



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

ROSENILDO RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE BACILLUS SUBTILIS NA
AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM ARGAMASSAS**

TIMÓTEO

2026

ROSENILDO RIBEIRO SILVA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE BACILLUS SUBTILIS NA
AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM ARGAMASSAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia dos Materiais.

Orientador: Jorge Luís Coleti.

TIMÓTEO

2026

Silva, Rosenildo Ribeiro
S586e Estudo da utilização de bacillus subtilis na autocicatrização de
fissuras em argamassas. / Rosenildo Ribeiro Silva - 2026.
96 f. : il.
Orientador: Jorge Luis Coleti

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Timóteo, 2026.
Bibliografia.

1. Concreto - Deterioração. 2. Argamassa. 3. Biopolímeros. 4.
Engenharia de materiais. I. Coleti, Jorge Luis. IV. Título.

CDU: 620.1-033.2



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 13 / 2026 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.018995/2026-83

Belo Horizonte-MG, 10 de abril de 2026.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE BACILLUS SUBTILIS NA AUTOCICATRIZAÇÃO
DE FISSURAS EM ARGAMASSAS*

Autor: Rosenildo Ribeiro Silva

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Coleti

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 13 de abril de 2026 esta Dissertação:

Prof. Dr. Jorge Luis Coleti (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Valmir Dias Luiz (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Almir Silva Neto (EXAMINADOR EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Eduardo Junca (EXAMINADOR EXTERNO)
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

(Assinado digitalmente em 15/04/2026 23:04)
ALMIR SILVA NETO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1036181

(Assinado digitalmente em 15/04/2026 22:15)
JORGE LUIS COLETI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1212397

(Assinado digitalmente em 14/04/2026 14:33)
VALMIR DIAS LUIZ
DIRETOR - TITULAR
DCTM (11.63)
Matrícula: 1809797

(Assinado digitalmente em 14/04/2026 10:33)
EDUARDO JUNCA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.867-##

RESUMO

A durabilidade de estruturas cimentícias é frequentemente comprometida pela formação de fissuras, que facilitam a entrada de agentes agressivos, aceleram processos de deterioração, como a corrosão das armaduras, e podem elevar significativamente os custos de manutenção e reparo ao longo da vida útil das construções. Métodos tradicionais de reparo apresentam limitações técnicas e econômicas, especialmente em estruturas de difícil acesso, o que tem impulsionado a busca por soluções inovadoras e mais sustentáveis. Dessa forma, esta pesquisa investigou a viabilidade e o potencial de utilização de microrganismos do tipo *Bacillus subtilis*, provenientes de um probiótico comercial, juntamente com lactato de cálcio, encapsulados em partículas de argila expandida, como uma solução para a autorreparação de fissuras em argamassas cimentícias, além de avaliar a influência desses agentes nas propriedades mecânicas do material. Diferentemente das abordagens tradicionais, que envolvem o cultivo e a concentração de colônias bacterianas em laboratório para posterior aplicação; neste estudo, os microrganismos foram obtidos a partir de um probiótico comercial utilizado na alimentação de alevinos, eliminando etapas de cultivo. A metodologia empregou, dentre outros, diferentes quantidades de microrganismos e lactato de cálcio. Os resultados demonstraram a capacidade de autorreparação das argamassas, com o fechamento visual de fissuras em até 60 dias, corroborado por análises de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) acoplado, que confirmaram a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) via biomineralização microbiana (MICP). Em relação às propriedades mecânicas, observou-se que a incorporação dos microrganismos e do lactato não comprometeu estas propriedades, mas, em diversas combinações, otimizou a resistência à compressão e à tração na flexão em comparação com as amostras de referência. Dessa forma, esta pesquisa avança o conhecimento no campo da argamassa autorreparadora, validando uma abordagem prática para a cicatrização de fissuras e a melhoria de propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Bioconcreto, Corrosão, Fissuras, Recuperação estrutural.

USE OF MICROORGANISMS IN THE REPAIR OF CRACKS IN MORTARS

ABSTRACT

The durability of cementitious structures is often compromised by the formation of cracks, which facilitate the ingress of aggressive agents, accelerate deterioration processes such as reinforcement corrosion, and may significantly increase maintenance and repair costs throughout the service life of structures. Traditional repair methods present technical and economic limitations, especially in structures with difficult access, which has driven the search for innovative and more sustainable solutions. Thus, this research investigated the feasibility and potential of using *Bacillus subtilis* microorganisms, obtained from a commercial probiotic, together with calcium lactate and encapsulated in expanded clay particles, as a solution for the self-healing of cracks in cementitious mortars, as well as evaluating the influence of these agents on the mechanical properties of the material. Unlike conventional approaches, which involve the cultivation and concentration of bacterial colonies in laboratory conditions prior to application, in this study the microorganisms were obtained from a commercial probiotic used in the feeding of fish larvae, eliminating cultivation steps. The methodology employed, among other aspects, different concentrations of microorganisms and calcium lactate. The results demonstrated the self-healing capacity of the mortars, with visual crack closure within up to 60 days, corroborated by optical microscopy and scanning electron microscopy coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), which confirmed the formation of calcium carbonate (CaCO_3) through microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP). Regarding mechanical properties, it was observed that the incorporation of microorganisms and calcium lactate did not compromise these properties; on the contrary, in several combinations, it improved compressive strength and flexural tensile strength compared to reference samples. Therefore, this research advances knowledge in the field of self-healing mortars by validating a practical approach for crack healing and enhancement of mechanical properties.

Keywords: Bioconcrete, Corrosion, Cracks, Structural restoration.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de hidratação do grão de cimento	16
Figura 2 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.....	18
Figura 3 – Pilar fissurado devido à movimentação térmica nas vigas de concreto armado	26
Figura 4 – Trincas em peças estruturais devido à expansão dos materiais.....	27
Figura 5 – Fissuração típica de vigas sub-armadas solicitadas a flexão.....	28
Figura 6 – Fundações contínuas solicitadas por carregamentos desbalanceados.....	28
Figura 7 – Retração do concreto em função do consumo de cimento e da relação água/cimento.....	29
Figura 8 – Fissuras horizontais no revestimento provocadas por expansão da argamassa de assentamento.....	30
Figura 9 – Armadura protegida no interior do concreto	31
Figura 10 – Mecanismo de corrosão em meio ácido com emprego de dois metais diferentes	32
Figura 11 – Mecanismo de corrosão em meio alcalino	32
Figura 12 – Penetração do oxigênio proveniente do meio externo através da camada de cobrimento.....	33
Figura 13 – Formação de macropilha	34
Figura 14 – Influência da fissura na formação da corrosão.....	35
Figura 15 – Penetração das fissuras no cobrimento das armaduras	36
Figura 16 – Abertura da fissura além do limite estabelecido por norma e com penetração atingindo as armaduras	36
Figura 17 – Lei da evolução de custos	40
Figura 18 – Fluxograma de materiais e métodos.....	49
Figura 19 – Cimento Portland utilizado	50
Figura 20 – Agregado miúdo utilizado	51
Figura 21 – Argila expandida utilizada.....	52
Figura 22 – Probiótico para alimentação de alevinos.....	53
Figura 23 – Lactato de cálcio	54
Figura 24 – Descrição do código para identificação da amostra.....	56
Figura 25 – Ensaio de peneiramento dos agregados.....	57
Figura 26 – Picnômetros utilizados no ensaio de densidade dos agregados e argila.....	59
Figura 27 – Picnômetros em banho para os ensaios de densidade dos agregados	59
Figura 28 – Difrátômetro de raios X Rigaku – Miniflex 300 utilizado na pesquisa	60
Figura 29 – Microscópio eletrônico de Varredura Jeol NeoScope TM série JCM 700 utilizado na pesquisa.....	61
Figura 30 – Analisador de superfície específica BET Micromeritics ASAP 2020 utilizado na pesquisa.....	62
Figura 31 – Misturador utilizado para preparo da argamassa	64
Figura 32 – Corpos de prova Ø 7,5x4,0 cm, Ø 2,5x2,0 cm e Ø 2,0x2,0 cm	65
Figura 33 – Corpos de prova prismático 4,0x4,0x16 cm	65
Figura 34 – Prensa hidráulica para ensaios eletromecânicos	66
Figura 35 – Rompimento de corpos de prova a tração na flexão	68

Figura 36 – Rompimento de corpos de prova prismáticos	69
Figura 37 – a) Curva Granulométrica do agregado miúdo e b) Curva granulométrica da argila expandida.....	70
Figura 38 – Imagem de MEV da argila expandida com identificação de alguns poros	72
Figura 39 – Imagem de MEV e EDS da argila expandida utilizada nas amostras	72
Figura 40 – Imagem de MEV do probiótico contendo <i>Bacillus subtilis</i>	73
Figura 41 – Difractometria de raios-X da amostra de argila expandida utilizada nos experimentos.....	74
Figura 42 – Amostra 2-C1A1,5AE1,5M0L0 sem adição de microrganismos e lactato de cálcio.....	76
Figura 43 – Avanço no fechamento das fissuras nos corpos de prova	77
Figura 44 – MEV da fissura do corpo de prova da amostra 5-C1A1,5AE1,5M5L10 de dimensões Ø 2,5x2,0 cm, 30 dias após a indução da fissura e do material de preenchimento dentro da fissura	78
Figura 45 – MEV da fissura da amostra 2-C1A1,5AE1,5M0L0.....	79
Figura 46 – Média de resistência à tração na flexão das amostras	81
Figura 47 – Média da resistência à compressão das amostras.....	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de composição de cimento Portland (porcentagem em massa).	17
Tabela 2 – Limite de distribuição granulométrica do agregado miúdo	19
Tabela 3 – Limites máximos para a expansão devidos à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados.....	20
Tabela 4 – Limite de composição granulométrica do agregado graúdo	21
Tabela 5 – Classes de agressividade ambiental	25
Tabela 6 – Abertura máxima das aberturas em concreto armado (não protendido) em função do grau de agressividade ambiental	35
Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas.....	39
Tabela 8 – Relação entre CP V – ARI, CEM I 42,5 R (EN 197-1) e CEM I 52,5 R (EN197-1).....	51
Tabela 9 – Quantidade de <i>Bacillus subtilis</i> no probiótico	53
Tabela 10 – Traços utilizados nos experimentos	55
Tabela 11 – Quantidade de materiais utilizados na pesquisa.....	55
Tabela 12 – Resultado da densidade do agregado miúdo e da argila expandida obtidos	71
Tabela 13 – Valores de tração na flexão obtidos nos corpos de prova	80
Tabela 14 – Valores de compressão obtidos nos corpos de prova	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Concreto	13
3.1.1 Composição.....	13
3.1.2 Preparo do concreto.....	21
3.1.3 Preparo da argamassa	22
3.1.4 Características	23
3.3 Caracterização do problema	25
3.3.1 Fissuras.....	25
3.3.2 Corrosão	30
3.3.3 Recuperação estrutural	36
3.3.4 Custos e dificuldades na reparação	39
3.4 Concreto autorregenerativo	40
3.4.1 Conceito de concreto autorreparável ou autocicatrizante.....	40
3.4.2 Processo de autorreparação do concreto com base biológica.....	43
3.4.3 Precipitação de carbonato de cálcio induzida microbialmente (MICP)	44
3.4.4 Precipitação do carbonato de cálcio pela metabolização do lactato de cálcio.....	46
3.4.5 Tipos de bactérias e processo utilizados no bioconcreto	47
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 Aquisição dos materiais.....	49
4.1.1 O cimento CP V-ARI.....	49
4.1.2 Agregado miúdo	51
4.1.3 Argila expandida.....	52
4.1.4 Probiótico	53
4.1.5 Lactato de cálcio.....	54
4.2 Traço utilizado para as amostras	55
4.3 Caracterização dos materiais e ensaios	56
4.3.1 Secagem	56
4.3.2 Análise granulométrica.....	56
4.3.3 Determinação da densidade.....	58
4.3.4 Difratometria de raios X.....	60
4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado	61

4.3.6 Superfície específica	61
4.4 Preparo da solução com probiótico e lactato de cálcio e da argila expandida.....	62
4.5 Preparo e modelagem do corpo de prova	63
4.6 Indução das fissuras	65
4.7 Ensaio de resistência dos corpos de prova	66
4.7.1 Ensaio de resistência à tração na flexão	67
4.7.2 Ensaio de resistência à compressão.....	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1 Caracterizações.....	70
5.1.1 Análise granulométrica do agregado miúdo e da argila expandida.....	70
5.1.2 Densidade do agregado miúdo e da argila expandida	71
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura da argila expandida.....	71
5.1.4 Microscopia eletrônica de varredura do probiótico contendo <i>Bacillus subtilis</i>	73
5.1.5 Difractometria de raios-X da argila expandida	74
5.1.6 Superfície específica a argila expandida	74
5.2 Autocicatrização das fissuras induzidas	75
5.3 Resistência dos corpos de prova à compressão e à tração na flexão	79
6 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

O concreto se destaca como um dos materiais mais empregados na construção civil. De acordo com o levantamento realizado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2023, o Brasil registrou um consumo de 62,2 Mt de cimento no ano referido, sendo que a região Sudeste foi responsável pela maior parte desse consumo (Filho *et al.*, 2024). Esse material é formado pela combinação de agregados, cimento, água e, ocasionalmente, aditivos (Khushnood *et al.*, 2019).

A composição do concreto é, fundamentalmente, composta por um material aglutinante que se une a partículas de agregados. Considerando que o cimento representa 7% de todas as emissões atuais de CO₂ originadas por atividades humanas, conforme indicado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, é possível afirmar que o concreto atua como um agente poluente. Estima-se que o mercado de concreto cresça US\$ 332 bilhões somente entre 2020 e 2024 (Fernandez *et al.*, 2021). O uso consistente de materiais cimentícios em construções tão diferentes exige materiais alternativos para reduzir a frequência de manutenções, os reparos e, em alguns casos, a falha total da estrutura.

A constante reafirmação e ampliação de metas e a garantia de implementação de ações urgentes sobre o clima, discutidas nas Conferências das Partes (COP) da Organização das Nações Unidas (ONU) e ratificadas pelo Brasil, pressionam os setores produtivos a reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE). O Roadmap tecnológico do cimento, publicado em 2019 pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), estabelece como diretriz a redução da emissão média de 552 kg CO₂/ton. cimento (ano base 2020) para 375 CO₂/ton. cimento (ano base 2050), o que implica a variação do fator clínquer médio de 66% para 52% no período de 30 anos (Visedo; Pecchio, 2019).

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), para atingir a Vida Útil de Projeto (VUP), é fundamental que a estrutura e seus componentes sejam submetidos a manutenções preventivas regularmente. Além disso, caso surja manifestação patológica como a fissura, é necessário realizar manutenções corretivas para impedir a deterioração do problema identificado.

Devido ao uso intenso de concreto, uma manifestação patológica como a citada acima pode se desenvolver mais tarde em projetos de pequena escala nos quais este material é principalmente utilizado. Além disso, a pressão por prazos, bem como a falta de trabalhadores qualificados, contribui para a degradação prematura dessas construções. Isso

é principalmente observável nos fenômenos patológicos que ocorrem com o concreto que será submetido a tensões de tração e compressão, levando a fissuras.

As fissuras tendem a se propagar quando não possuem tratamento imediato e eficaz, o que resulta em reparos caros. As fissuras também prejudicam a durabilidade do concreto, fornecendo um caminho para a entrada de líquidos e gases potencialmente nocivos. Além disso, as microfissuras podem atingir as armaduras de aço e causar sua corrosão com exposição ao oxigênio, água, cloretos e dióxido de carbono. Assim, as fissuras e os danos causados por seus efeitos sucessivos prejudicam a durabilidade.

Assim sendo, as fissuras devem ser curadas na primeira ocorrência, ou seja, no nível da microfissura. Com as mudanças ambientais, torna-se mais difícil e caro prevenir a formação de trincas. Os métodos tradicionais de reparo de fissuras incluem aplicação de argamassa e injeção de resina epóxi no local da trinca. No entanto, esses métodos são trabalhosos, caros e tediosos em construções mais arrojadas. Isto faz com que novas tecnologias construtivas e materiais sejam desenvolvidas.

A busca por um concreto mais sustentável e durável, menos sujeito a fissuras, leva a um conceito sobre argamassa ou concreto autorregenerativo. Esse conceito inspirou o Holandês Dr. Henk Jonkers em 2011 a buscar por um método de conferir ao concreto ou à argamassa a capacidade de autorreparar danos internos.

O concreto ou argamassa autorregenerativo de base adição biológica está se tornando uma tecnologia promissora em termos de tratamento de fissuras nos últimos anos, uma vez que a técnica de tratamento de fissuras com base química é um processo comparativamente mais caro que requer muita inspeção e observação para identificar as fissuras nas estruturas. Ao contrário do químico, o tratamento biológico (ou autorregenerativo) é vantajoso no uso em estruturas de concreto. Ele é uma substituição simples e econômica em termos de evitar o risco de observação e identificação da localização de fissuras em estruturas de edifícios expostas aos poluentes ambientais, particularmente quando se trata de: vazamentos de líquidos, resistência às intrusões químicas e, portanto, de proteção contra corrosão.

Esta técnica também se concentra em aumentar o desenvolvimento sustentável com ações contra mudanças climáticas e proteção ambiental, a fim de diminuir o lançamento de CO₂ na atmosfera, além de trazer inovação para o setor da construção civil, indústria e infraestrutura, o que está alinhado com parte das 17 ODS da Agenda 2030. Ademais, ele também diminui o custo total de reparo de estruturas de concreto. Um agente de tratamento (bactérias com nutrientes orgânicos adequados) geralmente é incorporado ao concreto ou

argamassa para precipitar o carbonato de cálcio e eventualmente preencher as fissuras quando este entra em contato com a água (Priyom; Islam; Shumi, 2020). Este processo de biomineralização é chamado de Precipitação de Carbonato de cálcio Induzida Microbiologicamente (MICP), e esta tecnologia de concreto autorreparável é melhor do que vários avanços comuns devido à sua natureza ecológica e habilidades de autorreparação (Soda; Mini, 2023).

As bactérias formadoras de esporos relacionadas com *Bacillus subtilis* são geralmente adotadas como agente cicatrizante para reparo de fissuras, uma vez que essas costumam formar esporos com células especializadas capazes de resistir a altas forças mecânicas e ambientes agressivos (Khushnood *et al.*, 2019). Com baixa atividade metabólica, algumas destas cepas são conhecidas por produzir esporos de vida extremamente longa, viáveis por até 200 anos (Khushnood *et al.*, 2022).

Diversos trabalhos de desenvolvimento de concreto autocicatrizante concentram-se na questão do tipo bacteriano, para uma biomineralização eficiente, e na imobilização do agente cicatrizante, que consiste em bactérias e recursos de cálcio. Devido a uma diminuição contínua no diâmetro do tamanho do poro durante a cura do concreto, o que provavelmente limita a vida útil dos esporos, pois o tamanho do poro diminui abaixo de 1 μm , que é o tamanho típico dos esporos do bacilo, algumas bactérias não eram viáveis no concreto além de 7 dias de cura, uma vez que os poros na matriz de concreto durante a cura diminuía para um tamanho muito pequeno para que as bactérias sobrevivessem (Mors; Jonkers, 2019). Assim, a pesquisa adotou o método de imobilizar o agente de cura, ou seja, bactérias com nutrientes orgânicos adequados através da impregnação e do encapsulamento de bactérias como forma de preservar os organismos microbianos quando misturados ao aglutinante de concreto, conforme apresentado por alguns pesquisadores como Wang *et al.* (2014) e Benjamin *et al.* (2022) apresentam em seus trabalhos o cultivo das colônias de microrganismos para uso em suas pesquisas. Para esta pesquisa em questão, foi utilizado como fonte de microrganismos um probiótico utilizado na alimentação de alevinos, não sendo, portanto, utilizado um cultivo direto destas colônias, e este se mostrou eficiente no fechamento das fissuras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade do uso de microrganismos *Bacillus subtilis*, provenientes de probiótico comercial, associados ao lactato de cálcio e encapsulados em argila expandida, para promover a autocicatrização de fissuras em argamassas cimentícias, e a influência em propriedades mecânicas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar se as argilas expandidas são capazes de encapsular os microrganismos e lactato de cálcio;
- Avaliar se os microrganismos e lactato de cálcio são eficazes no fechamento das fissuras nos corpos de prova;
- Preparar corpos de prova com argamassas cimentícias contendo diferentes concentrações de microrganismos e lactato de cálcio encapsulados em argila expandida e verificar como eles influenciam os corpos de prova;
- Avaliar as características mecânicas dos corpos de prova com a substituição de parte da areia por argila expandida;
- Avaliar a resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas produzidas;
- Verificar a ocorrência de precipitação de lactato de cálcio nas fissuras dos corpos de prova com a utilização de microrganismos provenientes de probiótico para alimentação animal de uso comercial;
- Analisar a influência das diferentes dosagens de microrganismos e lactato de cálcio nas propriedades mecânicas do material;
- Avaliar se o uso de um probiótico para alimentação animal de uso comercial contendo *Bacillus subtilis* se apresenta potencialmente capaz de ser utilizado como fonte de microrganismos capazes de precipitar lactato de cálcio sem a necessidade de cultivo destes microrganismos em laboratório.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto

3.1.1 Composição

3.1.1.1 Cimento

O cimento é um composto em pó, predominantemente constituído por silicatos e aluminatos de cálcio. Quando combinado com água, esses componentes se hidratam, levando ao endurecimento da mistura, que proporciona uma alta resistência mecânica. Após o processo de cura, o cimento não se deteriora mesmo quando exposto novamente à água (Petrucci, 1971).

O cimento Portland é um material amplamente utilizado em todo mundo (Khushnood *et al.*, 2019). Sua popularidade deriva de sua grande simplicidade de manuseio, moldabilidade e resistência, que pode facilmente transmitir a argamassas e concretos. O material também é utilizado, especialmente, na construção civil e nos setores industriais, em barragens e no setor de construção.

A palavra cimento deriva do latim *caementu*, que se referia a muita pedra natural formada em rochas na Roma Antiga. A construção com cimento remonta a cerca de 4.500 anos, assim como os imponentes monumentos do antigo Egito, que utilizavam uma mistura de gesso calcinado, e vários deles na Grécia e em Roma foram edificadas usando os solos vulcânicos de Santorini ou de Pozzuoli, na Itália (Passos; Marszal; Abrahão, 2016).

O cimento foi aprimorado em 1756 pelo inglês John Smeaton, com a calcinação de calcários moles e argilosos para construção em uma forma de alta resistência. Alguns anos depois, o francês Vicat obteve sucesso semelhante ao de Smeaton ao combinar os argilosos com os calcários em 1818. Vicat foi o homem que inventou o cimento artificial. Já em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Ele percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções, e a mistura não se desfazia em água. O construtor a patenteou no mesmo ano como cimento Portland, nome escolhido por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez muito parecidas com as rochas da ilha de Portland (Passos; Marszal; Abrahão, 2016).

O cimento é produzido através de um processo que se desenvolve nas seguintes etapas: inicialmente, a água livre é evaporada a uma temperatura de 100°C. Durante a fase de calcinação, que ocorre entre 100°C e 750°C, a água de cristalização presente nos argilominerais é eliminada. Na etapa de transição, que vai de 750°C a 1000°C, o carbonato de cálcio se decompõe, resultando na formação de óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂). Em seguida, na zona de sinterização, com temperaturas variando entre 1000°C e 1450°C, ocorre uma fusão parcial da mistura, dando origem aos silicatos tricálcico (3CaO.SiO₂) e dicálcico (2CaO.SiO₂), que são os principais componentes do clínquer. Por fim, na fase de resfriamento, que se desenrola entre 1450°C e 1300°C, há cristalização do material fundido, resultando na formação do aluminato de cálcio e do ferro-aluminato de cálcio (Lima, 2011).

Após a formação do clínquer, realiza-se um resfriamento rápido até aproximadamente 150°C. Esse processo é crucial para garantir que os cristais dos compostos formados mantenham uma disposição desordenada, o que os torna reativos em contato com a água. O resfriamento ágil solidifica as diferentes fases em suas configurações de alta temperatura, impedindo que elas passem pela transformação natural de fase que ocorreria com um resfriamento mais lento. O clínquer resfriado é então moído com a adição de 4% a 5% de gesso, resultando em um pó que se converte no cimento Portland utilizado globalmente (Lima, 2011).

3.1.1.2 Matérias primas utilizadas no processo de fabricação

De modo geral, as principais matérias primas utilizadas na fabricação do cimento são:

- a) Calcário – Ele é predominantemente constituído por carbonato de cálcio (CaCO₃), embora frequentemente contenha diversas impurezas naturais, como óxidos de ferro, alumínio e silício, e outros compostos, incluindo óxido de magnésio, sódio e potássio. A cal, que é a parte mais significativa para a fabricação de cimento, corresponde a aproximadamente 56% do total da matéria-prima, o que significa que em cada tonelada de calcário apenas 560 kg são utilizadas;
- b) Argila – Usada na fabricação do cimento, ela é essencialmente composta de silicatos de alumínio hidratados, óxidos de ferro, alumínio e silício, essenciais para fabricação do cimento;

- c) Gesso – Ele está presente na natureza em grandes depósitos sedimentares conhecidos como evaporitos ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e é muito comumente usado no cimento, por exemplo, semi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). O gesso tem um papel importante na produção de cimento, uma vez que afeta o tempo de pega para tornar o cimento útil por mais tempo. Isso ocorre quando o gesso forma uma película ou membrana e impede o endurecimento do cimento (semelhante a grãos). O gesso é utilizado como aditivo final para a produção de cimento CPI; CPI-S; CPII-E; CPII-Z; CPII-F; CPIII; CP IV e CP V-ARI.
- d) Escória de alto forno – A inclusão de escória em cimentos é opcional, variando conforme o tipo de cimento desejado. Existem cimentos que contêm até 65% de escória, conhecidos como cimentos de alto forno. Essa escória apresenta características aglomerantes; no entanto, suas propriedades não são ativadas pela água, mas sim pelo hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que resulta da hidrólise do óxido de cálcio (CaO). Esse processo contribui para a resistência final do cimento. A escória de alto forno faz parte da formulação dos cimentos CPI-S, CPII-E e CP-III.

Na formação do cimento Portland tem-se os seguintes materiais:

Pedra calcária:



Argila:



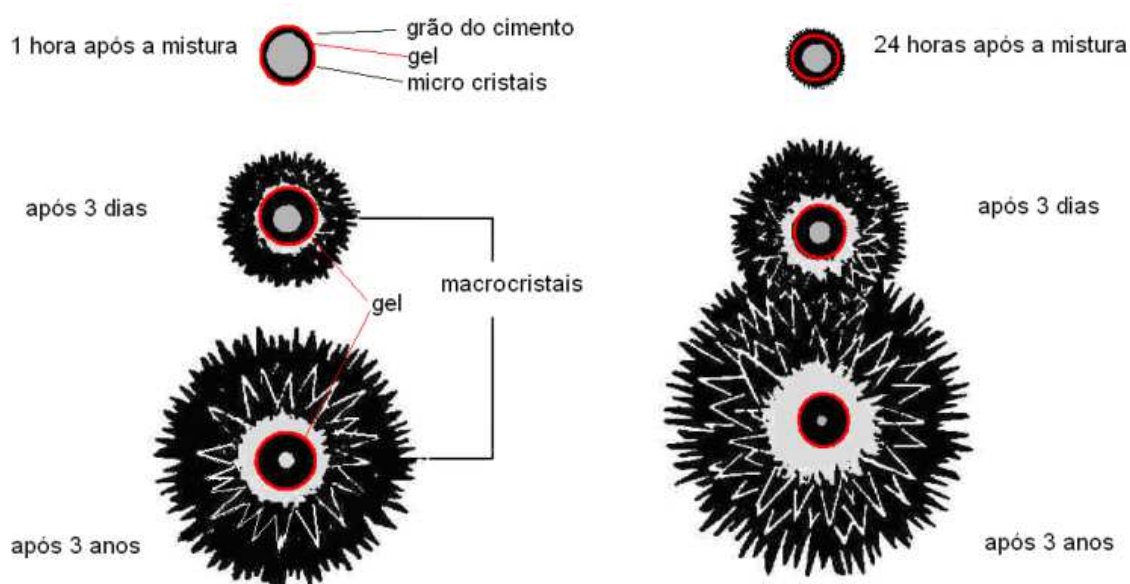
Estes dois elementos após serem associados formam os seguintes compostos abaixo:

- a) C_3S – Maior responsável pela resistência em todas as idades do cimento e responde pelo segundo lugar em importância no processo de liberação de calor. É o segundo componente que mais contribui para o tempo de pega;
- b) C_2S – Ganho de resistência em idades mais avançadas, além de proporcionar baixa liberação de calor quando hidratado, sendo esta hidratação de forma lenta. Possui pouca influência no tempo de pega;

- c) C_3A – Contribui para as resistências iniciais, especialmente no primeiro dia. Reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação. É responsável pela rapidez da pega;
- d) C_4AFe – Desenvolvimento lento e pequeno de resistência. Resiste bem ao ataque de sulfatos e contribui pouco para liberação de calor.

Na figura 1, é mostrado o desenvolvimento dos grãos de cimento quando hidratados.

Figura 1 – Processo de hidratação do grão de cimento



Fonte: Bezerra (2017).

Conforme a composição e ativos colocados no cimento e em função de seus percentuais, os cimentos apresentam várias denominações e classificações e siglas normatizadas conforme tabela 1.

Tabela 1 – Limites de composição de cimento Portland (porcentagem em massa).

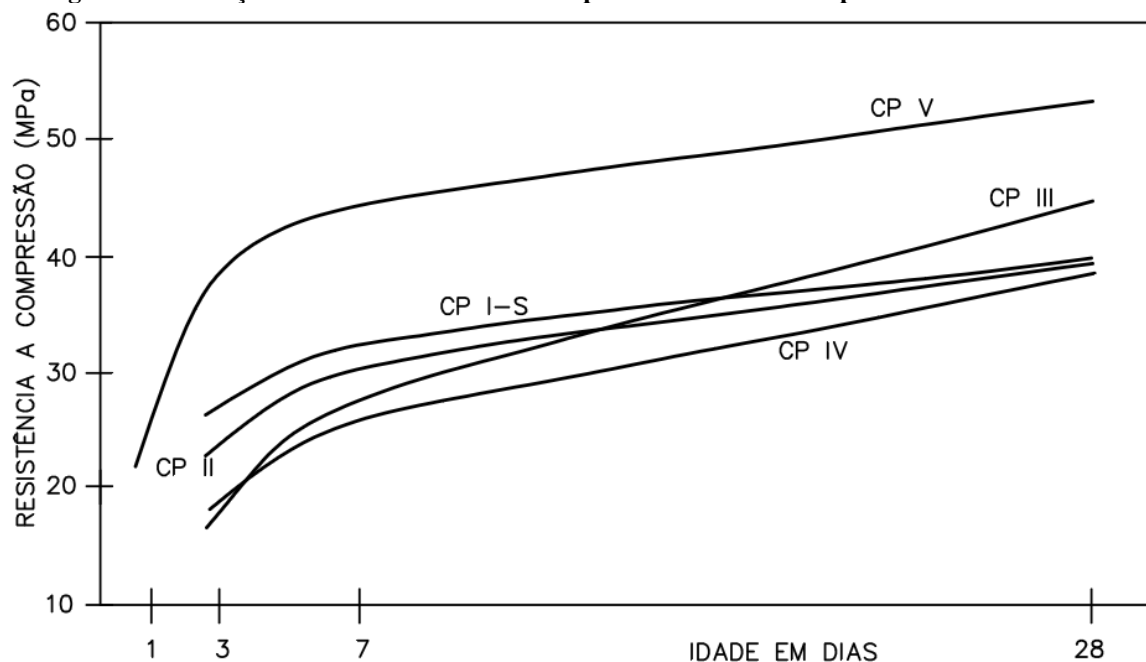
Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozzolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95-100	0	0-5	
		CP I-S			90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozzolânico		CP II-Z			71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno		CP III			25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozzolânico		CP IV			45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V*	ARI		90-100	0	0	0-10
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75-100	-	-	0-25
	Não estrutural		-	-	50-74	-	-	26-50

* No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto forno ou materiais pozzolânicos.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018, adaptado).

Na figura 2, são apresentas as curvas de resistência dos diversos tipos de cimento.

Figura 2 – Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.



Fonte: ABCP (1996, adaptado).

3.1.1.2 Agregado miúdo

Os agregados são formados por partículas minerais que são rígidas, compactas, estáveis, duráveis, limpas e livres de qualquer coisa que possa impactar a hidratação e solidificação do cimento. Os agregados finos podem ser divididos em três grupos diferentes. O primeiro consiste principalmente de areia natural. O segundo é proveniente da trituração de pedras, e os grânulos geralmente podem ter entre 4,8 mm e 0,075 mm de tamanho. E a terceira é uma mistura das duas anteriores.

Agregados contém grãos de vários tamanhos e devem ter uma boa distribuição granulométrica. Esta distribuição granulométrica deve ser segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022) bem como atender aos limites estabelecidos na tabela 2.

Tabela 2 – Limite de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de Malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS:

1 – O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

2 – O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

3 – O módulo de finura utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

Fonte: ABNT NBR 7211 (2019, adaptado).

Os materiais oriundos de áreas costeiras ou retirados de águas salobras, bem como aqueles em que exista a possibilidade de contaminação natural (como em regiões onde se encontram sulfatos naturais, como a gipsita) ou industrial (água do aquífero contaminada por efluentes), devem apresentar concentrações de cloretos e sulfatos que não ultrapassem os limites definidos na tabela 3.

Tabela 3 – Limites máximos para a expansão devidos à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados

Determinação	Método de ensaio	Limites
Reatividade álcali-agregado	ASTM C 1260	Expansão máxima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva
	ABNT NBR 9773 ¹⁾	Expansão máxima de 0,05% aos três meses
		Expansão máxima de 0,10% aos seis meses
Teor de cloretos ²⁾ (CL ⁻)	ABNT NBR 9917 ABNT NBR 148323)	< 0,2% concreto simples
		< 0,1% concreto armado
		<0,01% concreto protendido
Teor de sulfatos ⁴⁾ (SO ₄ ²⁻)	ABNT NBR 9917	< 0,1%

1) Ensaio facultativo, nos termos 5.3.2.

2) Agregados que excedam os limites estabelecidos para cloretos podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total trazido ao concreto por todos os seus componentes (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos), verificado por ensaio realizado pelo método ABNT NBR 14832 (determinação no concreto) ou ASTM C 1218, não exceda os seguintes limites, dados em porcentagem sobre a massa de cimento:

- ˆ - concreto rotendido ≤ 0,06%;
- ˆ - concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura ≤ 0,15%;
- ˆ - concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de
- ˆ - outros tipos de construção em concreto armado ≤ 0,30%;

3) O método da ABNT NBR 14832 estabelece como determinar o teor de cloretos em clínquer e cimento Portland. Neste caso específico, o método pode ser utilizado para o ensaio de agregados.

4) Agregados que excedem o limite estabelecido para sulfatos podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total trazido ao concreto por todos os seus componentes (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda 0,25 ou que fique comprovado o uso no concreto de cimento Portland resistente a sulfatos conforme a ABNT 5737.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2019, adaptado).

3.1.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo é definido como aquele que consiste em pedregulho ou brita provenientes de rochas firmes. As partículas desse tipo de material são retidas em uma peneira de 4,8 mm e conseguem passar pela peneira de 152 mm conforme as normas da ABNT. Na fabricação de concreto voltado para a construção civil, não se faz diferenciação entre o uso de britas ou pedregulhos; o único fator significativo a ser considerado é a qualidade dos agregados graúdos.

Os agregados graúdos devem ser robustos e isentos de impurezas. Ao contrário dos agregados miúdos, os graúdos necessitam de uma granulação consistente. Além disso, é fundamental que não ocorra segregação durante o armazenamento ou empilhamento, pois os grãos de maior tamanho tendem a se acumular na parte inferior das pilhas.

A distribuição granulométrica, definida conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022), procura seguir os limites indicados para o agregado graúdo constantes na tabela 4.

Tabela 4 – Limite de composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ¹⁾				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-		-	0 - 5
63 mm	-	-		-	5 - 30
50 mm	-	-		0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-		5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 ²⁾	87 - 100	95 - 100
19 mm	-	2 - 15 ²⁾	65 ²⁾ - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ²⁾ - 62 ²⁾	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ²⁾	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ - 65 ²⁾	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

1) Zona granulométrica correspondente a menos (d) e a maior (D) dimensões do agregado graúdo

2) Em cada Zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ²⁾. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2019, adaptado).

3.1.2 Preparo do concreto

O concreto é formado pela mistura de cimento, agregados graúdos, agregados miúdos, água e, quando necessário, aditivos que podem alterar ou agregar alguma propriedade ao concreto.

Ele apresenta algumas nomenclaturas dentro da fase de seu preparo, como: concreto fresco ou endurecido. O primeiro é aquele que está completamente misturado, mas que ainda se encontra no estado plástico e, com isto, ainda pode ser adensado e moldado; diferentemente do concreto endurecido, em que a mistura já se encontra no estado sólido e desenvolveu resistência mecânica.

Os concretos podem ser definidos como concretos pré-moldados, pré-fabricados ou moldados. Os pré-moldados são aqueles moldados previamente fora do local de utilização definitiva do elemento estrutural. Os concretos pré-fabricados são aqueles preparados em centrais industriais de concreto e transportados até as obras para serem moldados. Já os concretos moldados pelo executante da obra são aqueles preparados nos próprios canteiros de obra pelo construtor.

Os concretos podem ser categorizados em famílias e grupos de características que têm uma conexão com propriedades significativas e registradas. Em geral, uma família de concreto deve incluir misturas produzidas em uma mesma central que mantenham consistência dentro de um intervalo específico, utilizando cimentos da mesma categoria e classe de resistência, oriundos de um único fabricante ou unidade fabril, além de conter agregados com a mesma origem geológica, tipo e tamanho, conforme estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015).

A preparação do concreto deve incluir as seguintes fases: a caracterização dos materiais que compõem o concreto, pesquisa de dosagem do concreto, ajuste e validação da mesma mistura e a produção do concreto (que começa quando os materiais são recebidos e armazenados). Isso inclui a medição e mistura dos componentes, bem como as quantidades que são utilizadas, mas mantendo o controle dessas quantidades para garantir que as proporções atendam às especificações e à composição.

A NBR 12655 (ABNT, 2015) especifica que os materiais na mistura de concreto não devem conter elementos prejudiciais que possam reduzir sua durabilidade ou ter efeito corrosivo nas armaduras. Além disso, os materiais devem ser adequados para uso e para o propósito para o qual o concreto será utilizado.

A formulação do concreto e a seleção dos materiais que irão formá-lo deve atender aos requisitos estabelecidos para o concreto nas fases fresca e endurecida: a consistência, sua densidade, resistência, durabilidade e a proteção das barras de aço contra a corrosão.

3.1.3 Preparo da argamassa

As argamassas são constituídas por aglomerantes, areia, água e, quando necessário, pode conter aditivos assim como o concreto. Segundo Fiorito (1994, *apud* Ferreira, 2010), a aplicação da argamassa define o tipo de aglomerante ou a combinação entre diferentes aglomerantes. Esses materiais são amplamente utilizados em alvenarias, revestimentos e na produção de concretos, devido à sua capacidade de endurecimento. Também podem ser empregados em chapiscos e em situações que exigem impermeabilidade, como em reservatórios de água e obras hidráulicas.

A argamassa presente no concreto desempenha um papel muito importante na definição de suas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade. Composta essencialmente por cimento, agregados miúdos e água, a argamassa é responsável pela

coesão da mistura, garantindo aderência entre os componentes e influenciando diretamente na resistência e trabalhabilidade do concreto. A argamassa no concreto pode ser vista como uma mistura que envolve os agregados graúdos, conferindo homogeneidade e influenciando na resistência do concreto. A proporção entre os componentes da argamassa tem efeito direto na resistência à compressão do concreto, proporcionando concretos mais duráveis e sustentáveis, além de atuar na proteção dos agregados graúdos, ajudando também na proteção contra agentes agressivos. A argamassa é um componente fundamental do concreto e exerce influência direta sobre suas propriedades e desempenho estrutural.

3.1.4 Características

O concreto, assim como os materiais de construção civil, deve apresentar algumas características que dependem das circunstâncias em que as obras se desenvolvem. O concreto apresenta uma durabilidade natural significativa devido às suas propriedades físico-químicas que o tornam similar às rochas naturais. No entanto, por ser um material essencialmente poroso, é fundamental compreendê-lo adequadamente para assegurar sua durabilidade. Especificamente, as ameaças dos sulfatos ao concreto e dos cloretos ao aço, bem como os efeitos da poluição ambiental, devem ser analisadas com rigor desde a fase de projeto (Fusco, 2008).

A durabilidade das estruturas de concreto reside na indústria do concreto: seu processo de fabricação em fábrica, os materiais utilizados e como ele pode resistir a ataques ambientais. A agressão ao concreto em termos físicos e químicos varia. A maioria desses ataques é causada por elementos externos que passam através dos poros e das rachaduras no concreto. Existem dois fatores que contribuem para essa vulnerabilidade: a água armazenada no concreto, bem como o oxigênio no ar.

As agressões comuns que ameaçam a integridade do concreto estão, de maneira geral, ligadas a fenômenos expansivos que ocorrem dentro da massa de concreto já solidificado, ou à desintegração dos produtos resultantes da hidratação do cimento (Fusco, 2008).

As principais agressões físicas no concreto são provocadas por fenômenos de erosão, como a abrasão, que resulta do desgaste superficial causado pelo atrito de sólidos que se movem sobre sua superfície. Além disso, a erosão por cavitação ocorre devido à implosão de bolhas de vapor d'água próximas à superfície da estrutura. Esse fenômeno é comum em escoamentos líquidos com áreas de alta e baixa pressão; nas zonas de baixa pressão, formam-

se bolhas que, ao serem levadas para regiões onde a pressão líquida supera a pressão de vapor, implodem, causando um efeito erosivo significativo. Outro processo relevante é o fraturamento decorrente do congelamento da água, que resulta em um aumento de volume aproximado de 9% durante a transição da água para o gelo. Se a porosidade do concreto não for suficiente para acomodar essa expansão volumétrica, isso levará ao fraturamento do material.

As agressões químicas de maior importância podem ser oriundas dos fenômenos de:

- a) A solubilização dos componentes do concreto ocorre em presença de águas ácidas, resultante da conversão dos compostos de cálcio presentes no concreto curado (Ca(OH)_2 , C_3S , C_2S , C_3A) em sais de cálcio originados do ácido agressivo (Fusco, 2008).

Os ácidos que são especialmente nocivos são aqueles que geram sais solúveis em água, possibilitando a continuidade do ataque até a completa destruição do concreto. No entanto, se os sais produzidos forem insolúveis, a reação agressiva se interrompe após o primeiro ataque devido à impermeabilização causada pelos sais já formados. Quando uma estrutura de concreto está submersa em águas ácidas paradas, a solubilização dos compostos de cálcio contidos no cimento só pode ocorrer caso o concreto apresente uma porosidade excessiva, resultado de uma execução inadequada (Fusco, 2008).

- b) A ação das águas sulfatadas, ao contrário do que ocorre com as águas ácidas que danificam todos os componentes do cimento, afeta exclusivamente o C_3A .

Para se proteger contra o ataque de sulfatos, é necessário reduzir a quantidade de C_3A no cimento por meio da adição de óxido férrico, resultando na formação do C_4AFe , que possui alta resistência aos ataques químicos. No entanto, os cimentos projetados para serem resistentes aos sulfatos não devem eliminar completamente o C_3A , uma vez que o aluminato tricálcico desempenha um papel importante na mitigação dos efeitos dos íons cloreto sobre as armaduras de aço incorporadas no concreto (Fusco, 2008).

- c) A reação entre álcalis e agregados ocorre quando os álcalis presentes no cimento reagem com determinados componentes de certos agregados, resultando em um fenômeno expansivo. A pozolana atua como um agente inibidor da expansão subsequente no concreto já solidificado, pois induz a reação entre álcalis e sílica logo

durante a mistura do concreto, consumindo assim os álcalis do cimento (Fusco, 2008).

Além dos agentes citados acima, o gás carbônico e os íons cloreto têm ação de muita importância na agressão às armaduras no interior do concreto.

A agressividade ambiental diz respeito às influências físicas e químicas que afetam as estruturas de concreto. Essas influências ocorrem independentemente dos impactos mecânicos, das alterações volumétricas resultantes de variações térmicas, da retração hidráulica e de outros elementos considerados no cálculo das estruturas de concreto. A tabela 5 apresenta as categorias de agressividade ambiental que devem ser levadas em conta nos projetos de concreto armado, visando reduzir esses impactos sobre as estruturas.

Tabela 5 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾ Industrial ^{1), 2)}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)} Respingos de maré	Elevado

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, adaptado).

3.3 Caracterização do problema

3.3.1 Fissuras

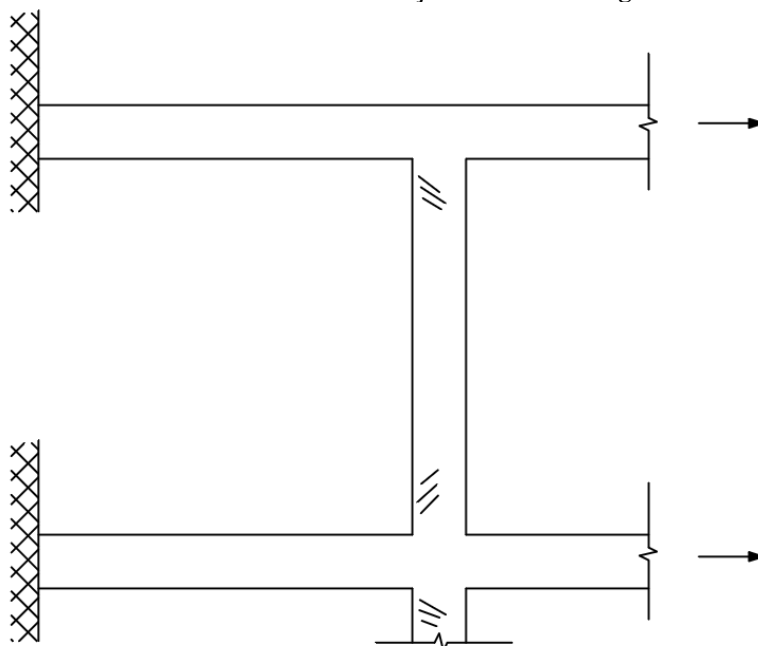
As fissuras são um tipo comum de patologia nas edificações e elementos estruturais em geral, e estas podem interferir na estética, durabilidade e características estruturais das obras. Tanto em alvenarias como em estruturas, as fissuras são originárias de tensões que atuam nos materiais.

As fissuras podem estar ligadas às situações (1) internas ou (2) externas. Dentre as ações externas, podemos citar as movimentações (1a) térmicas, (1b) higroscópicas, (1c) sobrecargas e (1d) recalque nas fundações. Entre as ações internas, as fissurações estão relacionadas à (2a) retração dos produtos à base de cimento e às (2b) alterações dos materiais utilizados (Medeiros, 2010).

As (1a) movimentações térmicas ocorrem devido às variações de temperatura diárias e sazonais, que provocam alterações dimensionais nos materiais de construção, manifestadas por dilatação ou contração. Essas variações podem gerar tensões internas capazes de originar fissuras nos elementos estruturais. A magnitude dessas tensões está relacionada às propriedades físicas dos materiais, à amplitude das variações térmicas e ao grau de restrição imposto pelas ligações entre os elementos estruturais.

As fissuras também podem surgir em decorrência de movimentações térmicas diferenciadas entre componentes e elementos de um mesmo sistema estrutural ou ainda em diferentes regiões de um mesmo material, conforme ilustrado na figura 3. Essas movimentações podem ocorrer pela associação de materiais com coeficientes de dilatação térmica distintos submetidos à mesma variação de temperatura, por diferentes condições de exposição térmica entre elementos ou pela existência de gradientes de temperatura ao longo de um mesmo componente estrutural (Thomaz, 1996).

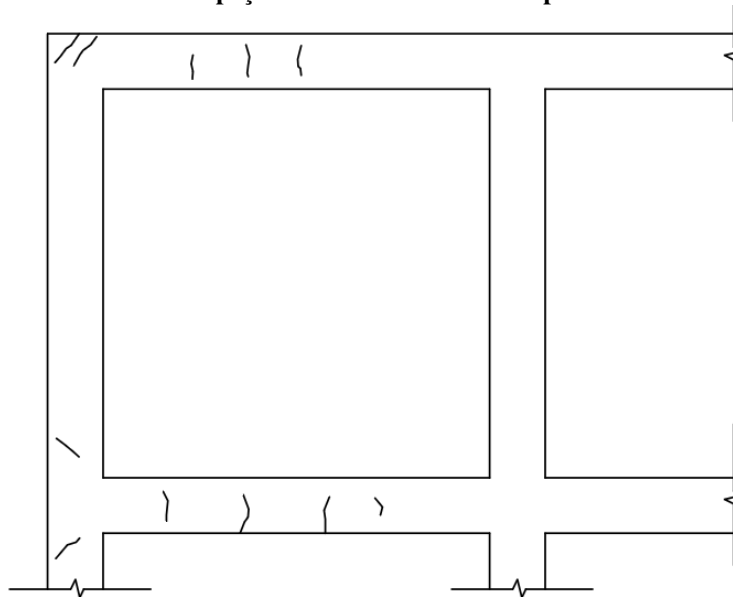
Figura 3 – Pilar fissurado devido à movimentação térmica nas vigas de concreto armado



Fonte: Adaptado de Thomaz (1996).

As (1b) variações higroscópicas provocam fissuras nos elementos estruturais devido às alterações dimensionais dos materiais porosos que formam os componentes da construção. O aumento da umidade causa a expansão do material, enquanto sua diminuição leva à contração. Quando existem ligações que restringem ou impedem essas movimentações, fissuras podem ocorrer nos elementos e componentes construtivos, como demonstrado na figura 4 (Thomaz, 1996).

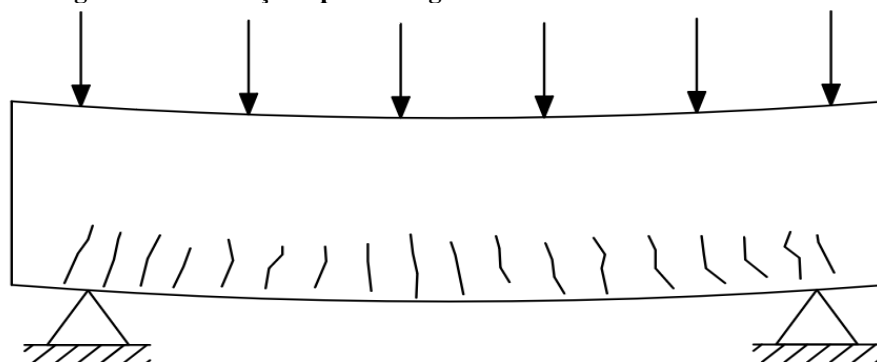
Figura 4 – Trincas em peças estruturais devido à expansão dos materiais



Fonte: Adaptado de Thomaz (1996).

As fissuras em elementos estruturais, como pilares, vigas e paredes, podem estar associadas à (1c) atuação de sobrecargas. Essas solicitações podem ter sido previstas em projeto, porém resultar de falhas de dimensionamento ou de execução. Além disso, podem ocorrer quando o elemento estrutural é submetido a carregamentos superiores aos considerados no projeto (Thomaz, 1996). De modo geral, as tensões responsáveis pelo surgimento de fissuras tendem a se redistribuir ao longo do elemento fissurado e também entre os elementos estruturais adjacentes. Dessa forma, os esforços passam a ser absorvidos de maneira global pela estrutura. Assim, a ocorrência de sobrecargas, previstas ou não em projeto, pode provocar fissuras em elementos de concreto armado sem necessariamente causar a ruptura do componente ou a instabilidade estrutural, conforme ilustrado na figura 5. Entretanto, em determinadas situações, a redistribuição das tensões não ocorre de forma suficiente, podendo comprometer a estabilidade da estrutura (Thomaz, 1996).

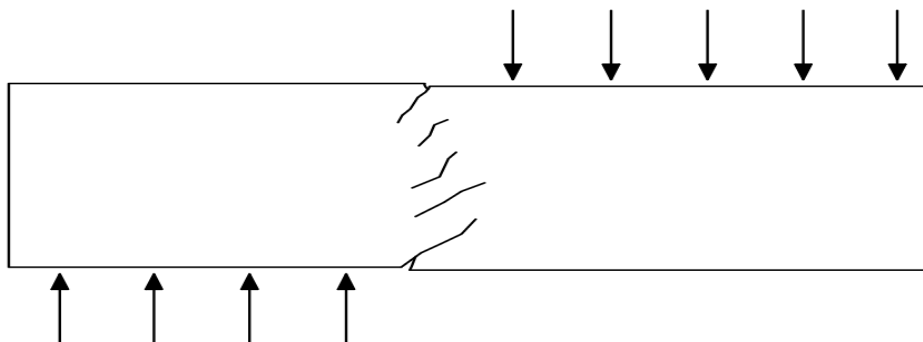
Figura 5 – Fissuração típica de vigas sub-armadas solicitadas a flexão.



Fonte: Adaptado de Thomaz (1996).

A figura 6 apresenta (1d) fissuras decorrentes de recalques diferenciais. Essas fissuras apresentam características semelhantes às causadas pela flexão de elementos estruturais, porém costumam apresentar aberturas maiores e inclinação voltada para a região onde ocorreu o maior recalque. Também podem ser observados esmagamentos localizados em forma de escamas. Em situações de recalques mais intensos tornam-se evidentes variações significativas na abertura das fissuras (Thomaz, 1996).

Figura 6 – Fundações contínuas solicitadas por carregamentos desbalanceados.

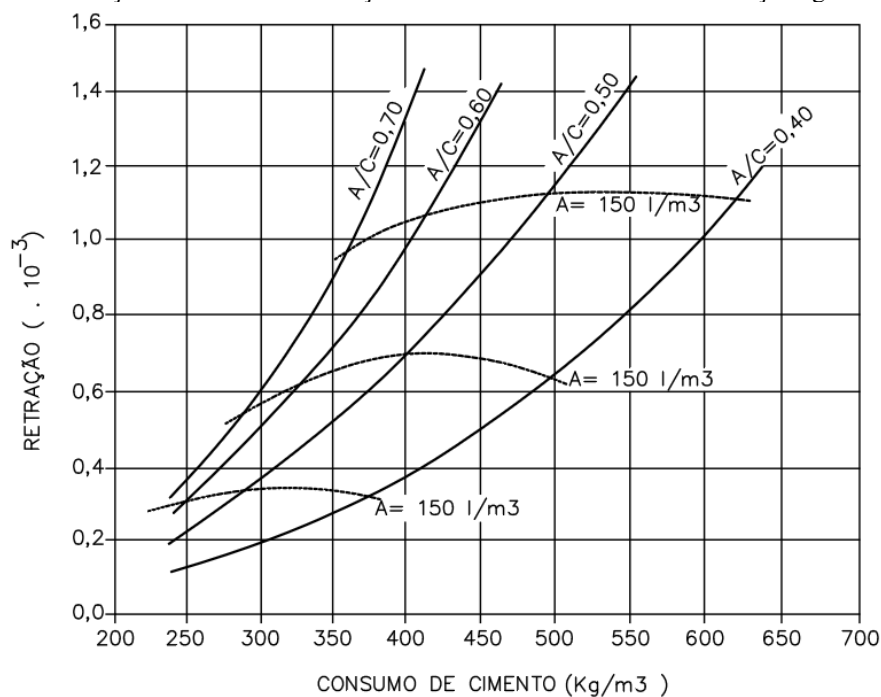


Fonte: Adaptado de Thomaz (1996).

Dentre as ações internas, primeiro, tem-se a formação de (2a) fissuras por retração em uma viga de concreto armado, que está relacionada à proporção do concreto, especialmente ao fator água/cimento. O processo de hidratação do cimento envolve a conversão de compostos anidros, que são mais solúveis, em compostos hidratados que possuem menor solubilidade. Em média, uma relação água/cimento de aproximadamente 0,40 é suficiente para que o cimento se hidrate completamente. Em função da trabalhabilidade, os concretos e as argamassas são preparados com água em excesso, o que

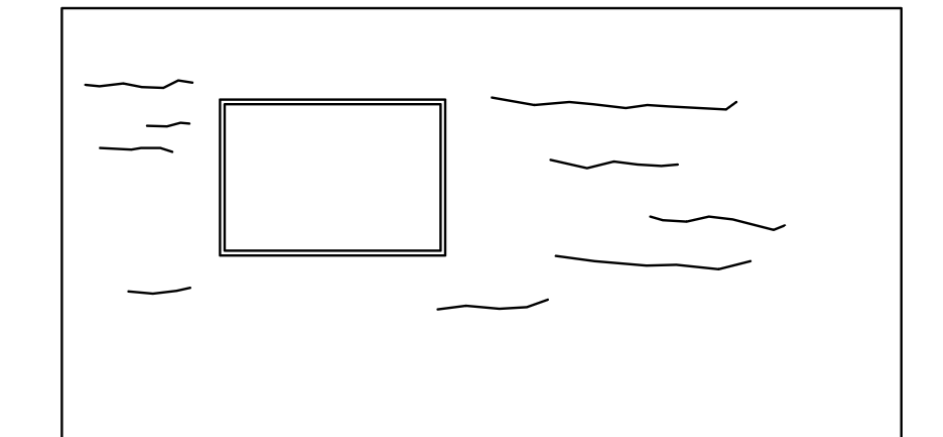
acentua sua retração, que pode ser retração química, retração por secagem e retração por carbonatação. Estas retrações ocorrem com o concreto endurecido ou em fase de endurecimento. A figura 7 apresenta a retração baseada no fator água/cimento da mistura.

Figura 7 – Retração do concreto em função do consumo de cimento e da relação água/cimento



Como segundo fator de ação interna cita-se a (2b) fissuração por agentes químicos, que se dá quando os materiais de construção sofrerem alterações químicas indesejáveis. Os três tipos mais frequentes são: a hidratação lenta de cales, a agressão por sulfatos e a corrosão das armaduras. Na produção de componentes ou elementos que contenham cales mal hidratadas, se houver um aumento da umidade ao longo da vida útil do componente, é provável que os óxidos livres se hidratem, resultando em uma expansão do volume de cerca de 100%. Essa expansão pode levar ao surgimento de fissuras semelhantes às causadas pela dilatação térmica ou higroscópica, conforme ilustrado na figura 8 (Thomaz, 1996).

Figura 8 – Fissuras horizontais no revestimento provocadas por expansão da argamassa de assentamento



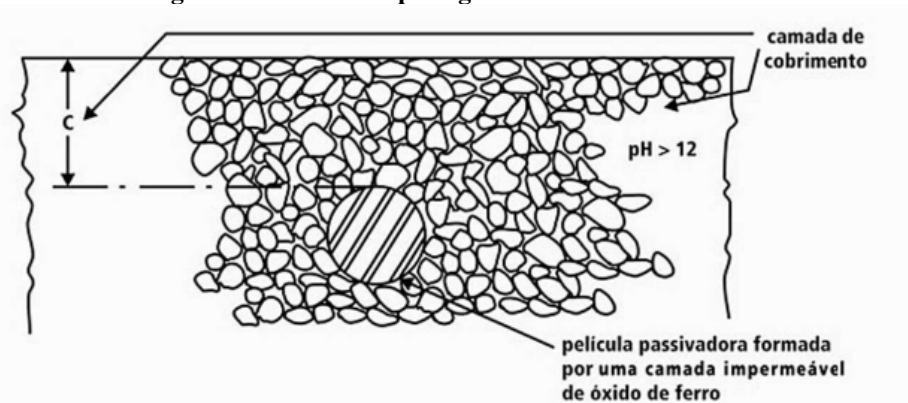
Fonte: Adaptado de Thomaz (1996).

3.3.2 Corrosão

As armaduras de aço contidas na estrutura de concreto são resguardadas da corrosão devido ao fenômeno conhecido como passivação do aço, que ocorre em razão da elevada alcalinidade do ambiente. O pH da água presente nos poros pode ultrapassar 12,5. Em tais condições alcalinas, uma fina camada impermeável de óxido de ferro se forma na superfície das barras de aço, conhecida como película passivadora.

A corrosão das armaduras no interior do concreto só poderá acontecer se a película passivadora for comprometida. Essa degradação pode ocorrer de forma generalizada devido à diminuição do pH para menos de 9, que pode ser causada pela carbonatação da camada protetora da armadura, influenciada pela presença de íons cloreto (Cl^-); pela poluição atmosférica que ultrapassa um limite crítico; ou ainda pela lixiviação do concreto em condições em que fluxos de água permeiam a massa (Fusco, 2008). A figura 9 abaixo apresenta um esquema de uma armadura protegida no interior do concreto.

Figura 9 – Armadura protegida no interior do concreto



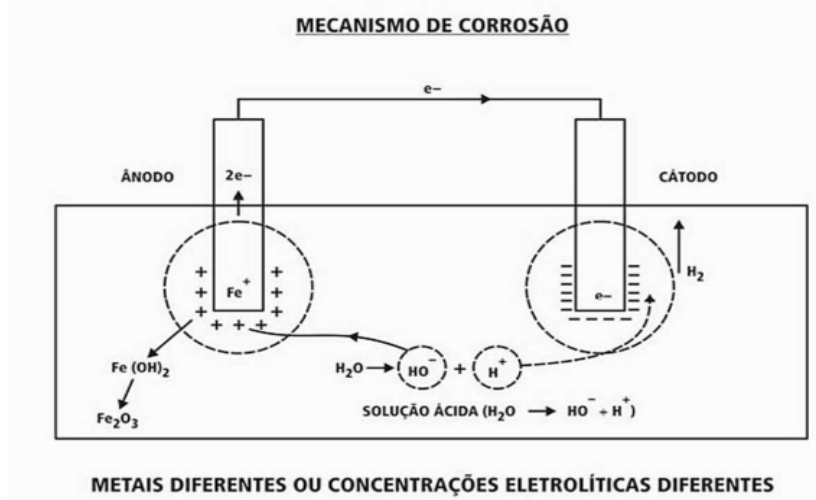
Fonte: Fusco (2008).

A corrosão dos metais pode ocorrer, essencialmente, através de dois processos distintos: um em ambiente ácido, na presença de diferentes metais (como mostrado na figura 10); e o outro em meio alcalino ou neutro (ilustrado na figura 11), resultante de uma oxidação diferencial entre diferentes áreas do mesmo metal. Em ambos os casos, duas reações eletrolíticas se desenvolvem, sendo uma anódica e a outra catódica.

Na reação anódica, o ferro adquire uma carga elétrica positiva e se dissolve à medida que os íons Fe^{++} entram na solução. Por outro lado, na reação catódica, o ferro atua apenas como um eletrodo, permitindo que os elétrons liberados pelo ânodo se transfiram para a solução, completando assim o circuito elétrico. Não ocorre consumo de ferro no cátodo.

No processo de corrosão em ambientes ácidos, ocorre a ionização da água. Os íons H^+ movem-se em direção ao cátodo, onde são neutralizados, resultando na liberação de hidrogênio que se transforma na forma molecular H_2 . Por outro lado, os íons $(\text{OH})^-$ se deslocam para o ânodo, onde reagem com os íons Fe^{++} dissolvidos, originando o $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Este composto passa por uma série de reações intermediárias que culminam na formação da ferrugem, cuja composição básica é o Fe_2O_3 (Fusco, 2008).

Figura 10 – Mecanismo de corrosão em meio ácido com emprego de dois metais diferentes



Fonte: Fusco (2008).

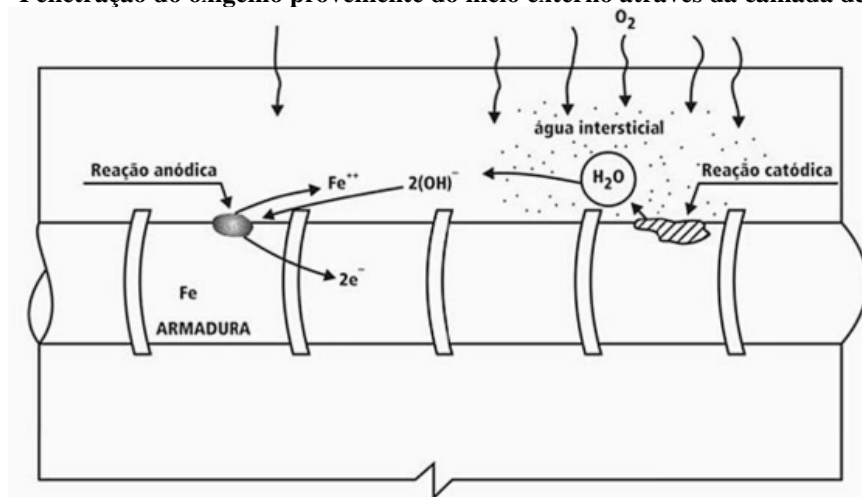
Figura 11 – Mecanismo de corrosão em meio alcalino



Fonte: Fusco (2008).

Para que as armaduras de aço embutidas no concreto apresentem corrosão, é necessário que haja umidade e oxigênio ao seu redor, uma vez que o ambiente onde estão inseridas possui características alcalinas. O oxigênio do ambiente penetra por difusão através da camada de cobrimento, alcançando o metal e causando corrosão caso a película passivadora tenha sido danificada, conforme ilustrado na figura 12 (Fusco, 2008).

Figura 12 – Penetração do oxigênio proveniente do meio externo através da camada de cobrimento

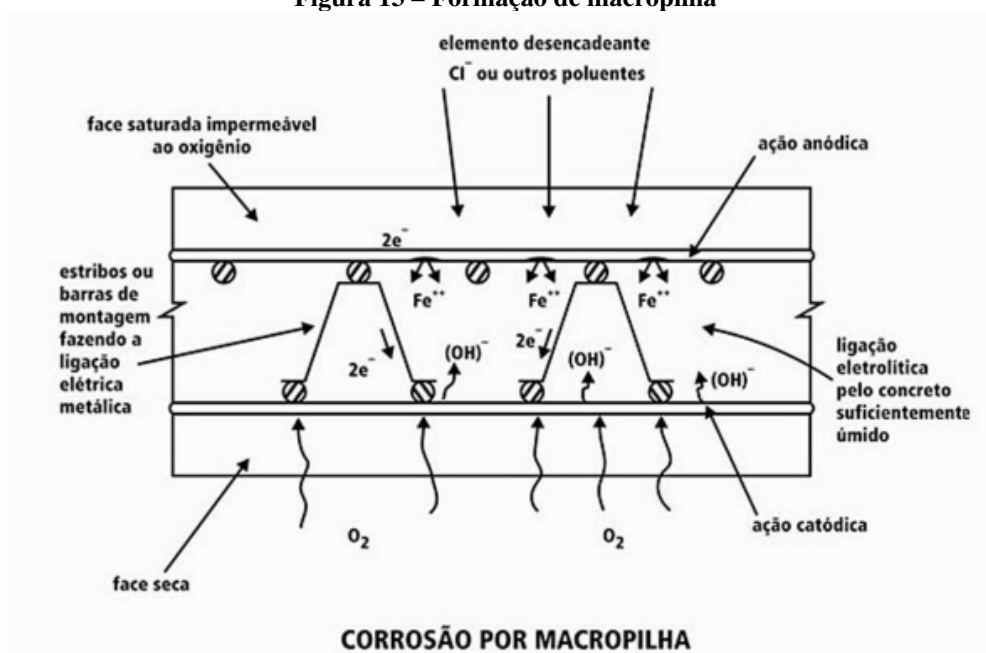


Fonte: Fusco (2008).

A água necessária para a manutenção da reação eletrolítica provém da umidade presente na rede capilar. A oxidação do ferro não consome a água envolvida, o que impede o bloqueio da própria reação. Enquanto o oxigênio puder atingir o metal, através da difusão pela camada de cobertura e pela película passivadora danificada, a corrosão continuará. Assim, é essencial que água e oxigênio estejam presentes simultaneamente para ocorrer corrosão. Se o concreto estiver completamente seco ou saturado, a corrosão não ocorrerá. Na prática, a condição de saturação total só se verifica quando a água exerce uma pressão positiva superior à pressão parcial do oxigênio na atmosfera. Essa pressão hidrostática positiva corresponde aproximadamente a uma coluna d'água de cerca de 1,5 metro (Fusco, 2008).

Uma condição de macropilha, conforme ilustrado na figura 13, pode surgir quando determinadas partes da estrutura estão expostas a fatores climáticos enquanto outras permanecem protegidas, decorrente de distintas características construtivas. Isso é comum em elementos estruturais que possuem uma face exposta ao ambiente externo e a outra voltada para o interior do edifício. Esse tipo de corrosão é especialmente frequente em estruturas de concreto aparente. É crucial notar que a formação da ferrugem, predominantemente composta por Fe_2O_3 , resulta em uma reação expansiva. O início do processo corrosivo está associado à fissuração do concreto na camada de revestimento, o que intensifica ainda mais a corrosão. O fundamental é prevenir o início da corrosão, já que sua gravidade tende a aumentar com o passar do tempo (Fusco, 2008).

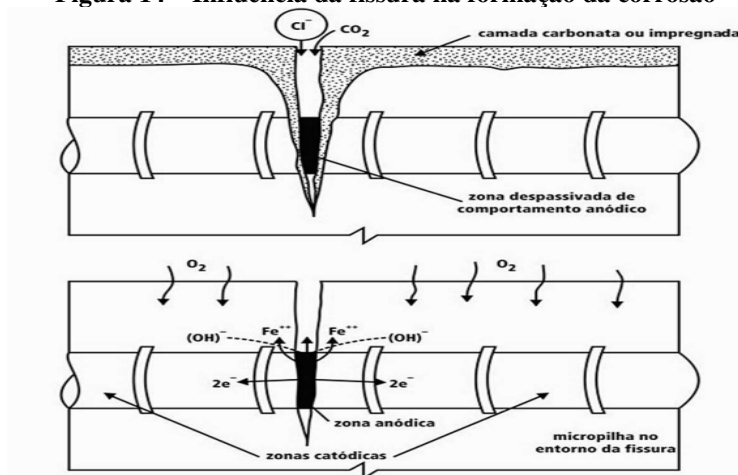
Figura 13 – Formação de macropilha



Fonte: Fusco (2008).

A baixa resistência à tração do concreto implica que, em estruturas de concreto armado convencional não protendido, é comum a ocorrência de fissuras nas áreas sujeitas à tração. Já no caso do concreto protendido, admite-se atualmente uma leve possibilidade dessa situação em construções localizadas em ambientes com baixa agressividade, resultando na criação do concreto parcialmente protendido. O surgimento de fissuras representa um risco maior para as armaduras em comparação ao que normalmente se observa devido à porosidade do concreto da camada de cobrimento, conforme ilustrado na figura 14 (Fusco, 2008).

Figura 14 – Influência da fissura na formação da corrosão



Fonte: Fusco (2008).

A abertura de fissuras pode resultar na despassivação local da armadura, o que agrava as condições de carbonatação e a penetração do concreto por íons cloreto ou outros poluentes. Isso, por sua vez, facilita a formação de micropilhas eletrolíticas, desde que haja oxigenação e umidade adequadas. É crucial observar que elas só poderão ser seladas através da injeção de materiais apropriados, especialmente no caso do concreto protendido, uma vez que fissuras significativas se formem. O desgrenamento dos agregados durante o processo de fissuração não poderá ser revertido por forças de compressão posteriores (Fusco, 2008).

Dependendo do ambiente em que as estruturas estão expostas, existe uma limitação para a abertura destas fissuras. A tabela 6 apresenta esta limitação de abertura em concreto armado.

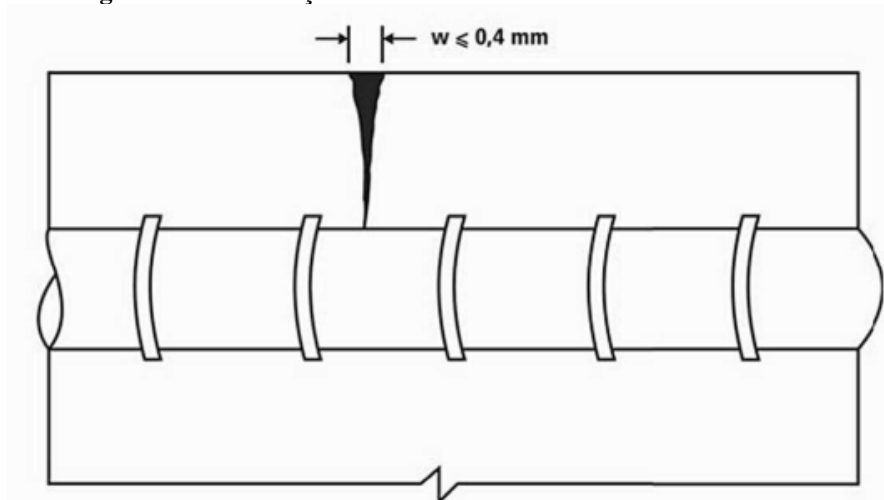
Tabela 6 – Abertura máxima das aberturas em concreto armado (não protendido) em função do grau de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Exigências referentes à fissuração	Combinações de ações em serviço a utilizar
I	ELS.W $w \leq 0,4$ MM	Combinação frequente
II A III	ELS.W $w \leq 0,3$ MM	
IV	ELS.W $w \leq 0,2$ MM	

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014, adaptado).

As aberturas máximas permitidas para fissuras na superfície de peças de concreto armado comum, com $W \leq 0,4$ mm, são fundamentadas na suposição de que tais fissuras se estendem até a camada que cobre a armadura, reduzindo sua largura até que estejam completamente fechadas em contato com as barras de aço da armadura, como ilustrado na figura 15.

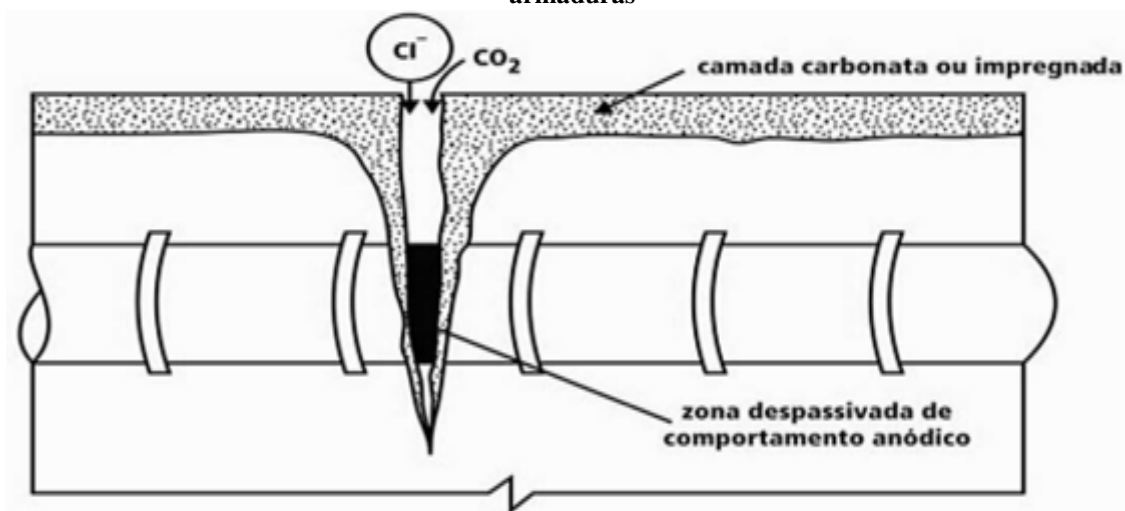
Figura 15 – Penetração das fissuras no cobrimento das armaduras



Fonte: (Fusco, 2008)

Quando as aberturas máximas permitidas ultrapassam o limite estabelecido, elas atingem as armaduras e rompem a camada passivadora que fora criada ao redor da armadura, fazendo com que o processo de oxidação seja iniciado e, com isso, o surgimento das manifestações patológicas, conforme ilustrado na figura 16.

Figura 16 – Abertura da fissura além do limite estabelecido por norma e com penetração atingindo as armaduras



Fonte: Fusco (2008).

3.3.3 Recuperação estrutural

Qualquer processo de remoção de concreto em estruturas deve ser iniciado somente após a confirmação da estabilidade do elemento estrutural. Após a conclusão da remoção, a superfície do concreto remanescente precisa estar em boas condições para assegurar a

aderência com o novo concreto, argamassa cimentícia ou graute que será aplicado. A remoção é classificada como superficial quando a camada removida não ultrapassa o cobrimento da armadura, e profunda quando excede tanto o cobrimento quanto a própria armadura. A eliminação do concreto deteriorado pode ser realizada através de métodos mecânicos, térmicos ou químicos, conforme a localização, a extensão e a espessura da camada de concreto que se deseja remover.

Entre esses métodos, os mecânicos são os mais comuns e incluem: remoção com ponteiros ou cinzéis, uso de rompedores, jateamento de areia e jateamento de água em alta pressão. Dentre todos os métodos mecânicos disponíveis, o jateamento de água em alta pressão, conhecido como hidrodemolição, é considerado o mais eficaz por remover rapidamente e com seletividade o material danificado, sem causar microfissuras.

A substituição de concreto em grandes superfícies deve ser realizada da mesma maneira que ocorre na edificação da estrutura. Contudo, é crucial levar em conta as especificidades da conexão entre os concretos antigo e novo, garantindo que sejam abordadas adequadamente para assegurar a qualidade da junção.

A escolha do material para a recuperação é determinada por vários fatores, como o volume de concreto a ser substituído, a profundidade do reparo, as cargas que incidem sobre ele e as condições de acesso e manuseio no local. O concreto empregado na reparação deve ter propriedades finais semelhantes às do concreto já presente na estrutura, abrangendo resistência, módulo de elasticidade e fluência. Vale ressaltar que qualquer tipo de reparo pode resultar em marcas visíveis na estética da estrutura. Assim, deve-se levar em conta a possível necessidade de aplicar acabamentos para reduzir o contraste entre a parte original e os reparos realizados.

A eliminação de corrosão em armaduras de concreto armado, cabos de protensão, ancoragens, suportes metálicos e outros componentes pode ser realizada com escovas de aço, lixas manuais ou mecânicas e jatos de areia, dependendo da gravidade do dano. É essencial que a remoção inclua também a camada contaminada do concreto. Após esse processo, deve-se avaliar se houve perda na seção das armaduras, uma vez que qualquer redução superior a 10% requer a adição de armadura suplementar devidamente fixada.

A prevenção ou, ao menos, o controle da corrosão nas armaduras pode ser alcançado por meio de um planejamento mais detalhado, especificações mais estritas e a utilização de materiais apropriados. Entre os aspectos que poderiam reduzir os problemas relacionados à corrosão estão:

- a) evitar o uso de metais distintos ou a presença de metais enterrados em solos variados, a fim de prevenir a circulação de correntes galvânicas;
- b) selecionar materiais apropriados que resistam à agressividade do ambiente, particularmente em edificações de aço;
- c) utilizar revestimentos protetores nas partes que entram em contato com a água ou o solo.

A tratativa das fissuras deve aguardar a identificação precisa de suas causas. Elas podem ser categorizadas em duas classes diferentes, o que auxiliará na determinação do tipo de reparo necessário. São elas:

- a) fissuras inativas ou mortas: aquelas cujas aberturas permanecem estáticas, sem aumentar, diminuir ou expandir em tamanho;
- b) fissuras ativas: aquelas que permanecem suscetíveis a movimentações.

Para impedir a penetração de águas superficiais, é suficiente escovar a fissura e comprimir uma argamassa de cimento e areia, ou alargar a fissura em forma de V e recompor a superfície também com argamassa de cimento e areia. Existem hoje formulações com resina epóxi que endurecem até em locais úmidos ou em presença do concreto fresco, podendo estas serem utilizadas nas interfaces entre os dois concretos (velho e novo).

Para fissuras ativas de pequenas dimensões, é possível realizar o reparo por meio da injeção de resina epóxi. As injeções devem ser efetuadas utilizando purgadores posicionados a uma distância que corresponda a uma vez e meia a profundidade da fissura, garantindo que os intervalos estejam devidamente selados. É importante assegurar que a mistura do epóxi com o endurecedor, que adquire viscosidade imediatamente após a combinação, seja aplicada dentro do seu pot-life, ou seja, dentro do prazo máximo para sua utilização.

Para fissuras ativas de grandes dimensões, elas podem ser consideradas como juntas móveis, e os reparos devem prever possíveis aumentos de tamanho. O processo de tratamento começa com a criação de uma cavidade ao longo da fissura, a qual deve ser preenchida com um selante elástico apropriado, como mastiques, termoplásticos ou elastômeros.

3.3.4 Custos e dificuldades na reparação

Materiais cimentícios, neste caso o concreto, são usados em pontes, edifícios, barragens e até mesmo no subsolo. Na Europa, por exemplo, estima-se que 50% do valor anual estimado para construção seja gasto na reabilitação e reparação de estruturas de concreto existentes (Cailleux; Pollet, 2009). Nos EUA, consertar infraestrutura de concreto representa um mercado de trilhões de dólares (Frank, 2017). Por exemplo, apenas as pontes têm um custo estimado entre US\$ 20 bilhões e US\$ 200 bilhões em custos de reconstrução, juntamente com um custo médio anual de manutenção de US\$ 5,2 bilhões (Tyagi *et al.*, 2024; Yunovich; Thompson, 2003).

Considerando a vida útil das estruturas, obras como pontes e obras de arte permanente poderão ser considerados períodos de 50, 75 ou até superiores a 100 conforme tabela 7 (Helene, 1993).

Tabela 7 – Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas

Tipos de estrutura	Vida útil de projeto (VUP) mínima				
	BS 7453 (1992)	ISSO 2394 (1998)	Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)	NBR 15575 (2013)	Fib 53 (2010)
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	-	≥ 120 anos

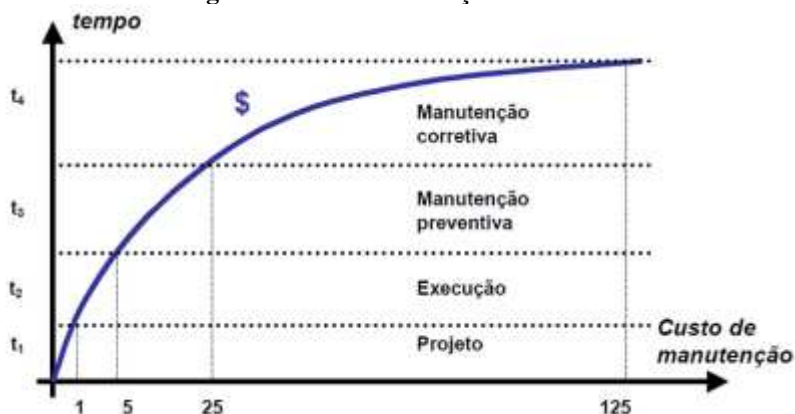
Fonte: Bezerra (2017, adaptado).

Quando se trata de peças em concreto armado, tem-se o aço como elemento que melhora significativamente o desempenho das estruturas; porém, o concreto armado apresenta desvantagens expressivas, sendo a principal delas a corrosão do aço. A corrosão do vergalhão pode levar a fissuras, resultando em redução de resistência, e os reparos e a manutenção dessas estruturas envolvem custos elevadíssimos, especialmente em ambientes extremos, incluindo ambientes aquáticos e marinhos como os encontrados em barragens. Outra barreira associada aos reparos é a fraca ligação entre os materiais estruturais originais (concreto envelhecido e vergalhões) e o material de reparo (Roulin-Moloney; Berchten, 1987).

Ao se projetar uma obra, deve-se fazer uma avaliação do montante a ser gasto nos trabalhos de manutenção durante a vida útil da obra (Meira; Padaratz, 2002). Os valores para recuperação de estruturas geralmente são elevados, principalmente em casos com

agravamento da patologia. De acordo com diversos estudos de casos, nota-se que a manutenção corretiva é exponencialmente maior do que a prevenção nas etapas iniciais de projeto e de execução, o que está apresentado na figura 17.

Figura 17 – Lei da evolução de custos



Fonte: Helene (2004).

Portanto, notadamente, as ações executadas ainda em fase de projeto podem ser consideradas as mais apropriadas, mesmo que impliquem acréscimo no valor final da obra. Isso porque aumentam a vida útil das construções e prolongam o tempo sem necessidade de manutenção, principalmente se comparadas à recuperação das estruturas com a patologia em estado avançado.

A capacidade de autorreparação de fissuras na infraestrutura construída reduzirá significativamente a pegada de carbono e os custos, reduzindo, assim, a frequência da manutenção necessária, além de prolongar a vida útil das estruturas. Ao se pensar em novas formulações para o cimento, pesquisadores e engenheiros precisam levar em consideração que o custo do cimento é muito baixo, e a introdução de aditivos pode aumentar drasticamente seu custo. No entanto, a economia do ciclo de vida é o que precisa ser considerado ao propor novas formulações para aumentar a durabilidade de materiais cimentícios e de concreto.

3.4 Concreto autorregenerativo

3.4.1 Conceito de concreto autorreparável ou autocicatrizante

Cada tipo de concreto possui uma capacidade de vedação de fissuras. A capacidade da chamada reparação autógena está relacionada ao conteúdo de clínquer e ao tamanho de

partícula do cimento. Quanto maior a dosagem e mais grosso o cimento, maior a capacidade de vedação autógena de fissuras do concreto (Mors; Jonkers, 2019). Entretanto, o teor alto de clínquer e o tamanho de partícula do cimento se colocam na contramão dos desenvolvimentos técnicos dos últimos anos, que procuram reduzir tanto o teor de clínquer, para reduzir a pegada do CO₂, quanto os valores de finura de cimento para obter um rápido desenvolvimento de resistência.

Porém, com um baixo teor de clínquer e com um alto teor de escória e/ou cinzas volantes no cimento, o concreto apresenta capacidade de reparação de fissura autógena reduzida. Portanto, pode-se questionar se os traços com cimento misturados com baixo teor de clínquer ainda mostram potencial suficiente de reparação de fissuras autógenas para garantir a impermeabilidade à água. No entanto, o cimento com alto teor de clínquer parece indesejável do ponto de vista ambiental, mas, por outro lado, concretos com baixo teor de clínquer também devem incluir um grau suficiente de capacidade de reparação de fissuras, garantindo, assim, a impermeabilidade de construções expostas à água. O desafio, portanto, é obter capacidade adicional de reparo autônomo de fissuras e ao mesmo tempo diminuir o impacto do concreto na geração de CO₂.

O concreto autorreparável é o processo pelo qual o concreto estabelece a reparação por si só. A inovação do concreto autorreparável começou na Holanda em 2011 pelo Dr. Henk Jonkers, um microbiologista especializado no comportamento de bactérias no ambiente (Othman, 2018). A autorreparação de fissuras no concreto contribui para uma vida útil mais longa das estruturas de concreto e tornar o material não apenas mais durável, mas também mais sustentável. Com os custos envolvidos para manutenção e reparo de estruturas de concreto, o desenvolvimento de concreto autocicatrizante deve ser o foco da indústria (Snoeck, 2018). A autorregeneração do concreto se dá quando ele entra em contato com o ar, a água e um agente de cura, que funciona quando bactérias incorporadas no concreto convertem nutrientes em calcário.

O processo de autocicatrização de fissuras visa introduzir ao concreto bactérias capazes de gerar um produto que vai produzir biologicamente calcário para curar fissuras que aparecem na superfície de estruturas de concreto. O comportamento de cura autógena no cimento convencional motivou pesquisas para a introdução de aditivos a fim de criar materiais cimentícios com cura autônoma, capacidade aprimorada de autocorreção e propriedades mecânicas superiores (Snoeck *et al.*, 2018; Tang; Kardani; Cui, 2015).

Existem alguns estudos realizados até agora retratando o desenvolvimento na rota que utiliza agentes cicatrizantes alimentados por nutrientes e encapsulados (Muhammad *et al.*, 2016; Vijay; Murmu; Deo, 2017; Snoeck; De Belie, 2015; Cohades *et al.*, 2018; Xue *et al.*, 2019). Ao surgir as fissuras, estas cápsulas se rompem e colocam em atividade as bactérias que, ao entrarem em contato com a água, transformam os nutrientes dos quais elas se alimentaram em carbonato de cálcio e, por consequência, promovem o fechamento da fissura.

Há ainda estudos abordando a utilização de vários tipos de bactérias (Vashisht; Shukla, 2020) para autocura do concreto. Como a matriz do concreto fresco é altamente alcalina, principalmente devido à formação de portlandita (hidróxido de cálcio), que é, depois do hidrato de cálcio-sílica, quantitativamente o produto de hidratação mais importante do cimento Portland comum, a água capilar da matriz do concreto jovem é normalmente caracterizada por valores de pH entre 11 e 13. As bactérias adicionadas à mistura de concreto, portanto, não só precisam resistir às tensões mecânicas devido à mistura, mas também devem ser capazes de resistir a uma alta alcalinidade por períodos prolongados. Nesse sentido, os agentes bacterianos mais promissores para incorporação na matriz do concreto parecem ser bactérias formadoras de esporos alcalifícas (resistentes aos álcalis).

Como a matriz do concreto é óxica devido à entrada de oxigênio (difusão através dos poros da matriz), as bactérias incorporadas também precisam ser tolerantes ao oxigênio. Essas bactérias aeróbicas alcalifícas formadoras de esporos ocorrem dentro do gênero *Bacilos* (Jonkers *et al.*, 2010). A bactéria *Bacillus subtilis* foi a bactéria escolhida para ser utilizada neste trabalho, uma vez que estudos mostraram que este tipo de bactéria consegue sobreviver em ambientes alcalinos por anos (Stanaszek-Tomal, 2020), além de não ser considerada uma bactéria patogênica, o que garante a segurança em sua utilização.

No entanto, se os bioagentes forem aplicados diretamente ao concreto, pode haver alguns desafios para a sobrevivência das bactérias. A vida dos esporos não tratados pode ser limitada a apenas dois meses quando os esporos bacterianos são introduzidos diretamente na mistura (Roy *et al.*, 2020). Isso pode ocorrer por diversas razões, incluindo os níveis extremos de pH durante o concreto de idade precoce (alta alcalinidade) e a fase de carbonatação em concreto amadurecido (alta acidez) da matriz de cimento, constituintes da mistura de concreto e da hidratação do cimento. Quando os esporos são expostos por muito tempo a ambientes altamente alcalinos, a resposta bacteriana pode ser significativamente

reduzida. Além disso, alguns esporos podem ser influenciados durante a mistura pelo poder de mistura ou pelo efeito dos agregados. A hidratação do cimento diminui a porosidade da matriz, reduzindo os poros em até 0,5 μm ao longo do tempo com tamanho de célula bacteriana tipicamente maior que o dos poros (Roy *et al.*, 2020). Assim, a redução dos poros no estágio final de uma estrutura de concreto reduzirá drasticamente ou evitará a germinação celular. Uma maneira de superar essa restrição é proteger as bactérias sem afetar as propriedades do concreto e a precipitação das bactérias.

Para garantir esta proteção das bactérias no concreto, está sendo considerado o seu encapsulamento. Como o processo de encapsulamento de bactérias dentro de cápsulas não é um processo fácil, adotamos o encapsulamento baseado na impregnação em argila expandida. A argila expandida promove uma certa proteção às bactérias por longos períodos, aumentando, assim, consideravelmente a sua vida útil. Estas argilas expandidas, ao serem introduzidas no preparo do concreto, farão a substituição de alguns agregados; ao contrário do encapsulamento das bactérias em cápsula, em que estes entrariam como aditivos no concreto, e não fazendo a substituição de agregados (Roy *et al.*, 2020).

3.4.2 Processo de autorreparação do concreto com base biológica

Uma das condições para a autorregeneração de fissuras é o transporte de material para dentro da fissura. Portanto, o esperado neste mecanismo de reparo de fissuras considerando bactérias é que, após a ruptura, as bactérias presentes nas fissuras da superfície do concreto comecem a se multiplicar com a presença de água, precipitando minerais como o carbonato de cálcio para fechar as fissuras, protegendo o aço do ataque químico externo.

No estudo de concreto autorregenerativo de base biológica realizado por Jonkers *et al.* (2010), ele buscou por uma bactéria que tivesse potencial de atuar como um agente de cura em concreto. O pré-requisito para este processo foi a busca por uma bactéria que sobrevivesse em um ambiente de alto pH (em torno de 12 a 13) do concreto. Embora o concreto inicialmente se apresente como um ambiente não muito favorável para a habitabilidade das bactérias devido à sua alta alcalinidade, sabe-se que os sistemas naturais são comparativamente ambientes ainda mais secos nos quais as bactérias podem sobreviver. Essas bactérias resistentes à dessecação e à alcalinidade, quando em ambientes que ameaçam sua sobrevivência, costumam formar esporos, que é uma camada que as protegem, capacitando-as a suportar altos níveis de estresse induzido mecânica e quimicamente.

As bactérias que possuem a capacidade de desenvolver essa camada têm uma vida muito longa, sendo alguns esporos com capacidade de durar até 200 anos se mantidos em estado seco e em temperaturas médias (Jonkers *et al.*, 2010). As bactérias a serem utilizadas no concreto como um agente autorreparador devem ser capazes de realizar uma vedação eficaz de fissuras a longo prazo, preferencialmente por toda a vida da estrutura. O principal mecanismo de cura das fissuras é que as próprias bactérias agem transformando um composto precursor em uma quantidade adequada.

Assim, para se obter um concreto com a real característica de autorreparação, tanto a bactéria quanto o composto precursor devem ser incorporados à matriz desde a dosagem inicial. As bactérias que resistem à incorporação na argamassa de concreto parecem estar relacionadas a um grupo específico de bactérias resistentes à alcalinidade e possuem uma característica impressionante, ou seja, a capacidade de formar esporos – que são células esféricas e espessas específicas com diâmetro de 1 μm . Estas células, quando em bom estado e inativas, devem suportar tensões mecânicas e químicas e permanecer em estado seco por períodos superiores a 50 anos (Jonkers, 2011).

3.4.3 Precipitação de carbonato de cálcio induzida microbialmente (MICP)

A precipitação de carbonato de cálcio induzida microbialmente (MICP) é um processo bioquímico generalizado em solos, cavernas, água doce, sedimentos marinhos e habitats hipersalinos. MICP é um resultado de interações metabólicas entre diversas comunidades microbianas com compostos orgânicos e/ou inorgânicos presentes no ambiente. Um dos principais processos metabólicos envolvidos no MICP é a hidrólise da ureia (Castro-Alonso *et al.*, 2019).

O MICP dirigido por hidrólise de ureia tem sido relatado para auxiliar no desenvolvimento de bioconcreto por via da promoção de um processo de autorreparação das estruturas de concreto, além de ser um dos mais aplicados nos mecanismos de reparo do concreto. A MICP pela hidrólise da ureia é induzida por uma série de reações conduzidas pela urease (Ur) e pela anidrase carbônica (CA). Com isto, os componentes microbiológicos e moleculares se tornam essenciais para melhorar o processo e o desempenho do bioconcreto.

Os cristais que se formam na fase inicial da precipitação de carbonato de cálcio são amorfos e possivelmente hidratados. A precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) ocorre através da reação de equilíbrio mostrada a seguir:



A geração de íons carbonato (CO_3^{-2}) a partir do bicarbonato em água (HCO_3^-) é fortemente influenciada pelo pH, uma vez que o crescimento se dá em condições alcalinas. Assim, a precipitação de carbonato de cálcio ocorre com facilidade em ambientes ricos em cálcio (Ca^{+2}) e íons carbonato (CO_3^{-2}) (Gonzales, 2009).

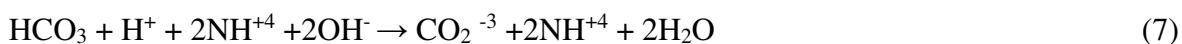
Durante a ação da urease microbiana, 1 mol de ureia é convertido intracelularmente em 1 mol de amônia e 1 mol de carbonato, o qual se hidrolisa espontaneamente, resultando na formação de 1 mol extra de amônia e ácido carbônico (Dhami; Reddy; Mukherjee, 2014).



Os produtos se equilibram na água para formar bicarbonato, 1 mol de hidróxido de amônio e hidróxido de sódio que aumentam.



As reações bioquímicas em um meio CaCl_2 para precipitar CaCO_3 na superfície celular resumem-se conforme abaixo apresentadas:



3.4.4 Precipitação do carbonato de cálcio pela metabolização do lactato de cálcio

A precipitação de carbonato de cálcio induzida microbialmente é um fenômeno em que certos microrganismos, como bactérias e algas, desempenham um papel fundamental na formação e deposição de carbonato de cálcio. Esses microrganismos têm capacidade de promover a precipitação do carbonato de cálcio através de processos bioquímicos específicos.

A união de bactérias que geram carbonato de cálcio com lactato de cálcio atua como um agente de cura, resultando em significativas quantidades de precipitados minerais nas rachaduras do concreto. O procedimento pelo qual os minerais de carbonato de cálcio se formam é ilustrado a seguir:



As moléculas de CO_2 oriundas da metabolização do lactato de cálcio reagem com a portlandita ou hidróxido de cálcio presentes no concreto e produzindo mais CaCO_3 .



Esse processo é homólogo à carbonatação, um processo lento e natural que ocorre no concreto devido à entrada por difusão do dióxido de carbono atmosférico, cuja taxa é significativamente acelerada pela conversão do lactato de cálcio (Jonkers *et al.*, 2010).

A vantagem deste processo de precipitação é que ele não produz amônia. A reação química entre o lactato de cálcio e o dióxido de carbono (CO_2) resulta na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), mas não há produção direta de amônia (NH_3) nesse processo.

A produção de amônia está associada a outros processos biológicos, como a decomposição de matéria orgânica nitrogenada, reações bacterianas específicas e ação de enzimas características. A precipitação de carbonato de cálcio pela metabolização do lactato de cálcio é um processo químico que ocorre entre íons presentes no lactato de cálcio e no ambiente, resultando no aparecimento de carbonato de cálcio.

No entanto, é possível que, em sistemas biológicos complexos, como ecossistemas aquáticos ou solos, a presença de amônia possa estar relacionada a outros processos

microbianos ou químicos que ocorrem simultaneamente. Porém, a precipitação do carbonato de cálcio em si não é diretamente responsável pela produção de amônia.

3.4.5 Tipos de bactérias e processo utilizados no bioconcreto

O concreto autocicatrizante, produzido por um processo biológico, envolve a junção de dois tipos de materiais: bactérias e o próprio concreto, junto com seus nutrientes. As bactérias selecionadas do gênero *Bacillus* são misturadas com um nutriente à base de cálcio (lactato de cálcio), além de nitrogênio e fósforo, durante a preparação da mistura do concreto (Snoeck, 2018).

O concreto autorregenerativo teve seu conceito iniciado na Bélgica com o holandês Dr. Henk Jonkers, microbiologista especializado no comportamento de bactérias no ambiente (Snoeck, 2018). Com o objetivo de intensificar a prática do novo processo de concreto autocicatrizante em outros países, o Dr. Henk Jonkers desenvolveu testes externos em grande escala utilizando bactérias (*Bacillus pseudofirmus* e *Sporosarcina pasteurii*) adicionadas ao concreto. Elas são encontradas naturalmente em lagos altamente alcalinos perto de vulcões e são capazes de sobreviver por até 200 anos sem oxigênio ou comida (Davis, 2015). Ele afirmou ainda que essas bactérias são ativadas quando entram em contato com a água e passam a usar o lactato de cálcio como fonte de alimento, produzindo calcário que, com isso, fecha as fissuras.

Sabe-se que a mistura de cimento e água pode alcançar um pH de até 13, criando um ambiente geralmente desfavorável à vida, já que a maioria dos organismos não sobrevive em condições com pH de 10 ou mais, formando um ambiente semelhante com o ambiente de lagos citado por (Davis, 2015).

A preparação do concreto bacteriano pode ser feita de duas maneiras: 1) adição direta e 2) técnica de encapsulamento bacteriano. Para utilização de uma destas formas, é necessário selecionar a bactéria a ser utilizada na fabricação do concreto. A bactéria específica de precipitação de calcita pode ser selecionada e cultivada em um caldo de nutrientes adequado (Subash; Poornima; Jayanarayanan, 2019; Poornima *et al.*, 2021). Alguns estudos sobre os diferentes tipos de espécies bacterianas foram realizados a fim de investigar o processo de autorreparação, como: *Bacilo subtilis* (Afifudin *et al.*, 2011), *Bacillus pasteurii* (Ramachandran; Ramakrishnan; Bang, 2001), *Bacillus pseudofirmus* e

Bacillus sphaericus (Tittelboom *et al.*, 2010), *Bacillus cohnii* (Jena; Basa; Panda, 2021), *Escherichia coli* (Ghosh *et al.*, 2005) e *Bacillus cereus* (Maheswaran *et al.*, 2014).

Diferentes concentrações de células também são estudadas para melhor precipitação de calcita (por exemplo, 10⁵ células/ml, 10⁶ células/ml e 10⁸ células/ml). Para a primeira forma de preparo, a solução é então misturada com a mistura de concreto seco que contém cimento, agregado miúdo e agregado graúdo em proporções específicas. O concreto bacteriano em estado fresco pode ser moldado na forma necessária de acordo com as aplicações específicas (Ghosh *et al.*, 2005; Xu; Yao, 2014). A eficiência da reparação de microfissuras usando diferentes bactérias varia dependendo de sua capacidade de precipitação de calcita. A aplicação direta de culturas bacterianas mistas em superfícies fissuradas produziu precipitação de calcita e, assim, fechou fissuras em superfícies danificadas (Gandhimathi; Suji, 2015). O trabalho experimental feito por Soda e Mini (2022) relatou que a adição direta desse tipo de bactéria melhorou consideravelmente as características de desempenho em termos de resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão.

As técnicas de MICP também funcionaram com sucesso quando adicionadas ao concreto modificado com *metacaulim* em termos de melhoria das características mecânicas e de durabilidade (Rameshkumar *et al.*, 2022). A vida das bactérias adicionadas diretamente ao concreto é limitada a 2 a 3 meses (Jonkers, 2011). As duas principais razões para uma vida útil limitada de bactérias no concreto são a redução do diâmetro dos poros na matriz e nutrientes inadequados para precipitação de calcita (Rao *et al.*, 2013). Com aplicação da técnica MICP em todo o mundo, pesquisadores têm experimentado melhorar a vida das bactérias usando técnicas de encapsulamento bacteriano.

A autorregeneração através do encapsulamento de bactérias precipitantes de calcita em perlita expandida pode autorreparar a largura da fissura de 350 µm com sucesso (Alazhari *et al.*, 2018). Estão sendo explorados o encapsulamento em tipos diferentes de materiais, como: polímeros, zeólita (Roy *et al.*, 2020), poliureia (Zamani *et al.*, 2020), perlita expandida revestida com açúcar (Jiang *et al.*, 2020), perlita expandida revestida com cimento (Soda; Mini, 2022), fibras orgânicas, hidrogel sensível ao pH (Gao *et al.*, 2020), polímeros superabsorventes (Li *et al.*, 2020) etc.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na figura 18, é apresentado um fluxograma que esquematiza como os ensaios foram sequenciados durante a pesquisa.

Figura 18 – Fluxograma de materiais e métodos



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1 Aquisição dos materiais

Os materiais utilizados para a produção da argamassa foram adquiridos com recursos próprios e posteriormente caracterizados em laboratório a fim de identificar suas propriedades; exceto o cimento, o qual utilizou as normas europeias para comparação de suas propriedades. Esses materiais são: o cimento CP V-ARI, agregado miúdo, argila expandida, *Bacillus subtilis* e lactato de cálcio, descritos abaixo.

4.1.1 O cimento CP V-ARI

O cimento Portland CP V-ARI (Alta Resistência Inicial) é amplamente utilizado em obras que demandam elevada resistência mecânica em idades iniciais. Ele se diferencia dos

demais tipos de cimento Portland por ser praticamente puro, com uma menor quantidade de adições minerais (máximo de 5%), o que garante o seu desempenho característico.

A figura 19 apresenta o CP V-ARI utilizado, que foi adquirido com recursos próprios no comércio local. Da marca Cauê, ele segue os padrões estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que define as propriedades físicas e químicas, além das classes de resistência dos cimentos Portland.

Figura 19 – Cimento Portland utilizado



Fonte: Elaboração própria (2025)

O CP V-ARI contém uma alta proporção de clínquer (mínimo de 95%) e até 5% de adições minerais (como gesso). Ele não apresenta adições de materiais pozzolânicos, escórias ou calcário, diferentemente de outros cimentos Portland, como o CP II ou CP IV. De acordo com a NBR 16697 (2018), o CP V-ARI apresenta resistência mínima aos 28 dias de 40 MPa, mas geralmente excede esse valor devido ao elevado teor de clínquer. A sua alta resistência inicial normalmente atinge valores de compressão superiores a 20 MPa antes de 7 dias, característica fundamental para aplicações em obras aceleradas.

Seu comparativo com os cimentos das normas europeias está exposto na tabela 8, que apresenta os cimentos europeus da categoria CEM I 42,5 R e CEM I 52,5 R com a nomenclatura possuindo a letra “R” que indica alta resistência inicial. Apesar dos dois cimentos europeus serem considerados como de alta resistência inicial, no que se refere à esta propriedade, o cimento CP V-ARI possui maior similaridade com o CEM I 42,5 R.

Tabela 8 – Relação entre CP V – ARI, CEM I 42,5 R (EN 197-1) e CEM I 52,5 R (EN197-1)

Característica	CP V ARI (NBR 5733)	CEM I 42,5 R (EN 197-1)	CEM I 52,5 R (EN 197-1)
Resistência à compressão (1 dia)	≥ 24 MPa		—
Resistência à compressão (2 dias)	—	≥ 20 MPa	≥ 30 MPa
Resistência à compressão (3 dias)	≥ 29 MPa	—	—
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 42 MPa	42,5–62,5 MPa	52,5–72,5 MPa
Tempo de pega (inicial-final)	1h a 8h*	45min – 12h**	45min – 12h**
Módulo de finura (Blaine)	3.500–5.000 cm ² /g	≥ 3.200 cm ² /g	≥ 3.200 cm ² /g
Densidade	3,10–3,15 g/cm ³	~3,15 g/cm ³	~3,15 g/cm ³
C3S (Silicato tricálcico)	60–70%	50–70%	60–75%
C2S (Silicato dicálcico)	10–20%	5–20%	5–20%
C3A (Aluminato tricálcico)	7–12%	7–13%	7–13%
C4AF (Ferroaluminato tetracálcico)	7–11%	7–13%	7–13%
Adições/minerais inertes	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Alcalinidade (pH típico)	>12	>12	>12

* O tempo de pega real pode variar conforme condições de cura, mas tende a ser mais rápido devido à alta reatividade do cimento CP V ARI.

** Os valores de tempo de pega europeus são limites mínimos/máximos para cimentos Portland convencionais.

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.2 Agregado miúdo

Na figura 20 é apresentado o agregado miúdo que foi adquirido com recurso próprio no comércio local. Para o agregado miúdo, como não tínhamos as suas características, foram realizados os ensaios de granulometria e de densidade.

Figura 20 – Agregado miúdo utilizado



Fonte: Elaboração própria (2025)

O ensaio de granulometria, conforme normas NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 7211 (ABNT, 2022), tem por finalidade fazer o enquadramento dos agregados, considerando como agregado miúdo aqueles cujas partículas passam pela peneira 4,75 mm e ficam retidas na peneira 0,150 mm.

Para determinação da massa específica, foi utilizada a norma NBR 16916 (ABNT, 2021) que estabelece procedimentos e critérios para tal determinação. Esta norma é amplamente utilizada para caracterizar os agregados miúdos quanto às propriedades físicas essenciais que influenciam diretamente na qualidade e no desempenho das matrizes cimentícias, incluindo concreto e argamassa. Além disso, ela permitiu o cálculo do volume absoluto dos materiais e a definição das proporções adequadas na dosagem do concreto.

4.1.3 Argila expandida

A argila expandida da marca Cinexpan AE 0500, apresentada na figura 21, foi adquirida com recurso próprio no comércio local. Este material é leve e formado por uma crosta rígida microporosa que apresenta alta resistência e porosidade. A sua produção ocorre em um forno rotativo de alta tecnologia, operando a uma temperatura de 1100 °C.

Também, por não se conhecer as suas características, foi submetida aos ensaios de granulometria e densidade assim como executado no agregado miúdo. Além dos ensaios de granulometria e densidade, a argila expandida foi submetida a uma análise de MEV e EDS.

Figura 21 – Argila expandida utilizada



Fonte: Elaboração própria (2025)

4.1.4 Probiótico

No presente trabalho, optou-se pelo uso do probiótico ProbioFish, conforme mostrado na figura 22, como fonte do microrganismo *Bacillus subtilis*. Adquirido com recurso próprio no comércio local, o ProbioFish é comercialmente utilizado para aplicações zootécnicas e contém cepas de *Bacillus subtilis*, que possui a capacidade de formar esporos e estabilidade em diferentes condições ambientais.

Figura 22 – Probiótico para alimentação de alevinos



Fonte: Elaboração própria (2025)

A escolha do ProbioFish nesta pesquisa se justifica pela composição do produto, que contém cepas puras e viáveis de *Bacillus subtilis* altamente adaptadas. Além disso, a comercialização do produto como probiótico facilita sua disponibilidade e reduz os custos e as dificuldades associados à aquisição e/ou cultivo de microrganismos biotecnologicamente funcionais para a produção de bioconcreto. A tabela 9 apresenta a composição do probiótico ProbioFish.

Tabela 9 – Quantidade de *Bacillus subtilis* no probiótico

Componente	Valor	Unidade
<i>Bacillus subtilis</i>	$2,5 \times 10^{11}$	UFC/kg
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	$1,7 \times 10^{11}$	UFC/kg
<i>Lactobacillus lactis</i>	$8,0 \times 10^{10}$	UFC/kg
<i>Enterococcus faecium</i>	$1,7 \times 10^{11}$	UFC/kg
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	$1,7 \times 10^{11}$	UFC/kg
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10	g/kg
Vitamina C	100	mg/kg
Zinco	15	g/kg
MOS (Mananoligossacarídeos)	85	g/kg
B.H.T (Butil-hidroxitolueno)	0,5	g/kg

Fonte: Elaboração própria (2025).

Apesar de ter em sua composição a presença de *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus lactis*, *Enterococcus faecium* e *Bifidobacterium bifidum*, estes não exercem influência na biomineralização ou no fechamento de fissuras em bioconcretos. Sua contribuição é nula devido à incompatibilidade fisiológica, pois, por serem do tipo de microrganismos de *Lactobacillus*, possuem um pH ótimo de crescimento entre 4,5 e 6,4 conforme Souza *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2020). Como o ambiente de pH da matriz cimentícia é em torno de 12, este ambiente causa a inativação ou morte destes microrganismos.

4.1.5 Lactato de cálcio

Na figura 23 é mostrado o lactato de cálcio pentahidratado ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) que foi adquirido com recurso próprio e utilizado nesta pesquisa. Sua principal função foi atuar como uma fonte de alimento para os microrganismos poderem, quando em atividade, precipitar o carbonato de cálcio (CaCO_3), principal produto do fechamento autônomo das fissuras em estruturas de concreto. Essa abordagem está fundamentada no uso de microrganismos, como o *Bacillus subtilis*, que metabolizam o lactato originando subprodutos que desencadeiam a biomineralização.

Figura 23 – Lactato de cálcio



Fonte: Elaboração própria (2025).

O estado pentahidratado do lactato de cálcio confere maior solubilidade em água, o que torna mais fácil sua aplicação em misturas cimentícias e sua interação com os microrganismos incorporados na matriz de concreto. Essa característica torna o material mais eficiente em comparação às formas anidras ou outros sais de cálcio.

4.2 Traço utilizado para as amostras

Para as amostras ensaiadas, foi utilizado um traço de argamassa 1:3 (em volume), sendo o número 1 correspondendo a uma parte de cimento e o número 3 a três partes de agregado miúdo ou argila expandida, além de proporções dos outros constituintes microrganismos e lactato de cálcio. As proporções dos materiais no traço 1:3 estão apresentados na tabela 10 e as quantidades destes materiais na tabela 11, com o traço 1:3 convertido em massa, apresentando, com isso, a concentração em massa dos microrganismos em relação à massa da amostra.

Tabela 10 – Traços utilizados nos experimentos

Materiais	Am. 1	Am. 2	Am. 3	Am. 4	Am. 5	Am. 6	Am. 7
Cimento	1	1	1	1	1	1	1
Areia	3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Argila expandida	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Microrganismo (%) *	0	0	5	10	5	10	7,5
Lactato de cálcio (%) *	0	0	5	10	10	5	7,5

* Porcentagem em relação à massa de cimento adicionada.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 11 – Quantidade de materiais utilizados na pesquisa

Am.	Cimento (kg)	Areia (kg)	Argila (kg)	Probiótico (kg)	Lactato de cálcio (kg)	Microrganismo (UFC/g)*	Água (L)
1	0,919	4,229					0,551
2	0,971	2,233	1,146				0,583
3	0,971	2,233	1,146	0,0485	0,0485	2,72E6	0,583
4	0,971	2,233	1,146	0,0971	0,0971	5,34E6	0,583
5	0,971	2,233	1,146	0,0485	0,0971	2,72E6	0,583
6	0,971	2,233	1,146	0,0971	0,0485	5,34E6	0,583
7	0,971	2,233	1,146	0,0728	0,0728	3,13E6	0,583

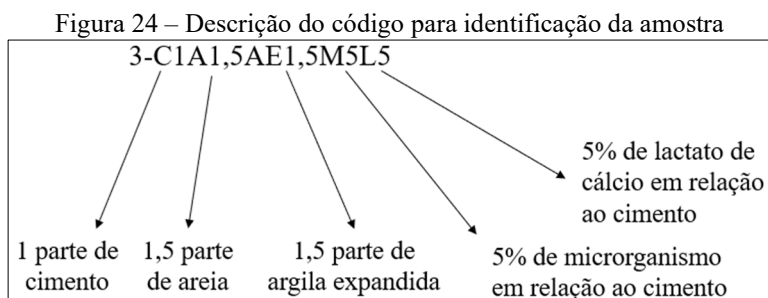
*Concentração de microrganismo em relação à massa total da amostra

Fonte: Elaboração própria (2025).

Dessa forma, na análise dos resultados, as amostras foram nomeadas com os seguintes códigos para facilitar o entendimento durante a leitura, em que, a título de ilustração, a figura 24, mostra a descrição dos códigos:

- 1-C1_A3_AE_0_M0_L0
- 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0
- 3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5
- 4-C1_A1,5_AE1,5_M10_L10

- 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10
- 6- C1_A1,5_AE1,5_M10_L5
- 7- C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5



Fonte: Elaboração própria (2026).

4.3 Caracterização dos materiais e ensaios

4.3.1 Secagem

Para assegurar a remoção completa de umidade, as amostras de agregados miúdos foram inicialmente submetidas a secagem em estufa por 24 horas. A temperatura no interior da estufa foi mantida rigorosamente a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, conforme NBR 17054 (ABNT, 2022). Após a secagem, as amostras foram expostas à temperatura ambiente para resfriamento. A massa inicial da amostra seca, fundamental para os cálculos subsequentes, foi determinada com precisão em balança com capacidade e exatidão de 0,1 g para massas de até 1 kg.

4.3.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi efetuada no agregado miúdo e na argila expandida, conforme NBR 17054 (ABNT, 2022). O objetivo deste ensaio foi conhecer os tamanhos das partículas do material e sua curva granulométrica. Assim, o peneiramento foi conduzido empregando um conjunto de peneiras padronizadas com malha quadrada de arame metálico, dispostas em ordem decrescente de abertura. No topo do conjunto, foi posicionada a peneira com maior abertura, e, na base, o fundo. O conjunto de peneiras padrão utilizado incluiu as aberturas nominais de: 2,36 mm; 2,00 mm; 1,18 mm; 0,600 mm; 0,300 mm; 0,150 mm e 0,075 mm, além da bandeja de fundo. Previamente à montagem, cada peneira foi submetida a uma limpeza minuciosa utilizando uma escova de cerdas macias, assegurando que não

houvesse partículas residuais de ensaios anteriores que pudessem comprometer a acurácia dos resultados.

A amostra de agregado seca e pesada foi então transferida para a peneira superior do conjunto. O peneiramento foi executado de forma que todas as partículas tivessem a oportunidade de passar pelas aberturas das peneiras menores. Este processo foi realizado de forma mecânica. Foi utilizado um peneirador eletromagnético da CONTENCO conforme apresentado na figura 25. Este foi ajustado para fornecer uma ação de peneiramento eficaz, vibrando e agitando o conjunto para promover a separação completa das partículas, por um tempo de 15 minutos de peneiramento.

Figura 25 – Ensaio de peneiramento dos agregados



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a conclusão do peneiramento, cada peneira do conjunto foi separada individualmente e a massa do material retido em cada peneira, incluindo a massa retida no fundo, que foi determinada. A pesagem foi realizada com a mesma balança de precisão utilizada na pesagem inicial da amostra. Foi tomado um cuidado especial para garantir que nenhuma partícula fosse perdida durante a transferência do material das peneiras para o recipiente de pesagem.

Com os dados de massa retida em cada peneira, foram realizados os cálculos necessários para a determinação da composição granulométrica. Primeiramente, a porcentagem retida em cada peneira foi calculada conforma equação 12. Em seguida, as porcentagens retidas foram somadas cumulativamente, do topo para a base, para se obter a porcentagem retida acumulada. A porcentagem passante em cada peneira foi calculada subtraindo-se a porcentagem retida acumulada de 100%.

$$\% \text{ retida} = \frac{\text{Massa retida da peneira}}{\text{Massa total da amostra seca}} \times 100 \quad (12)$$

4.3.3 Determinação da densidade

Para a avaliação da densidade dos agregados, foi adotada como referência a norma NBR 16916 (ABNT, 2021), que visa estabelecer a massa específica seca, a massa específica saturada na superfície seca e a massa específica. A massa específica reflete a densidade das partículas e influencia diretamente no volume ocupado na matriz do concreto.

Para a execução do ensaio, utilizou-se os seguintes equipamentos e materiais: uma balança com precisão de 0,1 g; um picnômetro calibrado; uma estufa com controle de temperatura capaz de manter $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$; e uma triplicata de aproximadamente 500,0 g de agregados miúdos e outra triplicata de aproximadamente 250,0 g de argila expandida.

O procedimento iniciou-se com o preparo da amostra de agregado miúdo e posteriormente para argila expandida. Uma porção representativa do material foi primeiramente lavada utilizando-se água corrente. Após a lavagem, a amostra foi transferida para uma bandeja e submetida a um processo de secagem em estufa à temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Esta etapa foi importante para assegurar que toda a umidade livre e parte da umidade absorvida pudessem ser removidas dos poros do agregado, permitindo a determinação da massa seca.

Uma vez seca e resfriada, a amostra foi então imersa em água limpa por um período de 24 horas. Este período de imersão prolongado é fundamental para permitir a completa saturação dos poros do agregado. Após a imersão, o agregado foi retirado da água e delicadamente levado à condição de superfície saturada seca. A amostra foi espalhada e, através de rolagem e exposição ao ar, o excesso de água superficial foi removido sem que a água presente nos poros fosse evaporada.

Para determinação da densidade do agregado miúdo e da argila, utilizou-se uma triplicata de aproximadamente 500,0 g de areia e 250,0 g de argila conforme procedimento especificado na NBR 16916 (ABNT, 2021). A figura 26 e a figura 27 apresentam os agregados sendo ensaiados.

Figura 26 – Picnômetros utilizados no ensaio de densidade dos agregados e argila



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 27 – Picnômetros em banho para os ensaios de densidade dos agregados



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para a densidade do agregado miúdo e da argila expandida na condição seca e na condição saturada superfície seca foram utilizadas as seguintes equações abaixo:

$$V_a = \frac{mD - mC}{\rho_a} \quad (13)$$

$$\rho_s = \frac{mA}{V - V_a} \quad (14)$$

$$\rho_{ss} = \frac{mB}{V - V_a} \quad (15)$$

Onde:

mA – Massa da amostra seca em estufa

mC – Massa da amostra na condição saturada superfície seca + Massa do frasco

mD – Massa da amostra na condição saturada superfície seca + Massa do frasco + Massa da água até 500 mL

V – Volume do frasco

Va – Volume de água adicionada ao frasco

ρ_a – Densidade da água

mB – Massa da amostra na condição saturada superfície seca

ρ_s – Densidade do agregado na condição seca

ρ_{ss} – Densidade do agregado na condição saturada superfície seca

4.3.4 Difratometria de raios X

A difratometria de raios X foi realizada em um equipamento RIGAKU – miniflex 300 do departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo conforme figura 28.

Figura 28 – Difratometro de raios X Rigaku – Miniflex 300 utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025).

A difração de raios X foi realizada na argila expandida com o objetivo de determinar as fases presentes. Para isso, a amostra foi seca em estufa por 24 horas a 60°C e posteriormente pulverizada em um moinho de ágata para ser adicionado ao porta-amostra. O equipamento utilizado possui radiação cobre $K\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), potência de 30 kV e 10

mA. As análises foram realizadas entre 20° e 80°, com passos de 0,02° e velocidade de 1,5°/min.

4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado

A Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um equipamento de bancada, NeoScope TM série JCM-7000 do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo conforme figura 29.

Figura 29 – Microscópio eletrônico de Varredura Jeol NeoScope TM série JCM 700 utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise de MEV com 15 kV de tensão foi utilizada para caracterizar as amostras de argila expandida, do probiótico e também para avaliar a autocicatrização do corpo de prova em que foi induzida a fissura

4.3.6 Superfície específica

A análise de superfície específica da argila expandida foi realizada em um equipamento ASAP 2020 do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo conforme figura 30.

As amostras foram previamente secas em estufa durante 24 horas, em temperatura de 60°C. Durante o procedimento Degas, a amostra foi aquecida a 300°C, sob vácuo, durante 12 horas.

Figura 30 – Analisador de superfície específica BET Micromeritics ASAP 2020 utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.4 Preparo da solução com probiótico e lactato de cálcio e da argila expandida

O método de saturação da argila expandida e a metodologia empregada nesta pesquisa baseou-se nos princípios estabelecidos por Mors e Jonkers (2019).

A saturação da argila expandida ocorreu através de uma solução para encapsulamento, preparada de forma a otimizar a absorção e a manutenção da viabilidade bacteriana. Primeiramente, a água foi aquecida a uma temperatura de 60 °C para facilitar a dissolução dos nutrientes. Em um recipiente adequado, o lactato de cálcio foi adicionado à água aquecida sob agitação manual constante até completa dissolução. Posteriormente, o recipiente e a solução foram naturalmente resfriados a uma temperatura ambiente entre 25°C e 30°C para a introdução do probiótico contendo os microrganismos, que, também sob agitação manual, puderam garantir uma distribuição homogênea dos microrganismos e nutrientes. A concentração final de cada componente na solução foi conforme tabela 11, anteriormente apresentada.

As partículas secas de argila expandida foram imersas em 2 litros da solução que foi preparada contendo microrganismos e lactato de cálcio. Este volume de solução foi o suficiente para garantir que todas as partículas estivessem submersas para promover o contato uniforme e a absorção da solução pelos poros. O período de imersão foi de 72 horas para permitir a máxima absorção capilar.

Após o período de saturação, as partículas de argila expandida saturadas foram espalhadas e secas ao tempo e à temperatura ambiente por um período de 7 dias. A etapa de secagem por este período mais prolongado visa permitir a remoção da umidade superficial. Essa secagem suave visa também criar um ambiente de baixa atividade de água que induza a dormência dos esporos, preservando sua capacidade de germinar e metabolizar quando reativados.

Este encapsulamento de microrganismos e lactato de cálcio teve como objetivo proteger os esporos bacterianos das condições adversas da argamassa fresca quando de sua preparação e cura (elevado pH e pressão mecânica durante a mistura), além de garantir a disponibilidade do nutriente lactato de cálcio quando o corpo de prova fosse fissurado, ativando, assim, os microrganismos na presença de água.

4.5 Preparo e modelagem do corpo de prova

Para a modelagem dos corpos de prova, todas as amostras que utilizaram os microrganismos e o lactado de cálcio tiveram estes componentes encapsulados previamente na argila expandida.

Após a preparação da argila expandida, iniciou-se a separação dos demais materiais e confecção da argamassa. Para isso, o cimento foi devidamente pesado para atender ao traço e à quantidade de materiais especificados na tabela 11.

O agregado miúdo (areia) foi previamente seco em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e depois resfriado à temperatura ambiente. A argila expandida encapsulada foi adicionada como substituição parcial da areia nos traços apresentados na tabela 11. A água foi medida em recipiente graduado para atender à relação água/cimento predefinida.

O preparo da argamassa foi realizado utilizando o seguinte procedimento: a areia e o cimento foram colocados no bojo do Misturador Mecânico (ou “argamassadeira”) – marca Pavitest, que possui acionamento eletromecânico, cuba com capacidade de 5 L e pá em aço inox, motor com duas velocidades, 220 V (figura 31) –, sendo então misturados a seco por 1 minuto na velocidade baixa de aproximadamente 140 rotações por minuto (RPM) para evitar o desprendimento de poeira e garantir uma distribuição homogênea dos dois componentes. A água foi adicionada em uma quantidade de aproximadamente $\frac{2}{3}$ do seu volume de forma lenta e gradual com o misturador ainda na velocidade baixa por mais 1 minuto, iniciando neste momento a hidratação do cimento. Após esse período, o misturador

foi desligado, e as partículas aderidas às paredes do bojo e nas pás do misturador foram manualmente raspadas com uma espátula metálica, redirecionando a argamassa para o centro do bojo. O restante da água foi adicionado, e o misturador foi colocado em velocidade mais alta de aproximadamente de 285 RPM durante mais 1 minuto para promover a completa mistura e homogeneização da matriz cimentícia. Em seguida, as partículas de argila expandida encapsuladas foram adicionadas gradualmente para evitar a segregação ou formação de nódulos.

Figura 31 – Misturador utilizado para preparo da argamassa



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após este período, a argamassa foi imediatamente colocada em moldes prismáticos de dimensões 4x4x16 cm e moldes em PVC dimensões Ø 7,5x4,0 cm, Ø 2,5x2,0 cm e Ø 2,0x2,0 cm, conforme apresentado na figura 32 e figura 33, sendo os corpos de prova dos moldes em PVC utilizados para indução das fissuras e acompanhamento da evolução do fechamento. Os moldes foram previamente untados com desmoldante, aplicando-se vibração mecânica para evitar a formação de bolhas de ar e para assegurar o preenchimento uniforme. Após a moldagem, os corpos de prova foram nivelados e secos ao ambiente por 24 horas. Após este período, eles foram levados para um tanque de água e mantidos submersos por 28 dias, o que chamamos de cura úmida.

Figura 32 – Corpos de prova Ø 7,5x4,0 cm, Ø 2,5x2,0 cm e Ø 2,0x2,0 cm



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 33 – Corpos de prova prismático 4,0x4,0x16 cm



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.6 Indução das fissuras

As amostras que foram moldadas nos moldes de Ø 2,0x2,0 cm, Ø 2,5x2,0 cm e Ø 7,5x4,0 cm, após a cura de 28 dias, foram submetidas a um carregamento para indução de fissura, em que uma força foi aplicada diametralmente nestes corpos de prova apenas com o ajuste do êmbolo superior da prensa hidráulica, até que visualmente surgisse uma fissura neste corpo de prova. Esta fissura teve como finalidade avaliar visualmente as atividades dos microrganismos no fechamento destas fissuras ao longo dos dias. Após a indução destas fissuras, os corpos de prova foram mantidos molhados para que as ações dos microrganismos, em contato com a água, pudessem iniciar o processo de produção de

carbonato de cálcio e fechassem as fissuras. O acompanhamento foi realizado por um período de 60 dias através de um microscópio óptico com capacidade de aumento de 60x e apresentaram suas evoluções.

Embora os corpos de prova de dimensões $\varnothing 7,5 \times 4,0$ cm tenham sido fissurados, apenas os com dimensões $\varnothing 2,0 \times 2,0$ cm e $\varnothing 2,5 \times 2,0$ cm foram avaliados em relação ao fechamento da fissura.

4.7 Ensaio de resistência dos corpos de prova

Após o período de 28 dias de cura submersa em água, os corpos de prova foram removidos do tanque de cura e submetidos a uma secagem superficial em ambiente natural do laboratório por 48 horas. Imediatamente antes do ensaio, as dimensões de cada corpo de prova foram verificadas para assegurar que possíveis irregularidades não pudessem interferir nos resultados. O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica, marca Pavitest, que possui acionamento eletromecânico, trifásico e funcionamento hidráulico com manômetro acoplado, com capacidade de carga de 980 N, e curso útil máximo do êmbolo de até 25 mm. A prensa possui placas de compressão de aço, sendo a placa superior ajustável para permitir a aplicação uniaxial da carga conforme apresentado na figura 34.

Figura 34 – Prensa hidráulica para ensaios eletromecânicos



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.7.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

Este ensaio foi realizado em 3 corpos de prova prismático 4,0x4,0x16,0 cm de cada amostra. Além disso, o corpo de prova foi inspecionado visualmente para garantir que não houvesse defeitos superficiais que pudessem influenciar o resultado do ensaio.

O ensaio foi realizado na prensa hidráulica para ensaios eletromecânicos. Na máquina, foi colocado um dispositivo específico para ensaios de tração na flexão em prismas, conhecido como ensaio de três pontos. Este dispositivo consiste em dois roletes de apoio inferiores e um rolete de carregamento superior. Os roletes de apoio inferiores foram ajustados para manter um vão livre de 100 mm entre seus centros. O rolete de carregamento superior foi posicionado exatamente no ponto médio deste vão, assegurando que a carga fosse aplicada no centro do prisma e distribuída de forma uniforme ao longo da largura da amostra (figura 35).

Cada corpo de prova prismático foi posicionado cuidadosamente sobre os dois roletes de apoio inferiores do dispositivo de flexão. A face do corpo de prova que se apresentou mais lisa foi orientada para cima, em contato com o rolete de carregamento. As faces laterais 4,0x 16,0 cm do prisma foram niveladas para garantir que o plano de aplicação da carga estivesse perfeitamente centralizado e que o prisma estivesse estável sobre os apoios. O rolete de carregamento superior foi, então, baixado até estabelecer contato com a face superior do prisma, exatamente no ponto médio do vão.

A carga foi aplicada de forma contínua a uma taxa de carregamento de aproximadamente 50 N/s, conforme as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). A aplicação da carga prosseguiu até que o corpo de prova atingisse a ruptura, que, neste caso, foi a completa separação do prisma em duas metades. No momento exato da falha, a carga máxima de ruptura foi registrada.

A resistência à tração do corpo de prova foi determinada pela equação 16 conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

$$R_t = \frac{1,5 * F_t * L}{40^3} \quad (16)$$

Onde:

R_t = Resistência a tração na compressão (Mpa)

F_t = Carga aplicada no centro do prisma (N)

L = Distância entre suportes (mm)

Figura 35 – Rompimento de corpos de prova a tração na flexão



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.7.2 Ensaio de resistência à compressão

Utilizando o mesmo corpo de prova prismático 4,0x4,0x16,0 cm do ensaio de tração na flexão, foi realizado o ensaio de compressão em cada metade do corpo de prova que foi rompido. Estes corpos de prova não tiveram a necessidade de serem retificados.

Cada metade do corpo de prova prismático num total de 6 corpos de prova de cada amostra foi posicionado no centro da placa inferior da prensa hidráulica para ensaios eletromecânicos, assegurando que seu eixo longitudinal estivesse perfeitamente alinhado com o eixo de aplicação da carga da prensa. A placa superior foi ajustada para garantir o contato uniforme com a superfície do corpo de prova (figura 36). A aplicação da carga foi realizada de forma contínua a uma taxa de carregamento em torno de 500 N/s, conforme especificado pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Esta taxa foi mantida até que o corpo de prova atingisse a ruptura. A carga máxima de ruptura foi registrada no momento da falha do material. A resistência do corpo de prova foi determinada dividindo-se a carga máxima de ruptura do corpo de prova pela área de contato do corpo de prova prismático com o equipamento auxiliar utilizado no ensaio pela equação 17 conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (17)$$

Onde:

R_c = Resistência a compressão (MPa)

F_c = Carga máxima aplicada (N)

1600 = Área em milímetro da seção quadrada do equipamento auxiliar (40 mm x 40 mm)

Figura 36 – Rompimento de corpos de prova prismáticos



Fonte: Elaboração própria (2025).

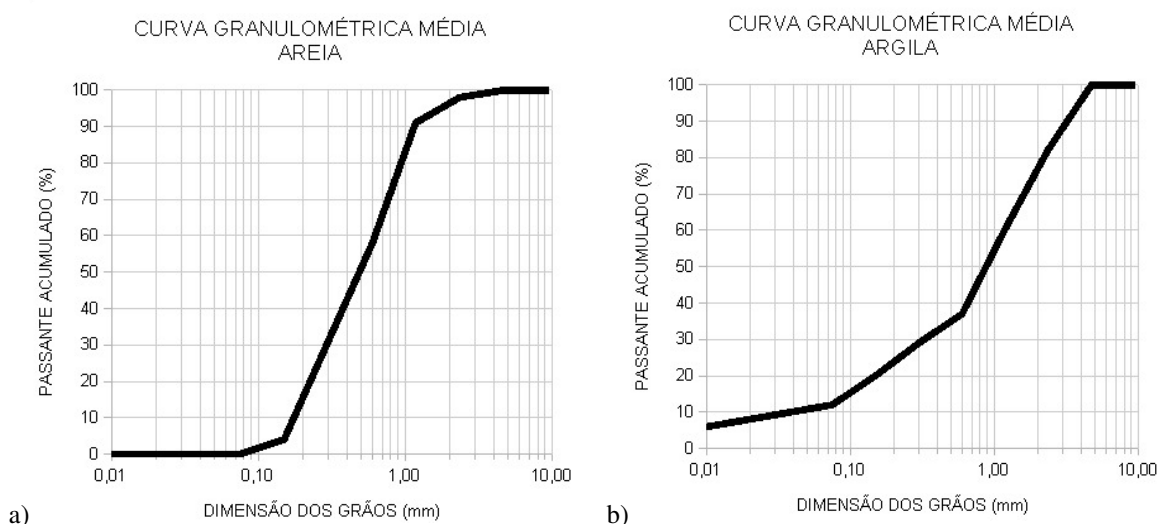
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterizações

5.1.1 Análise granulométrica do agregado miúdo e da argila expandida

Baseado nas análises granulométricas realizadas, construiu-se as curvas granulométricas da figura 37a para os agregados miúdos e da figura 37b para a argila expandida.

Figura 37 – a) Curva Granulométrica do agregado miúdo e b) Curva granulométrica da argila expandida



Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que o agregado miúdo (figura 37a) apresenta um d₁₀, d₅₀ e d₉₀ respectivamente de: 0,2 mm; 0,5 mm e 1,1 mm, e que a argila expandida (figura 37b) apresenta um d₁₀, d₅₀ e d₉₀ respectivamente de: 0,05 mm; 0,9mm e 3,0 mm.

Como nos traços ensaiados parte dos agregados miúdos foram substituídos por argila expandida, pode-se observar que o d₉₀ dos dois materiais, apesar de possuírem diâmetros diferentes e por se tratar de materiais diferentes, possui 90% de sua massa com dimensão menor que 4,75 mm.

Baseado na NBR 7211 (ABNT, 2022), este material se classifica como agregado miúdo médio. Também os agregados miúdos utilizados apresentaram granulometria menor ou igual a 4,75 mm conforme Vaezi *et al.* (2020).

5.1.2 Densidade do agregado miúdo e da argila expandida

Os valores de densidades encontrados nos ensaios realizados serviram como base para que se encontrasse a massa de materiais a serem utilizados nos ensaios, fazendo a conversão do 1:3 em volume para que se conseguisse os seus equivalentes em massa. A tabela 12 ilustra os valores encontrados.

Tabela 12 – Resultado da densidade do agregado miúdo e da argila expandida obtidos

	Agregado miúdo (g/cm ³)	Argila expandida (g/cm ³)
ρ_s	2,35	1,38
ρ_{ss}	2,37	1,39

Fonte: Elaboração própria (2026).

A densidade encontrada para o agregado miúdos está próxima à encontrada por Abraham (2023), em sua pesquisa sobre o efeito do *Bacillus subtilis* em resíduo de fundição de concreto contendo areia, que encontrou um valor de 2,48 g/cm³ para o agregado miúdo.

A argila expandida também apresentou a densidade próxima ao resultado encontrado por Nunes *et al.* (2021), em sua pesquisa, onde foi encontrado um valor de 1,56 g/cm³.

Estes valores se mostraram compatíveis com os valores encontrados em pesquisas semelhantes à deste trabalho e se mostraram apropriadas para serem utilizadas na transformação do traço em volume para o traço em massa.

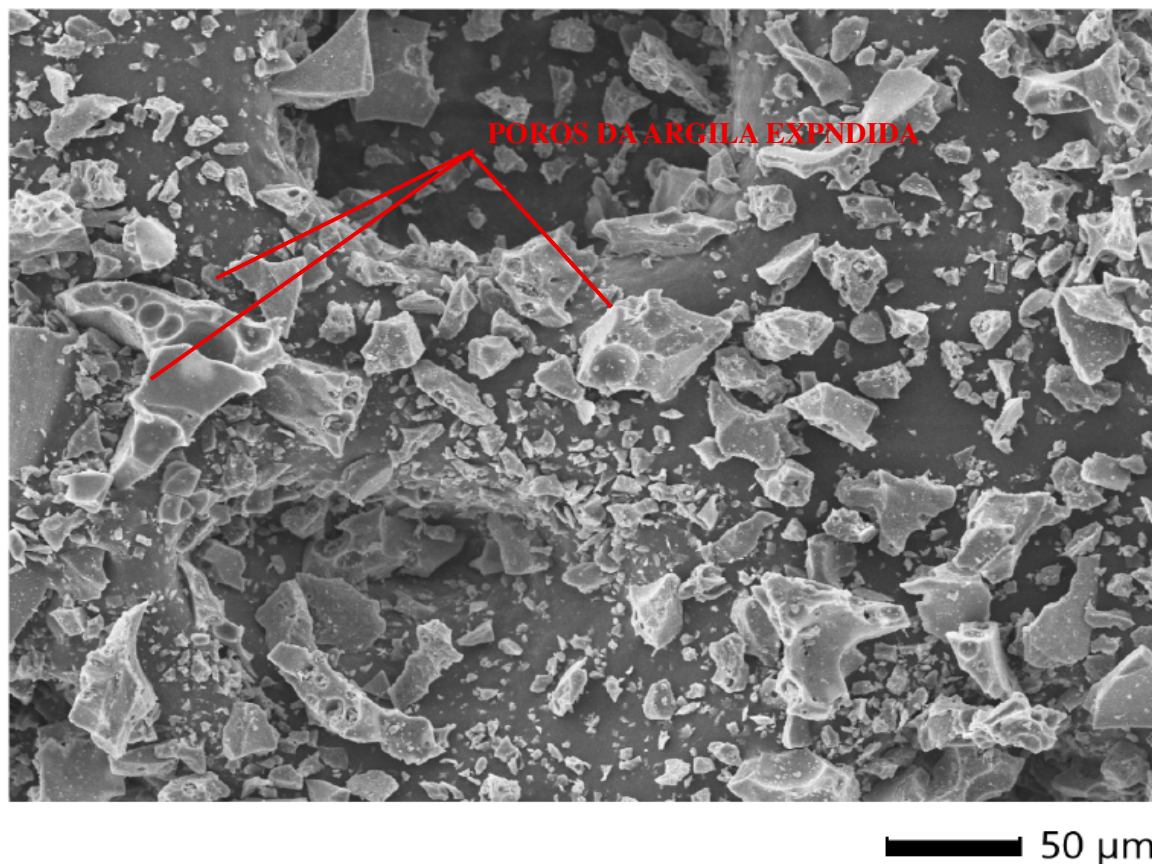
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura da argila expandida

A argila utilizada na preparação da matriz cimentícia foi submetida a um ensaio de MEV e de EDS para melhor conhecimento de sua morfologia e composição química.

A figura 38 apresenta uma visão da superfície e da microestrutura interna da argila utilizada, onde pôde-se notar a presença de irregularidades e a distribuição dos poros. Esta porosidade interna se mostrou importante no processo de encapsulamento e armazenamento dos microrganismos e de seus nutrientes. As irregularidades e a formação de poros nas argilas podem variar em função dos elementos que formam estas argilas, bem como da temperatura em que são calcinadas. Estas irregularidades e formação de poros estão diretamente ligadas à sua área superficial específica, sendo que as argilas mais porosas possuem uma maior área superficial. Para esta pesquisa o tamanho dos poros da argila que variaram de 15 µm a 25 µm se mostraram favoráveis ao encapsulamento do probiótico que possui partículas esféricas com dimensões da ordem de 15µm em sua grande maioria mesmo

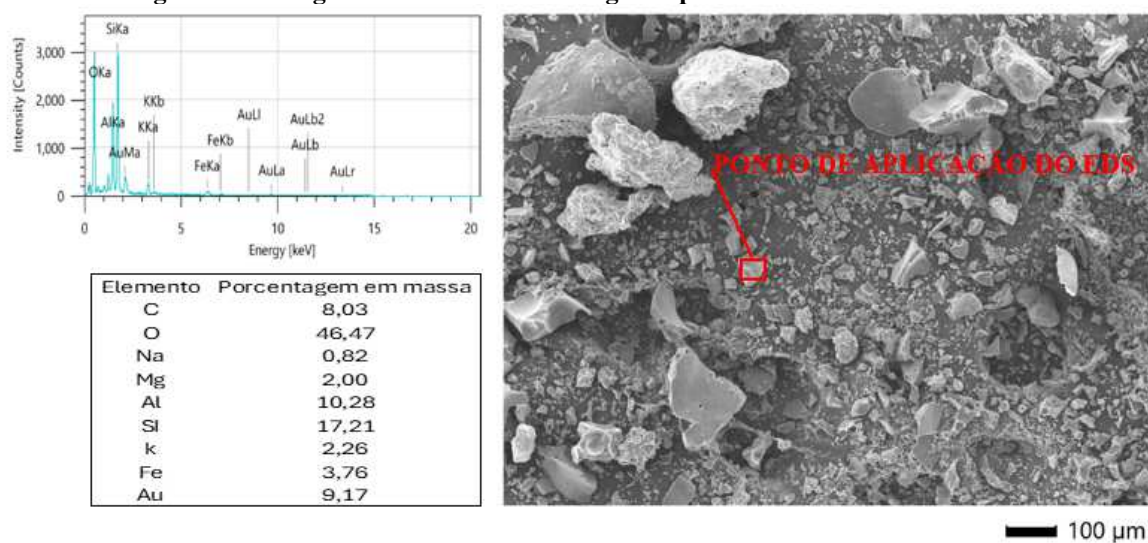
antes de serem dissolvidas. Esta irregularidade interna também pode ser vista na pesquisa realizada por Nunes *et al.* (2021).

Figura 38 – Imagem de MEV da argila expandida com identificação de alguns poros



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 39 – Imagem de MEV e EDS da argila expandida utilizada nas amostras

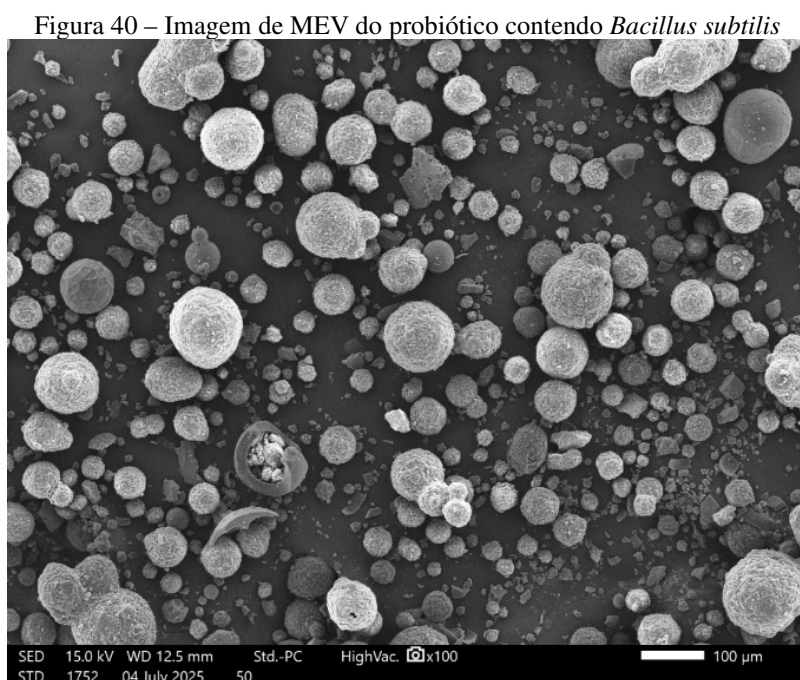


Fonte: Elaboração própria (2025).

Na figura 39, é apresentado também o espectro do EDS realizado na argila expandida e os elementos encontrados no ensaio. Pode-se ver a predominância de elementos, como o silício (Si), o alumínio (Al) e o oxigênio (O), que são os principais constituintes do silicato e aluminossilicatos (argilas). O teor de oxigênio se apresenta bem elevado devido a queima da argila em altas temperaturas o que faz com que este oxigênio seja liberado como subproduto da combustão. Pode-se notar a presença de outros elementos também, como ferro (Fe), Potássio (K), magnésio (Mg) e ouro (Au) utilizado para fazer o recobrimento da amostra para ensaio, porém estes elementos foram apresentados em menores proporções. Pode-se notar a predominância destes elementos em outros trabalhos (Moravia *et al.*, 2006; Nunes *et al.*, 2020; Pacheco *et al.*, 2022).

5.1.4 Microscopia eletrônica de varredura do probiótico contendo *Bacillus subtilis*

A figura 40 mostra um MEV realizado no probiótico contendo microrganismos (*Bacillus subtilis*).



Fonte: Elaboração própria (2025).

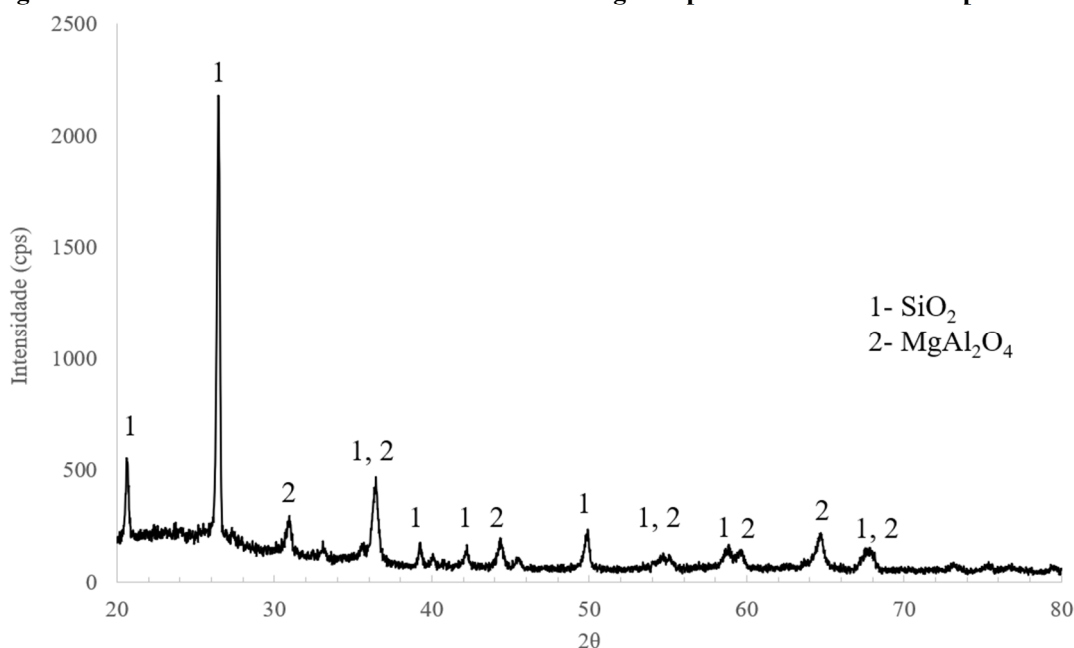
Observa-se que o probiótico fonte do *Bacillus subtilis* possui majoritariamente um aspecto esférico e tamanho de até aproximadamente 100 μm . Esse resultado difere do aspecto esperado apenas para o *Bacillus subtilis* na forma de bastonetes (Wong *et al.*, 2024; Yehia *et al.*, 2025), o que pode ser explicado, provavelmente, pelo fato de que, em produtos

comerciais, como é o caso do probiótico estudado, os microrganismos são agregados incorporados às matrizes sólidas.

5.1.5 Difratometria de raios-X da argila expandida

A figura 41 apresenta o resultado da caracterização através da difratometria de raios-X para uma amostra da argila expandida.

Figura 41 – Difratometria de raios-X da amostra de argila expandida utilizada nos experimentos



Fonte: Elaboração própria (2025).

A partir da figura 41 é possível notar que a argila expandida apresentou as fases mineralógicas de SiO₂ e MgAl₂O₄ características do material. Moravia *et al.* (2006), em caracterização utilizando a mesma técnica, encontraram fases semelhantes para a argila expandida. A mesma característica é apresentada por Santos *et al.* (2018). Também conforme Oliveira (2007), na difratometria de raios-X, a argila não apresenta atividade pozolânica e deu lugar aos espinélios devido à alta temperatura com que foi queimada a argila expandida.

5.1.6 Superfície específica a argila expandida

O resultado obtido para a análise de superfície específica pelo método BET foi de 0,6452 m²/g. Este valor, apesar de se encontrar abaixo dos valores encontrados em argilas calcinadas de olaria conforme Pereira *et al.* (2023), bem como das argilas de vermiculita

encontradas por Teodoro *et al.* (2020) e também por Moravia *et al.* (2006), pode ser explicado pelo fato da área superficial estar diretamente relacionada com a fração mineralógica que constitui esta argila, assim como da porosidade de suas partículas. Argilas pouco porosas possuem microporos com área superficial menores e isto contribui para a diminuição da área superficial do sólido.

O menor valor obtido para a área superficial pode indicar uma menor quantidade de poros, o que ocasionaria menos locais para encapsulamento do microrganismo. Da mesma maneira, isso pode proporcionar uma melhora nas propriedades mecânicas no material (Schwantes-Cezario *et al.*, 2019; Yew *et al.*, 2020).

5.2 Autocicatrização das fissuras induzidas

A avaliação qualitativa do processo de cicatrização de fissuras, por meio da observação visual, ofereceu uma evidência inicial e intuitiva da eficácia de tais sistemas. As figuras 42 e 43 fornecem um panorama comparativo do desempenho de amostras de concreto, permitindo uma análise detalhada da progressão da autorregeneração.

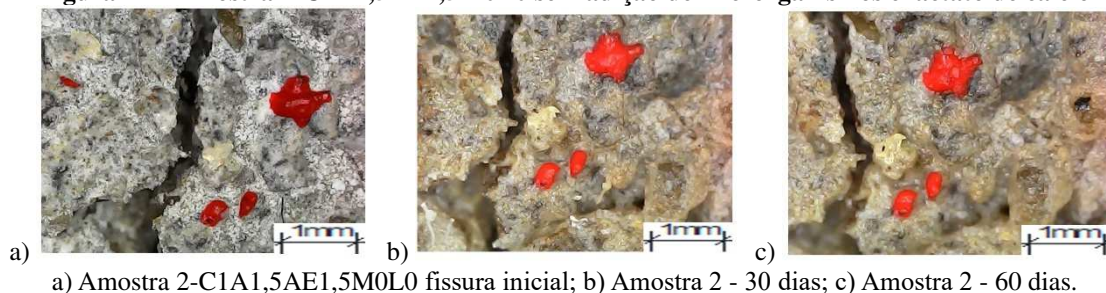
A figura 42 apresenta a evolução da fissura na amostra 2-C1_A1,5_AE15_M0_L0 moldada em corpo de prova de dimensões Ø 2,5x2,0 cm, designada como grupo controle, ou seja, sem a adição de microrganismos e lactato de cálcio. A figura 42(a) apresenta a fissura inicial na amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 e revela uma abertura nítida e contínua, servindo como ponto de partida para a avaliação.

A figura 42(b), 30 dias após um período de exposição às condições experimentais, apresenta a fissura na amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 visivelmente inalterada. Não há indícios perceptíveis de preenchimento do volume da fissura ou de redução de sua abertura. A morfologia e a integridade da fissura se mantêm idênticas às observadas inicialmente. A figura 42(c), com 60 dias de observação da amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0, reforça a ausência de um processo eficaz de autorregeneração. A fissura persiste aberta, sem formação de produtos de cicatrização que pudessem selar ou preencher a descontinuidade.

A autocicatrização natural do concreto, embora possa existir, é geralmente restrita às microfissuras muito pequenas (tipicamente abaixo de 0,03 mm) e ocorre principalmente através de dois mecanismos: 1) a hidratação secundária de partículas de cimento não hidratadas e 2) a carbonatação do hidróxido de cálcio pela ação do dióxido de carbono atmosférico. No entanto, para fissuras de maior dimensão, como as observadas na figura 42,

esses mecanismos foram insuficientes para promover um fechamento completo. O mesmo foi observado por Vaezi *et al.* (2020), Safiuddin *et al.* (2022), Abraham e Abraham (2023), em amostras de referência não utilizando microrganismos.

Figura 42 – Amostra 2-C1A1,5AE1,5M0L0 sem adição de microrganismos e lactato de cálcio



Fonte: Elaboração própria (2025).

Na figura 43, é apresentada a amostra 3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5 de dimensões Ø 2,0x2,0 cm, a amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 de dimensões Ø 2,5x2,0 cm e a amostra 7-C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5 de dimensão Ø 2,0x2,0 cm, com um avanço notável no fechamento de fissuras destas amostras experimentais, sendo estas acompanhadas por um período de 60 dias.

As figuras 43(a), 43(d) e 43(g) apresentam três corpos de prova com uma fissura bem definida e que foi induzida para critérios de avaliação de preenchimento destas fissuras ao longo do tempo.

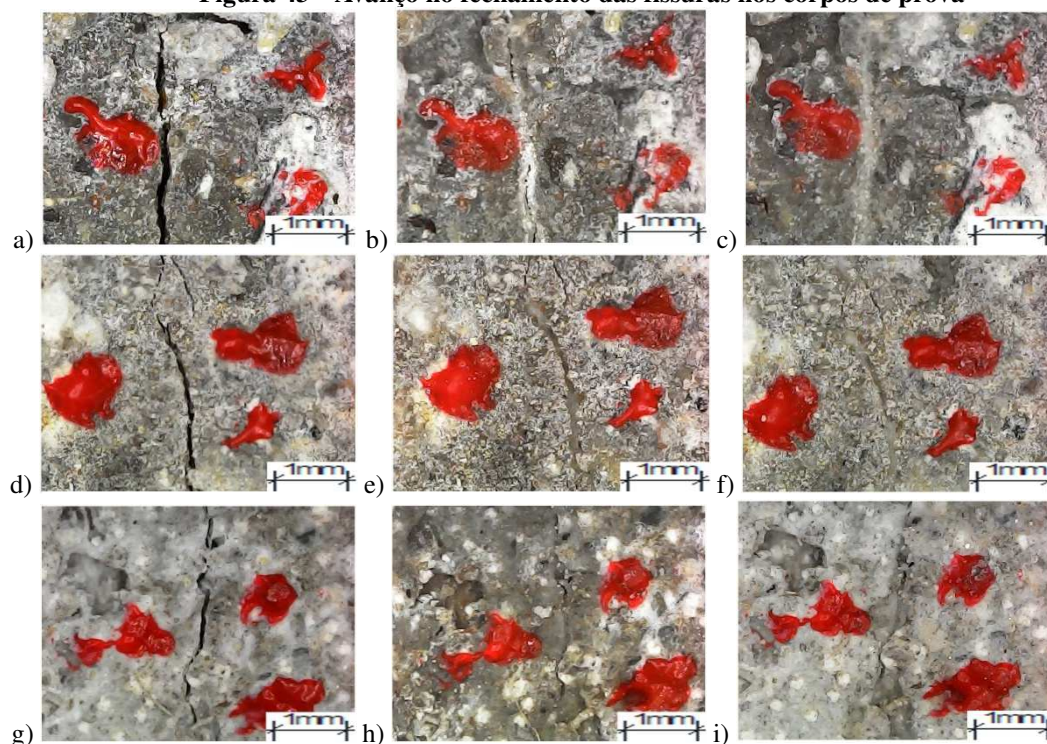
As figuras 43(b), 43(e) e 43(h) apresentam os mesmos corpos de prova após 30 dias. Pode-se notar um avanço no processo de fechamento da fissura, com a formação de produtos de cicatrização que reduzem a profundidade e a largura da abertura, tornando-a menos proeminente.

As figuras 43(c), 43(f) e 43(i) apresentam estes corpos de prova após 60 dias. Pode-se notar um fechamento da fissura. A descontinuidade foi praticamente reparada por completo, com a superfície da argamassa apresentando uma coesão visível na região anteriormente fissurada.

Os resultados apresentados na figura 43 fornecem uma forte evidência da eficácia dos microrganismos na promoção da autorregeneração do concreto. Este processo é fundamentalmente atribuído à biomineralização, conforme mencionada por Benjamin *et al.* 2022; Shanmugam *et al.* 2022; Safiuddin *et al.* 2022 e Vaezi *et al.* 2020, que apresenta as bactérias do gênero *Bacillus* como precipitadoras de cristais de carbonato de cálcio.

O tempo de 60 dias para o fechamento substancial das fissuras visíveis se alinha com os períodos de 28 dias a 2 meses mencionados por Koga *et al.* (2020), Nunes *et al.* (2021) e Shanmugam *et al.* (2022).

Figura 43 – Avanço no fechamento das fissuras nos corpos de prova



Amostra 3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5- **a)** fissura inicial; **b)** 30 dias; **c)** 60 dias;
 Amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10- **d)** fissura inicial; **e)** 30 dias; **f)** 60 dias;
 Amostra 7- C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5 **g)** fissura inicial; **h)** – 30 dias; **i)** 60 dias;

Fonte: Elaboração própria (2025).

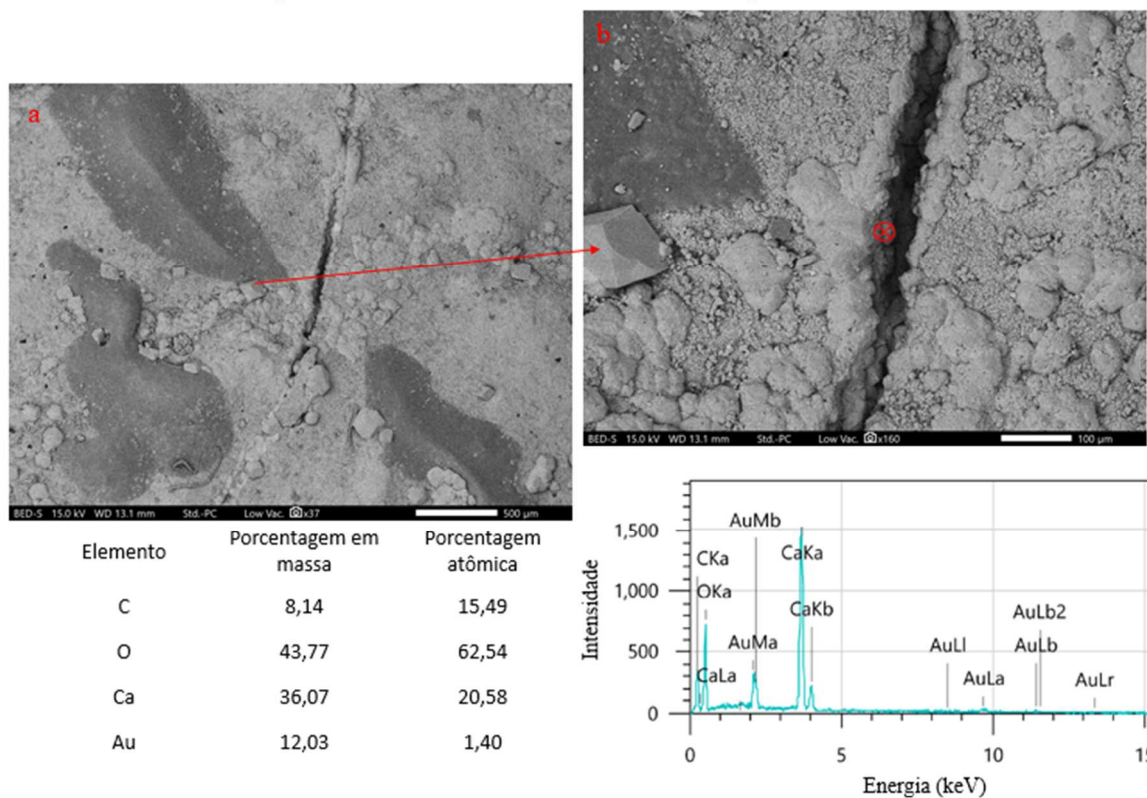
Observa-se que as fissuras induzidas possuem um tamanho aproximado de 0,1 a 0,2 mm. Diversas pesquisas avaliam o tamanho da fissura que esse mecanismo de precipitação de carbonato através de microrganismos é capaz de regenerar. Para o *Bacillus subtilis*, foram encontrados trabalhos que citam o fechamento de fissuras com espessura de até 0,81 mm para encapsulantes com nanoplaquetas de grafita e 0,60 mm para agregados leves, como a argila expandida (Wong *et al.*, 2024; Jonker *et al.*, 2010).

Com a finalidade de se conhecer o material responsável pelo fechamento das fissuras, os corpos de prova foram submetidos a uma caracterização por MEV/EDS, cujos resultados são apresentados abaixo.

Na figura 44 da amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10, é possível verificar o material de preenchimento dentro da fissura e com morfologia diferente do material da matriz

cimentícia. As análises foram feitas 30 dias após a moldagem e a indução das fissuras nos corpos de prova.

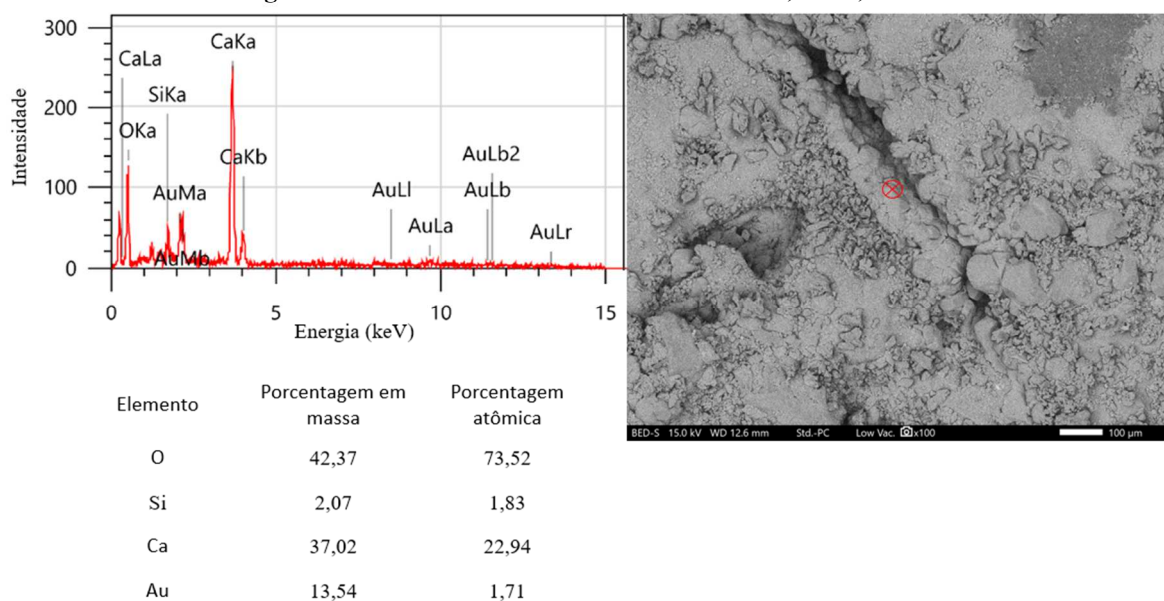
Figura 44 – MEV da fissura do corpo de prova da amostra 5-C1A1,5AE1,5M5L10 de dimensões Ø 2,5x2,0 cm, 30 dias após a indução da fissura e do material de preenchimento dentro da fissura



Fonte: Elaboração própria (2025).

Verifica-se na figura 44 a formação de um material com características diferenciadas da matriz do cimento próximo à fissura. O EDS da amostra colhida na região da fissura em reconstituição ilustra a presença de um possível carbonato de cálcio (CaCO_3) na região a partir das proporções atômicas. O carbonato de cálcio é justamente o material produto da atividade do microrganismo. Este mesmo tipo de precipitação e formação de CaCO_3 baseado na proporção atômica pode ser observado por Jan *et al.* (2023), que encontrou 14,9% Ca, 12,7% C e 65% O.

O MEV/EDS da amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0, por sua vez, pode ser visualizado na figura 45.

Figura 45 – MEV da fissura da amostra 2-C1A1,5AE1,5M0L0

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que a amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0, que era isenta de microrganismo, não apresentou na análise do MEV/EDS da figura 45 a presença de carbonato de cálcio na trinca como ocorreu para a amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 que continha o microrganismo. Isso comprova mais uma vez a eficácia da ação do microrganismo na mistura nas amostras que fizeram uso deste.

A afirmação de não formação de CaCO_3 nesta amostra se baseia na proporção atômica dos elementos Ca e O, além da ausência do elemento Ca apresentado no resultado de EDS realizado.

5.3 Resistência dos corpos de prova à compressão e à tração na flexão

Os ensaios e análises realizadas apresentaram resultados promissores em relação aos aspectos estruturais das argamassas e consequentes benefícios ambientais. A variação de dois elementos distintos, que foram os microrganismos e o lactato de cálcio, apresentou boas respostas nos corpos de prova conforme apresentado nas tabelas 13 e 14.

As tabelas 13 e 14 apresentam valores de compressão e tração na flexão para os corpos de prova. As amostras 1-C1_A3_AE0_M0_L0 e 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 foram utilizadas como amostras de referências, portanto, não levaram microrganismos e lactato em sua composição. A diferença existente entre as duas é apenas a substituição dos agregados

miúdos apresentados na amostra 1-C1_A3_AE0_M0_L0 por argila expandida apresentados na amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0. A partir da amostra 3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5, foram introduzidos microrganismos e lactato nas amostras.

Na tabela 13, estão apresentados os valores de tração na flexão obtidos nos ensaios. Nota-se que as amostras que possuem microrganismos em sua composição obtiveram um aumento na sua resistência à tração, conforme também demonstrado por Safiuddin *et al.* (2022) e Udhaya *et al.* (2023).

Tabela 13 – Valores de tração na flexão obtidos nos corpos de prova

Amostras	Tração na flexão (MPa)	Variação em relação à referência 1
1-C1_A3_AE0_M0_L0	5.861	0%
2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0	6.129	5%
3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5	7.585	29%
4-C1_A1,5_AE1,5_M10_L10	7.278	24%
5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10	9.041	54%
6- C1_A1,5_AE1,5_M10_L5	10.611	81%
7- C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5	8.657	48%

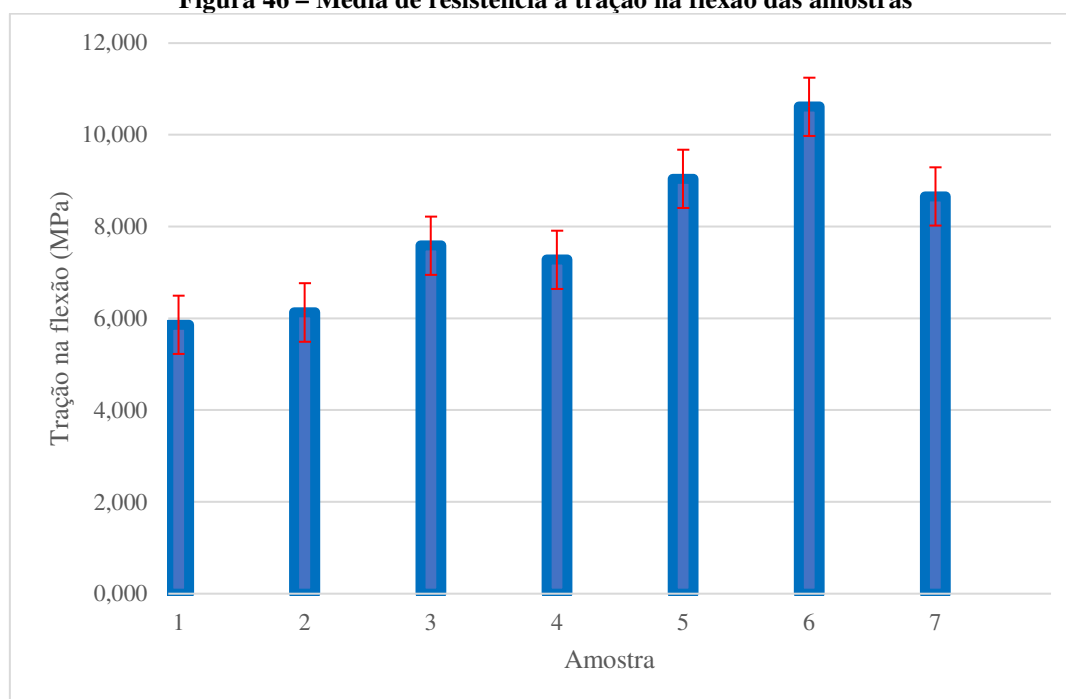
Fonte: Elaboração própria (2025).

Pôde-se observar que os valores de tração na flexão apresentaram uma melhora em seus resultados quando da variação dos microrganismos e lactato de cálcio na sua composição, isto quando comparados com as amostras de referências.

Conforme pode ser visto na figura 46, para tração na flexão, a amostra 6-C1A1,5AE1,5M10L5 foi a que apresentou um melhor desempenho.

O ganho de resistência da tração na flexão da amostra 6-C1_A1,5_AE1,5_M10_L5 em relação à amostra 1-C1_A3_AE0_M0_L0 de referência foi de aproximadamente 80%; já em relação à amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 também de referência o ganho foi de 73%. Mas para ambos os casos houve um ganho de resistência.

A amostra 6-C1_A1,5_AE1,5_M10_L5 foi a que apresentou o melhor resultado na resistência à tração na flexão, ela possui uma composição de 10% de microrganismo e 5% de lactato em relação à massa de cimento adicionada, conforme ilustrado na figura 46.

Figura 46 – Média de resistência à tração na flexão das amostras

Fonte: Elaboração própria (2025).

Da mesma maneira, quando se compara a amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 com a amostra 3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5 percebe-se uma variação de 6,129 MPa com desvio padrão de 0,472 MPa, o que equivale a 7,7% de desvio da amostra sem microrganismo e lactato para 7,585 MPa com desvio padrão de 0,650 MPa, que equivale a 8,5% de desvio da amostra com microrganismos e lactato. Ainda assim, ao observar a amostra 4-C1_A1,5_AE1,5_M10_L10, com 10% de microrganismo e lacto, verifica-se que não ocorre uma elevação da capacidade de resistência à tração na flexão dos corpos de prova. Contudo, para a amostra 7-C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5 observa-se um ganho de resistência. Ou seja, para adições na mesma proporção de microrganismo e lactato, a maior resistência à tração na flexão ocorreu para nível de adição até 7,5% em relação à massa de cimento.

Quando se compara o resultado obtido para as amostras 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 e 6-C1_A1,5_AE1,5_M10_L5, verifica-se que possuem os melhores resultados absolutos de resistência à tração na flexão; porém, observa-se que pode haver uma condição ótima para a relação lactato de cálcio microrganismo.

Entretanto, de modo geral, os traços contendo o microrganismo e o lactato apresentaram incremento de resistência em relação às misturas de referência, comportamento que pode ser visto em algumas pesquisas atribuindo à precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP). Estudos indicam que esse

mecanismo pode promover aumentos de resistência à tração na flexão entre 15% e 40%, em função do preenchimento de microfissuras e da melhoria da coesão da matriz (Mondal, 2019; Schwantes-Cezario *et al.*, 2019; Yamasmit *et al.*, 2023). Para esta pesquisa foi obtida uma variação de até 80%, o que pode ser atribuído ao fato da utilização de outro componente (argila expandida) em substituição a parte da areia utilizada no traço, além do fato do encapsulamento ter sido preparado no corpo do próprio agregado substituto, que, neste caso, foi a argila expandida.

Na tabela 14, estão apresentados os valores médios de resistência à compressão obtidos nos ensaios.

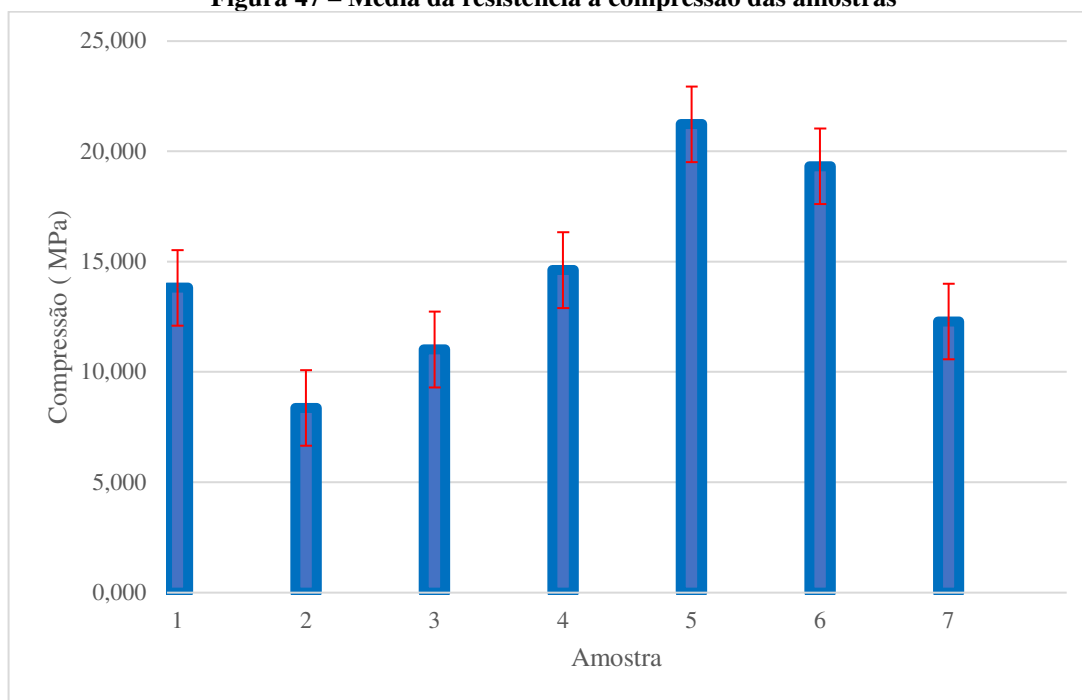
Tabela 14 – Valores de compressão obtidos nos corpos de prova

Amostras	Média da Compressão (MPa)	Variação em relação à referência 1
1-C1_A3_AE0_M0_L0	13,811	0%
2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0	8,366	-39%
3-C1_A1,5_AE1,5_M5_L5	11,017	-20%
4-C1_A1,5_AE1,5_M10_L10	14,618	6%
5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10	21,227	54%
6- C1_A1,5_AE1,5_M10_L5	19,322	40%
7- C1_A1,5_AE1,5_M7,5_L7,5	12,284	-11%

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que os valores de compressão também sofreram uma melhora em seus resultados quando comparados com a amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 e, em alguns casos, com a amostra 1-C1_A3_AE0_M0_L0. Outros pesquisadores descrevem na literatura resultados de melhora no comportamento à compressão dos corpos de prova, como Safiuddin *et al.* (2022); Vaezi *et al.* (2020); Shanmugam *et al.* (2022); Udhaya *et al.* (2023) e Premalatha *et al.* (2023).

Conforme pode ser visto na figura 47, para a compressão, a amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 foi a que apresentou um melhor desempenho. Essa amostra possui uma composição de 5% de microrganismo e 10% de lactato em relação à massa de cimento adicionada.

Figura 47 – Média da resistência à compressão das amostras

Fonte: Elaboração própria (2025).

O ganho de resistência à compressão da amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 em relação à amostra 1-C1_A3_AE0_M0_L0 de referência foi de aproximadamente 54%, já em relação à amostra 2-C1_A1,5_AE1,5_M0_L0 também de referência o ganho foi de 131%.

A amostra 5-C1_A1,5_AE1,5_M5_L10 foi a que apresentou o melhor resultado na resistência à compressão, assim como no resultado da resistência de tração na flexão com uma proporção não uniforme de lactato e microrganismo. Da mesma maneira, quando se compara a amostra 2-C1A1,5AE1,5M0L0 com a amostra 3-C1A1,5AE1,5M5L5, percebe-se uma variação de 8,366 MPa da amostra sem microrganismo e lactato para 11,017 MPa da amostra com microrganismos e lactato. Somado a isso, na amostra 4-C1A1,5AE1,5M10L10, com 10% de microrganismo e lacto, verifica-se que ocorre uma elevação da capacidade de resistência à compressão para 14,618 MPa com 10% de microrganismo e lactato de cálcio.

Da mesma maneira que o ensaio de tração na flexão, algumas pesquisas citam aumento de resistência à compressão na ordem de 10% a 30% devido também à precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP), a saber: Mondal e Ghosh (2019); Schwantes-Cezario *et al.* (2019) e Yamasamit *et al.* (2023).

Por fim, no caso específico da substituição por argila expandida, a redução de resistência à compressão observada pode ser associada à maior fragilidade da argila seca e à sua elevada porosidade, o que favorece o desenvolvimento de zonas de concentração de

tensões e ruptura prematura. Ainda assim, a combinação da argila expandida com agentes biológicos mostrou-se capaz de compensar parcialmente essa perda por meio da formação de carbonato de cálcio nos poros e fissuras (Yew *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2021).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo sobre o potencial da utilização em argamassas cimentícias de microrganismos bacterianos presentes num probiótico comercial para alimentação animal juntamente com nutrientes. Estes microrganismos e nutrientes foram encapsulados em partículas de argila expandida, como uma solução no fechamento de fissuras destas argamassas cimentícias. Verificou-se também a influência desses agentes nas propriedades mecânicas de compressão e tração na flexão em matrizes cimentícias preparadas com este material.

Com isso, pode-se concluir que:

- A argila expandida se mostrou favorável ao encapsulamento de *Bacillus subtilis* presentes no probiótico comercial, pois conseguiu preservá-lo quando da preparação da argamassa e na cura, fase esta em que há diminuição dos poros;
- A substituição de 50% do agregado miúdo por argila expandida pode reduzir a resistência mecânica quando não adicionado microrganismos e lactato de cálcio devido à maior porosidade e menor resistência intrínseca do agregado leve;
- Os microrganismos *Bacillus-subtilis* presentes no probiótico comercial demonstraram ser eficazes no fechamento de fissuras ao longo do tempo de 60 dias analisados com a precipitação do lactato de cálcio como pode ser visto nos ensaios de MEV e EDS na amostra contendo este microrganismo;
- Os microrganismos *Bacillus-subtilis* se mostraram potencialmente resistentes a sobreviverem em ambientes altamente alcalino;
- A resistência à tração na flexão apresentou aumento em todas as composições com adição de agentes biológicos em relação à referência. Esse comportamento está associado à precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (MICP) no preenchimento de microfissuras;
- O acréscimo de 10% de microrganismo e de 5% de lactato de cálcio foi capaz de aumentar a resistência à tração na compressão em até 73% em relação a uma amostra sem adição destes dois componentes utilizando o mesmo traço;
- A resistência à compressão não apresentou aumento uniforme em todas as composições, sendo influenciadas pela incorporação da argila expandida, cuja maior porosidade e menor resistência contribuem para a redução do desempenho mecânico.

Ainda assim, em algumas formulações, observou-se recuperação parcial da resistência, atribuída, provavelmente, à precipitação de carbonato de cálcio nos poros e microfissuras (MICP);

- O acréscimo de 5% de microrganismo e de 10% de lactato de cálcio possibilitou um aumento de 131% na resistência à compressão quando comparado a uma amostra sem adição destes dois componentes utilizando o mesmo traço;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, E.; ABRAHAM, G. M. Effect of *Bacillus subtilis* bacteria on waste foundry sand-containing concrete. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.022>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregados miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISSO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.
- AFIFUDIN, H. *et al.* Microbial participation in the formation of calcium silicate hydrated (CSH) from *Bacillus subtilis*. **Procedia Engineering**, v. 20, p. 159–165, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811029602>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- ALAZHARI, H. *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. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181732295X>. Acesso em: 01 ago. 2025.

BENJAMIN, B.; LEKSHMI, S.; ZACHARIAH, S.; SUDHAKUMAR, J.; SUCHITHRA, T. V. A study on marine clay as fine aggregate in microbial cement mortar mix. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1040-1045, 2022.

BEZERRA, A. C. da S. História do cimento Portland. In: SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry. Paris: United Nations Environment Programme, 2017.

CAILLEUX, E.; POLLET, V. Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELF-HEALING MATERIALS, 2., Chicago, 2009. **Anais [...]**. Chicago, 2009.

CASTRO-ALONSO, M. J. *et al.* Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and its potential in bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts. **Structural Materials**, v. 6, jun. 2019. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2019.00126/full>. Acesso em: 01 ago. 2025.

COHADES, A. *et al.* Progress in self-healing fiber-reinforced polymer composites. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, 2018. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admi.201800177>. Acesso em: 01 ago. 2025.

DAVIS, J. Self-healing concrete repairs its own cracks. **IFL Science**, 18 mai. 2015. Disponível em: <https://www.iflscience.com/self-healing-concrete-repairs-its-own-cracks-28331>. Acesso em: 01 ago. 2025.

DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MUKHERJEE, A. Synergistic role of bacterial urease and carbonic anhydrase in carbonate mineralization. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 172, p. 2552–2561, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12010-013-0694-0>. Acesso em: 01 ago. 2025.

FERNANDEZ, C. A. *et al.* Progress and challenges in self-healing cementitious materials. **Journal of Materials Science**, v. 56, p. 201-230, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-020-05164-7>. Acesso em: 01 ago. 2025.

FERREIRA, Beatriz Bernardes Dias. Tipificação de patologias em revestimentos argamassados. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Materiais de Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2010.

FILHO, R. D. T.; SIQUEIRA, T. P. L.; SILVA, L. C.; CALDAS, L. R. **Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento**. Project DIP-BR, 2024.

FRANK, T. Civil engineers say fixing infrastructure will take \$4.6 trillion. **CNN Money**, 9 mar. 2017. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2017/03/09/news/infrastructure-report-card>.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

GANDHIMATHI, A.; SUJI, D. Studies on the development of eco-friendly self-healing concrete-a green building concept. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 14, n. 3, p. 639–644, 2015. Disponível em: <https://kahedu.edu.in/naac/C-3/Website%20documents/3.7.1/1413.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2025.

GAO, M. *et al.* Immobilized bacteria with pH-response hydrogel for self-healing of concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 261, 110225, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720301602>. Acesso em: 01 ago. 2025.

GHOSH, P. *et al.* Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 1980–1983, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884605001055>. Acesso em: 01 ago. 2025.

GONZALES, Y. V. **Influência da biomineralização nas propriedades físico – mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos**. 2009. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/6907>. Acesso em: 01 ago. 2025.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras para concreto armado. 1993. Tese (Livre docência) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES DO LEME, 2., 2004, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

JENA, S.; BASA, B.; PANDA, K. C. Effect of bacillus cohnii bacteria on the properties of concrete. In: DAS, B. B. *et al.* **Recent Developments in Sustainable Infrastructure**. Singapura: Springer, 2021.

JIANG, L.; JIA, G.; JIANG, C.; LI, Z. Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117222, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117222>. Acesso em: 01 ago. 2025.

JONKERS, H. M.; THIJSEN, A.; MUYZER, G.; OGUZHAN, C.; SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230–235, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>. Acesso em: 01 ago. 2025.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. **HERON**, v. 56, n. 1/2, 2011.

KHUSHNOOD, R. A. *et al.* Bio-inspired self-healing cementitious mortar using *Bacillus subtilis* immobilized on nano-/micro-additives. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 30, n. 1, p. 3–15, 1 jan. 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X18806401>. Acesso em: 01 ago. 2025.

KHUSHNOOD, R. A. *et al.* Bio-inspired self-healing and self-sensing cementitious mortar using *Bacillus subtilis* immobilized on graphitic platelets. **Construction and Building Materials**, v. 316, 17 jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821035510?via%3Dihub>. Acesso em: 01 ago. 2025.

KOGA, D. S.; SANTOS, L. M.; NUNES, W. C. **Bioconcreto** - autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/895>. Acesso em: 01 ago. 2025.

LI, D. *et al.* Synergetic effect of superabsorbent polymer (SAP) and crystalline admixture (CA) on mortar macro-crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820305262>. Acesso em: 01 ago. 2025.

LIMA, A. B. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MAHESWARAN, S. *et al.* Strength improvement studies using new type wild strain *Bacillus cereus* on cement mortar. **Current Science**, v. 106, n. 1, p. 50–57, 2014. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24099862>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MEDEIROS, H. Doenças concretas. **Revista Técnica**, Edição 160, p. 62–68, jul. 2010. Disponível em: <https://revistatechne.com.br/edicao/160/>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu, 2002, p. 1425–1432.

MONDAL, Sandip; GHOSH, Aparna (Dey). Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 67–75, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.122>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 323, p. 193–199, 2006.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000200012>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MORS, R. M.; JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete: Evaluation of full-scale demonstrator projects. **RILEM Technical Letters**, v. 4, p. 138–144, 2019.

Disponível em: <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/93>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MUHAMMAD, N. Z. *et al.* Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1123–1132, jun. 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630304X>. Acesso em: 01 ago. 2025.

NUNES, J. J. B. C.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; SARAIVA, R. M. D. C. Caracterização morfológica do agregado leve de argila expandida brasileira com utilização do AIMS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 213–227, 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300547>. Acesso em: 01 ago. 2025.

OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OTHMAN, A. Introduction to self-healing concrete via biological process. UNDERGRADUATE SEMINAR ON BUILT ENVIRONMENT AND TECHNOLOGY, 3., Seri Iskandar, 2018. **Anais [...]**. Seri Iskander, Universiti Teknologi Mara Perak Branch, 2018.

PACHECO, F.; LOEFF, A.; MÜLLER, V.; EHRENBRING, H. Z.; CHRIST, R.; MODOLO, R. C. E.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of concrete self-healing with different insertion techniques of chemical and bacterial solutions. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n. 1, p. 32–46, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.559>. Acesso em: 01 ago. 2025.

PASSOS, L. L. L.; MARSZAL, M. T.; ABRAHÃO, S. C. Concreto: da origem histórica ao preparo da massa. ENAPROC, São Mateus do Sul, 2016.

PEREIRA, V. L. S.; RÊGO, J. H. S.; HOPPE FILHO, J. Comparação da reatividade de resíduo de cerâmica vermelha cominuído e matéria-prima de olaria calcinada. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 255–272, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400702>. Acesso em: 01 ago. 2025.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: Globo, 1971.

POORNIMA, V. *et al.* Environmental influence on bacterial efficiency in ensuring self-healing mortars. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 13, p. 6461–6479, 2021. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2021.1946431>. Acesso em: 01 ago. 2025.

PREMALATHA, P. V.; GEETHANJALI, M.; SUNDARARAMAN, S.; MURALI, C. S. An experimental investigation on self-healing concrete using *Bacillus subtilis*. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.118>. Acesso em: 01 ago. 2025.

PRIYOM, S. N.; ISLAM, M. M.; SHUMI, W. Utilization of Bacillus Subtilis Bacteria for Improving Mechanical Properties of Concrete. **Journal of the Civil Engineering Forum**, v. 1000, n. 1000, dez. 2020. Disponível em: <https://jurnal.ugm.ac.id/jcef/article/view/60216>. Acesso em: 01 ago. 2025.

RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of concrete using micro-organisms. **Materials Journal**, v. 98, n. 1, 2001. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10154>. Acesso em: 01 ago. 2025.

RAMESHKUMAR, V. *et al.* Improvements in mechanical and durability parameters of bio-engineered concrete with metakaolin as a partial substitute for cement. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 7, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2020.1767696>. Acesso em: 01 ago. 2025.

RAO, M. V. S. *et al.* Bioengineered concrete-a sustainable self-healing construction material. **Research Journal of Engineering Sciences**, v. 2, n. 6, p. 45–51, 2013. Disponível em: <https://www.isca.me/IJES/Archive/v2/i6/8.ISCA-RJEngS-2013-065.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2025.

ROULIN-MOLONEY, A.; BERCHTEN, A. R. The repair of concrete structures by injection with epoxide resin. **The Journal of Adhesion**, v. 22, n. 2, p. 125–138, 1987. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218468708074996>. Acesso em: 01 ago. 2025.

ROY, R.; ROSSI, E.; SILFWERBRAND, J.; JONKERS, H. Encapsulation techniques and test methods of evaluating the bacteria-based self-healing efficiency of concrete: a literature review. **Nordic Concrete Research**, v. 62, n. 1, p. 63–85, 2020. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.2478/ncr-2020-0006>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SANTOS, F. F.; SANTOS, F. L. A.; SANTOS, J. N. S.; PEREIRA, M. H. N.; ALMEIDA, V. G.; MELO, F. M. C.; OLIVEIRA, H. A.; RISSO, S. S. O. Estudo da variação granulométrica de agregado sintético para fabricação de placas pré-moldadas de concreto não estrutural. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0307>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SAFIUDDIN, M.; IHTHESHAAM, S.; ABDUL KAREEM, R.; SHALAM. A study on self-healing concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 52, p. 1175–1181, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.023>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; PORTO, M. F.; SANDOVAL, G. F. B.; NOGUEIRA, G. F. N.; COUTO, A. F.; TORALLES, B. M. Effects of *Bacillus subtilis* biocementation on the mechanical properties of mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 31–38, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952019000100005>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SILVA, E. C. *et al.* Meios alternativos constituídos por subproduto do cultivo de microrganismos fotossintetizantes para o crescimento de *Lactobacillus acidophilus* e produção de β -Galactosidase. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 1113–1127, ago. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/6846>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SHANMUGAM, R.; GOWSALYA, M.; GOWSHALYA, P.; RAMATHI, J.; BHAVITHRA, R. Optimization of fault in structure by using *Bacillus subtilis*. **Materials Today: Proceedings**, v. 68, p. 1408–1414, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.463>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SHEN, L.; YU, W.; LI, L.; ZHANG, T.; ABSHIR, I. Y.; LUO, P.; LIU, Z. Microorganism, carriers, and immobilization methods of the microbial self-healing cement-based composites: a review. **Materials**, Basel, v. 14, n. 17, p. 5116, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14175116>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SILVA, A. C. G. da; BECKER, A. R.; SILVA, C. T. O. e; MARÇULA, S. C.; PEREIRA, L. S.; GACHET, L. A.; GOMES, A. E.; LINTZ, R. C. C. Comparison of the properties of mortars containing expanded clay, vermiculite, and rubber residue. **Cerâmica**, v. 69, n. 392, p. 325–331, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132024703923502>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing – A review. **Construction and Building Materials**, v. 95, 1800179, p. 774–787, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815300428?via%3Dihub>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SNOECK, D.; MALM, F.; CNUDDÉ, V.; GROSSE, C. U. TITTELBOOM, K. V. Validation of self-healing properties of construction materials through nondestructive and minimal invasive testing. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, jun. 2018. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admi.201800179>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SODA, P. R. K.; MINI, K. M. Performance enhancement and remediation of microcracks in cement mortar by doping calcite-precipitating microorganisms. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, 2022. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0004176>.

SODA, P. R. K.; MINI, K. M. A critical review on assessment of self-healing performance of bioconcrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 740–750, 1 fev. 2023.

Disponível em: <https://www.springerprofessional.de/en/a-critical-review-on-assessment-of-self-healing-performance-of-b/23776220>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SOUZA, C. M. D. de *et al.* Probióticos e a indústria de alimentos: uma visão geral. **Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, mar. 2020. Disponível em: <https://revistascientificas.ifrj.edu.br/index.php/alimentos/article/view/1435>. Acesso em: 01 ago. 2025.

STANASZEK-TOMAL, E. Bacterial concrete as a sustainable building material? **Sustainability**, v. 12, n. 2, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/2/696>. Acesso em: 01 ago. 2025.

SUBASH, S.; POORNIMA, V.; JAYANARAYANAN, K. A study on the effect of pH conditions on the properties of self-healing mortar cubes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 577, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/577/1/012027/meta>. Acesso em: 01 ago. 2025.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 233–247, abr. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815002019?via%3Dihub>. Acesso em: 01 ago. 2025.

TEODORO, L.; PARABOCZ, C. R. B.; ROCHA, R. D. C. Caracterização da argila vermiculita expandida: avaliação dos padrões físico-químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1151>. Acesso em: 01 ago. 2025.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: Causa, Prevenção e recuperação**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1996.

TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. De; MUYNCK, W de; VERSTRAETE, W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 157–166, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884609002361>. Acesso em: 01 ago. 2025.

TYAGI, G.; LAHOTU, M.; SRIVASTAVA, A.; PATIL, D.; JADHAV, U. U.; PUREKAR, A. Bioconcrete-enabled resilient construction: a review. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 196, n. 5, p. 2901–2927, mai. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04427-8>. Acesso em: 01 ago. 2025.

UDHAYA, S.; VANDHANA DEVI, V.; PHILIPS, J.; LIJA, R. L. Experimental study on bio-concrete for sustainable construction. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.676>. Acesso em: 01 ago. 2025.

VAEZI, M.; ZAREEI, S. A.; JAHADI, M. Recycled microbial mortar: effects of bacterial concentration and calcium lactate content. **Construction and Building Materials**, v. 234, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117349>. Acesso em: 01 ago. 2025.

VASHISHT, R.; SHUKLA, A. Potential application of bacteria to improve the self-healing and strength of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 10, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41024-020-0073-5>. Acesso em: 01 ago. 2025.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self-healing concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008–1014, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817313752>. Acesso em: 01 ago. 2025.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. (Coord.). **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

WANG, J. Y. *et al.* Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 139–152, 2014. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&id=W1988374761>. Acesso em: 01 ago. 2025.

WONG, P. Y.; MAL, J.; SANDAK, A.; LUO, L.; JIAN, J.; PRADHAN, N. Advances in microbial self-healing concrete: a critical review of mechanisms, developments, and future directions. **Science of the Total Environment**, v. 947, p. 174553, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174553>. Acesso em: 01 ago. 2025.

XU, J.; YAO, W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 1–10, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884614001203>. Acesso em: 01 ago. 2025.

XUE, C. *et al.* A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials. **Structural Concrete**, v. 20, n. 1, p. 198–212, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201800177>. Acesso em: 01 ago. 2025.

YAMASAMIT, N.; SANGKEAW, P.; JITCHAIJAROEN, W.; THONGCHOM, C.; KEAWSAWASVONG, S.; KAMCHOOM, V. Effect of *Bacillus subtilis* on mechanical and self-healing properties in mortar with different crack widths and curing conditions. **Scientific Reports**, v. 13, p. 7844, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34837-x>. Acesso em: 01 ago. 2025.

YEHIA, S.; IBRAHIM, A. M. A.; AHMED, D. F.; DESOUKY, S. G. Bacterial self-healing and mechanical strength enhancement in concrete: a comparative study of *Bacillus subtilis*, *Bacillus sphaericus*, and *Escherichia coli*. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 10, p.

509, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02278-2>. Acesso em: 01 ago. 2025.

YEW, M. K.; YEW, M. C.; BEH, J. H. Effects of recycled crushed light expanded clay aggregate on high strength lightweight concrete. **Materials International**, v. 2, n. 3, p. 311–317, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33263/Materials23.311317>. Acesso em: 01 ago. 2025.

YUNOVICH, M.; THOMPSON, N. G. Corrosion of highway bridges: economic impact and control methodologies. **Concrete International**, v. 25, n. 1, p. 52–57, jan. 2003. Disponível em: <https://www.cortecvci.com/Publications/Papers/highwaybridge.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2025.

ZAMANI, M. *et al.* Bacteria encapsulation using synthesized polyurea for self-healing of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 249, 118556, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820305614>. Acesso em: 01 ago. 2025.