se o carbonato de Cálcio foi realmente o responsável pela selagem das microfissuras, foi necessária a realização da análise de amostras por difratometria de Raios-X. Com isso, constatou-se que de fato o material esbranquiçado responsável pela selagem das fissuras é o CaCO_3 produzido pelas bactérias quando em contato com a água. Além desse material, o DRX identificou picos significativos de outros componentes, como é o caso do quartzo, presente nos agregados adicionados ao concreto, principalmente a areia, e a Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), material proveniente da hidratação das partículas de cimento Portland devido ao excesso de cal ou, neste caso, carbonato de cálcio, oriundo da biocimentação. Na Figura 16 é possível a identificação dos picos.

Figura 16 - Resultado de análise de difração de raio-x



Fonte: Autora (2021).

6 CONCLUSÃO

A utilização de adições ao concreto pode trazer diversos benefícios de incrementos nas propriedades, e diminuição do uso de cimento Portland. Com este estudo foi possível verificar, em âmbito experimental, a eficiência da utilização de bactérias *Bacillus subtilis* incorporadas ao concreto para melhoria de suas propriedades e selagem de fissuras. Os resultados encontrados no decorrer da pesquisa foram satisfatórios, atendendo todas as perspectivas de melhorias nas propriedades do concreto analisadas.

Os ensaios de resistência à compressão indicaram que a utilização das bactérias na matriz, incrementa a resistência mecânica do concreto, principal propriedade analisada quando se trata de estruturas. Os resultados obtidos no concreto de referência e argila com adição de bactérias, assim como a disparidade com os valores de resistência do concreto somente com argila, demonstram o incremento de resistência que acontece com o uso dos micro organismos.

Para o módulo de elasticidade, a relação entre os traços foi muito parecida com a resistência à compressão, obtendo módulo mais elevado nos concretos de referência e argila com bactérias, e resultados menores para os concretos somente com argila expandida. Verifica-se que os concretos que possuem resultados de módulo mais elevado são os que terão maior capacidade de absorção de deformações quando há a aplicação de cargas.

A adição das bactérias também se mostrou extremamente eficaz no que diz respeito a cicatrização de microfissuras geradas na matriz. As amostras fissuradas aos sete dias foram analisadas semanalmente até sua selagem completa, que ocorreu aos 45 dias de cura em ciclos. A selagem em um curto espaço de tempo, como é o caso da que ocorreu na pesquisa, evita a infiltração de água em demasia no interior das estruturas, o que poderia causar danos futuros e perda de durabilidade. Essas bactérias podem se manter viáveis na matriz de concreto durante muitos anos, e por esse motivo, continuar realizando a remediação de novas fissuras que poderão vir a surgir ao longo do tempo.

7 REFERÊNCIAS

- _____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, 2011.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica, 2003.
- _____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009
- _____. **NBR NM 7211**: Agregados para concreto - Especificações , 2009.
- _____. **NBR NM 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem, 2021.
- _____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem, 2009.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, 2016.
- _____. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 2020.
- _____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, 2021.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, 2018.
- ABREU, Brendon Garcia et al. **BIOCONCRETO**. Diálogos Interdisciplinares, v. 8, n. 2, p. 45-55, Braz Cubas, 2019.
- ACHAL, Varenym; MUKERJEE, Abhijeet; REDDY, M. Sudhakara. **Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures**. Construction and Building Materials, v. 48, p. 1-5, 2013.
- ALAZHARI, Mohamed et al. **Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 160, p. 610-619, 2018.
- AL-TABBAA, Abir et al. **First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 208, p. 669-685, 2019.

ALVES, Kessia Caroline Souza et al. **Bacillus subtilis**: uma versátil ferramenta biotecnológica¹. *Scientia Amazoni*, v. 7, n. 2, p. 15-23, 2018.

BANG, Sookie S.; GALINAT, Johnna K.; RAMAKRISHNAN, V. **Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii**. *Enzyme and microbial technology*, v. 28, n. 4-5, p. 404-409, 2001.

DA SILVA GATO, Marilú Carvalho et al. **Autorregeneração de fissuras em concreto a partir de uma cultura de bactérias**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, 2021.

DHAMI, Navdeep K. **Biomining of calcium carbonates and their engineered applications**: a review. *Frontiers in microbiology*, v. 4, p. 314, 2013.

EUZÉBIO, Luiz Antônio; ALVES, Thiago Rodrigues; FERNANDES, Vítor Andrade. **Estudo exploratório de concreto com introdução de Bacillus subtilis, Bacillus licheniformis, acetato de cálcio e ureia**. Goiânia: UFG, 2017.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

GONSALVES, Gayle Maria. **Bioconcrete-a sustainable substitute for concrete?**. Dissertação de Mestrado. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

GONZÁLEZ, Yamile Valencia; SANTANA, Ângela Patrícia; DE CARVALHO, José Camapum. **Bactérias nativas indutoras de precipitação de minerais de carbonato de cálcio em solos tropicais**. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, v. 34, n. 1, p. 15-21, 2014.

JONKERS, Henk M. **Bacteria-based self-healing concrete**. *Heron*, 56 (1/2), 2011.

JONKERS, Henk M. et al. **Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete**. *Ecological engineering*, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010.

LUO, Jing et al. **Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete**. *Construction and building materials*, v. 164, p. 275-285, 2018.

LUO, Jing et al. **Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete**. *Construction and building materials*, v. 164, p. 275-285, 2018.

MÂNICA, Graciela. **Utilização de microrganismo autógeno para a recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. Lajeado: UNIVATES, 2019

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo et al. **Metal magnesium industry waste for partial replacement of Portland cement**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, 2020.

MENEZES, Cristiano Ragagnin de et al. **Microencapsulação de probióticos: avanços e perspectivas**. Ciência Rural, v. 43, p. 1309-1316, 2013.

MOREIRA, Mirellen Mara. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento portland**: contribuição aos processos de autocicatrização. Brasília: UnB, 2016.

PETER, N. et al. **Silica-based self-healing microcapsules for self-repair in concrete**. Journal of Applied Polymer Science.v. 43090, n. 10, p. 1–12, 2016.

RAJZAKOWSKA, Magdalena. **Self-healing concrete**. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet, 2019

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; PINHEIRO, Alexandre Victor Silva. **O Potencial do Concreto Vivo Como Alternativa Para Regenerar Estruturas Expostas a Ambientes Agressivos**. Research, Society and Development, 2020.

SILVA, Aline Marques da. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica do uso do bioconcreto em substituição ao concreto comum**. Monte Castelo: FUCAMP, 2018.

TALAEKHOZANI, Amirreza; ABD MAJID, Muhd Zaimi. **A review of self-healing concrete research development**. Journal of Environmental Treatment Techniques, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2014.

VENQUIARUTO, Simone Dornelles. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. Porto Alegre: UFRGS, 2017.

VIEIRA, Juliana Aparecida. **Biodeposição de CaCO₃ em materiais cimentícios**: contribuição ao estudo da biomineralização induzida por Bacillus subtilis. Porto Alegre: UFRGS, 2017.

VIJAY, Kunamineni; MURMU, Meena. **Effect of calcium lactate on compressive strength and self-healing of cracks in microbial concrete**. Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 13, n. 3, p. 515-525, 2019.

WANG, Xianfeng et al. **Laboratory and field study on the performance of microcapsule-based self-healing concrete in tunnel engineering**. Construction and Building Materials, v. 220, p. 90-101, 2019.

ZHANG, Jiaguang et al. **Aragonite formation induced by open cultures of microbial consortia to heal cracks in concrete: Insights into healing mechanisms and crystal polymorphs**. Construction and Building Materials, v. 224, p. 815-822, 2019.