

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA

FACULDADE UNIGUAÇU

ENGENHARIA CIVIL

PROJETO FINAL DE CURSO II

TAMIRES SOUZA RAZENTE

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS A BASE DE CIMENTO
DEVIDO À BIOPRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO:
ESTUDOS PRELIMINARES**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025

TAMIRES SOUZA RAZENTE

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS A BASE DE CIMENTO
DEVIDO À BIOPRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO:
ESTUDOS PRELIMINARES**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para
aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso II do
curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Ma. Melissa Pastorini Proença.

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

TAMIRES SOUZA RAZENTE

AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS A BASE DE CIMENTO DEVIDO À BIOPRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO: ESTUDOS PRELIMINARES

Trabalho final de Conclusão de Curso apresentado, sob a orientação do Professor (a) Ma. Melissa Pastorini Proença, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil, da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Ma. Melissa Pastorini Proença
UNIGUAÇU

Prof. Esp. Mariele Kreutzfeld
UNIGUAÇU

Prof. Ma. Meire Claudia Barbosa
UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 06 DE NOVEMBRO DE 2025

À minha família por todo amor,
apoio e por nunca deixarem que eu
desistisse dos meus sonhos. Este trabalho
é também de vocês.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa muito mais do que o encerramento de uma etapa acadêmica. É a concretização de um sonho construído com esforço, dedicação e, acima de tudo, com o apoio de pessoas que foram fundamentais ao longo dessa caminhada.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança nos momentos em que pensei em desistir, e por me permitir chegar até aqui com fé e esperança renovadas.

À minha família, meu porto seguro. Ao meu pai Sergio, à minha mãe Lucia e à minha irmã Taise, pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava. Cada palavra de apoio e cada gesto de carinho foram essenciais para que eu seguisse em frente. Este trabalho também é de vocês.

À professora Edna Possan, que foi mais do que uma educadora: foi uma inspiração. Sua sensibilidade, seus conselhos e sua confiança em mim foram fundamentais para que eu encontrasse meu caminho na engenharia civil. Obrigada por não me deixar desistir.

À minha orientadora, Melissa Pastorini Proença, pela paciência, dedicação e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho. Sua orientação foi essencial para que este projeto ganhasse forma e significado.

Aos professores e colegas do curso, que compartilharam conhecimento, experiências e momentos que levarei comigo para toda a vida. Cada aula, cada conversa e cada desafio enfrentado juntos contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos de cansaço e incerteza, oferecendo apoio, escuta e palavras de encorajamento. A amizade de vocês foi um alívio e uma força nos dias difíceis.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto, cada palavra e cada apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Este TCC é também de vocês.

“O futuro pertence àqueles que
acreditam na beleza de seus sonhos.”
— Eleanor Roosevelt

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre a autocicatrização de materiais cimentícios por meio da bioprecipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), promovida por bactérias do gênero *Bacillus subtilis*. A pesquisa parte da necessidade de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, que frequentemente sofrem com fissuras e microtrincas decorrentes de manifestações patológicas, como retração, sobrecargas, variações térmicas e ataques químicos. Essas discontinuidades comprometem a integridade estrutural e favorecem a penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e dióxido de carbono, acelerando processos de degradação. A proposta do estudo é avaliar a eficiência da autocicatrização biológica em argamassas, utilizando duas linhagens bacterianas: AP91, oriunda da casca de arroz e fornecida pela EMBRAPA, e BCAP/B2 1-18, isolada de uma edificação e depositada na coleção de microrganismos da UNILA. As amostras foram submetidas a dois tipos de cura (submersa e com manta geotêxtil), além da adição de nutrientes e aditivos incorporadores de ar, com o objetivo de criar microambientes favoráveis à sobrevivência bacteriana. Os ensaios realizados incluíram compressão axial, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e análise micrográfica em estereomicroscópio. Os resultados indicaram que a cura submersa favoreceu a germinação dos esporos e a atividade metabólica das bactérias, promovendo maior eficiência na cicatrização das fissuras. A linhagem AP91 apresentou desempenho superior, sendo capaz de cicatrizar fissuras de até 0,104 mm. Observou-se também a presença de precipitados de carbonato de cálcio em todas as amostras, inclusive nas de referência, evidenciando a atuação de mecanismos autógenos (naturais da matriz cimentícia) e autônomos (induzidos por agentes externos). A adição de nutrientes potencializou a atividade bacteriana, enquanto o aditivo incorporador de ar contribuiu para a criação de espaços internos que favoreceram a colonização microbiana, embora tenha causado leve redução na resistência à compressão. Os ensaios não destrutivos demonstraram aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, indicando maior homogeneidade da matriz cimentícia e redução das discontinuidades internas. Conclui-se que a autocicatrização biológica é uma tecnologia promissora para o aumento da durabilidade, resistência e sustentabilidade de estruturas de concreto, especialmente em ambientes úmidos. Os resultados obtidos reforçam a importância de estudos complementares para aprimorar metodologias laboratoriais e adaptar soluções às condições reais de aplicação na engenharia civil, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais resilientes e de baixo impacto ambiental.

Palavra-chave: Autocicatrização; Manifestações patológicas; Bactéria; Autógenos; Autônomos.

ABSTRACT

This study presents a preliminary investigation into the self-healing capacity of cement-based materials through the biogenic precipitation of calcium carbonate (CaCO_3), induced by bacteria of the *Bacillus subtilis* genus. The research addresses the challenge of maintaining the durability of concrete structures, which are frequently affected by cracks and microcracks resulting from pathological manifestations such as shrinkage, overloads, thermal variations, and chemical attacks. These discontinuities compromise structural integrity and facilitate the ingress of aggressive agents, accelerating degradation processes. The objective of the study was to evaluate the efficiency of biological self-healing in mortar samples using two bacterial strains: AP91, derived from rice husk and supplied by EMBRAPA, and BCAP/B2 1-18, isolated from a building and deposited in the microorganism collection of UNILA. The samples were subjected to two curing methods (submerged and geotextile blanket), with variations in the addition of nutrients and air-entraining admixtures, aiming to create microenvironments conducive to bacterial survival. Experimental procedures included axial compression tests, ultrasonic pulse velocity measurements, and stereomicroscopic analysis. The results showed that submerged curing enhanced spore germination and bacterial metabolic activity, leading to more effective crack healing. The AP91 strain demonstrated superior performance, successfully healing cracks up to 0.104 mm. Calcium carbonate precipitation was observed in all samples, including the reference ones, indicating the presence of both autogenous (natural) and autonomous (externally induced) healing mechanisms. The addition of nutrients boosted bacterial activity, while the air-entraining admixture helped create internal voids that supported microbial colonization, although it slightly reduced compressive strength. Non-destructive tests revealed increased ultrasonic wave propagation velocity, suggesting improved homogeneity of the cement matrix and reduced internal discontinuities.

Keywords: Self-healing; Pathological manifestations; Bacteria; Autogenous; Autonomous.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	17
3 OBJETIVOS	19
3.1 Objetivo geral	19
3.2 Objetivos específicos	19
4 REVISÃO DE LITERATURA	20
4.1 Conceito de autocura em concretos	22
4.2 Bactérias utilizadas e suas condições nutricionais	26
4.3 Quantificação de esporos	27
4.4 Caracterização dos materiais	28
4.5 Aditivos incorporadores de ar	29
4.6 Estudos anteriores	29
5 MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1 Materiais	31
5.2 Preparação das argamassas	32
5.3 Indução de fissuras	35
5.4 ensaios em estado endurecido	36
5.4.1 <i>Ensaio de resistência à compressão</i>	36
5.4.2 <i>Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU)</i>	37
5.4.3 <i>Análise visual e registro do fechamento das fissuras</i>	37
5.4.4 <i>Análise micrográfica e identificação de precipitados</i>	38
5.5 Organização experimental	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	46

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Processo de corrosão da armadura	20
Figura 2 - Capacidade de preenchimento de fissuras.	24
Figura 3 - Processo de biorrecuperação.	24
Figura 4 - Ciclo de autocicatrização com bactérias.	25
Figura 5 – Preparação das amostras.	34
Figura 6 – Amostras na cura.	35
Figura 7 – Abertura das fissuras.	36
Figura 8 - a) Leitura das fissuras; b) marcação dos grids..	37
Figura 9 - Registros fotográficos adicionais das fissuras..	41
Figura 10 - Amostras AP91..	50
Figura 11 – Amostras AP91	50
Figura 12 – Amostras BCAP	51
Figura 13 – Amostras BCAP	51
Figura 14 – Amostras BCAP	52
Figura 15 – Amostras AP91.....	52

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 – Bactérias utilizadas no presente trabalho.....	32
Tabela 2 - Traço para 1 amostra.....	32
Tabela 3 - Quantidade de amostras.....	33
Tabela 4 – Traço amostras 5x10 cm em kg/m ³	33
Tabela 5 – Traço amostras 4x4x16 cm em kg/m ³	34
Tabela 6 - Determinação do tipo de cura.	35

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP91	<i>Bacillus subtilis</i> oriundo da casca de arroz (fornecido pela EMBRAPA)
BCAP/B2 1-18	<i>Bacillus subtilis</i> isolado de edificação (coleção UNILA)
BICP	<i>Biologically Induced Calcium Carbonate Precipitation</i> (Precipitação Biológica de Carbonato de Cálcio)
CaCO₃	Carbonato de Cálcio
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
MH	Mueller Hinton (meio de cultura líquido)
NA	Ágar Nutriente
NBR	Norma Brasileira
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
SAP	<i>Superabsorbent Polymer</i> (Polímero Superabsorvente)
TEI / IET	Técnica de Excitação por Impulso / <i>Impulse Excitation Technique</i>
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais empregado na engenharia civil em razão de sua alta resistência à compressão, versatilidade e custo relativo reduzido. Entretanto, a integridade e a durabilidade das estruturas de concreto são constantemente ameaçadas pela formação de fissuras e microfissuras, as quais atuam como vias preferenciais para a penetração de agentes agressivos (água, íons cloreto, dióxido de carbono), acelerando processos de degradação, como a corrosão da armadura e ataques químicos (ABNT, 2023; HELENE *et al.*, 2011). A presença e evolução dessas descontinuidades prejudicam propriedades fundamentais do compósito como, permeabilidade, módulo de elasticidade, resistência à tração e coesão da matriz, reduzindo a vida útil projetada da estrutura.

As origens das fissuras são múltiplas: retração plástica e por secagem, retração autógena, variações térmicas, sobrecargas, recalques diferenciais, reações químicas (ataque por sulfatos, reação álcali-sílica) e ciclos gelo-degelo. Tecnicamente, fissuras classificam-se em ativas (abertura variável em resposta a carregamentos ou variações ambientais) e passivas (estabilizadas, normalmente decorrentes de retração), distinção que orienta estratégias de reparo e reabilitação (ZHANG *et al.*, 2024).

A autocicatrização do concreto é uma estratégia capaz de reduzir a necessidade de intervenções corretivas e de aumentar a durabilidade estrutural. Conceitualmente, distinguem-se dois mecanismos principais:

- Autocicatrização autógena — processos naturais da matriz cimentícia tais como hidratação contínua de partículas não hidratadas e carbonatação, que podem conduzir à precipitação de produtos (principalmente CaCO_3) e à redução local da abertura de fissuras;
- Autocicatrização autônoma — introdução deliberada de agentes externos (cápsulas, polímeros superabsorventes, agregados porosos carregados, microrganismos) que reagem ou se ativam com a presença de umidade para selar fissuras de forma dirigida.

No contexto da autocicatrização autônoma, a utilização de microrganismos produtores de carbonato de cálcio tem emergido como solução inovadora e promissora. Bactérias do gênero *Bacillus* (por exemplo *Bacillus subtilis*) são especialmente adequadas por serem formadoras de esporos, tolerantes a ambientes alcalinos e capazes de germinar com a disponibilidade de água e nutrientes, iniciando

atividades metabólicas que elevam a concentração local de íons carbonato e promovem a nucleação e precipitação de CaCO_3 na região fissurada. A biomineralização biotecnológica (*Biologically Induced Calcium Carbonate Precipitation — BICP*) pode ocorrer por diferentes rotas metabólicas (por exemplo ureólise, oxidação de compostos orgânicos, desnitrificação), porém o resultado técnico relevante para a engenharia de materiais é a formação de fase carbonática sólida que reduz a permeabilidade e recupera a continuidade do compósito (JONKERS *et al.*, 2010; DE MUYNCK *et al.*, 2010).

A efetividade do processo biológico depende de múltiplos fatores físico-químicos e operacionais: disponibilidade de água e íons cálcio, pH local, temperatura, presença de nucleadores e de aditivos na mistura, densidade de esporos viáveis, método de incorporação (esporos livres, encapsulados, imobilizados em suporte poroso) e o regime de cura aplicado às amostras.

Em particular, a umidade temporal e a renovação de água controlam a ativação (germinação) dos esporos e a manutenção das reações metabólicas necessárias para precipitação de carbonatos. Assim, protocolos de cura que mantêm contato contínuo com água (cura submersa) tendem a favorecer a germinação e a precipitação biogênica em comparação com métodos que limitam a umidade disponível (por exemplo cura com manta geotêxtil), embora cada regime possa melhor representar cenários de serviço distintos (estruturas submersas versus elementos internos pouco úmidos) (GHELLERE, 2021; LENZ, 2022;).

Do ponto de vista experimental, a avaliação integrada da autocicatrização biológica demanda técnicas complementares: ensaios mecânicos clássicos (compressão axial, flexão) para verificar efeitos na resistência; ensaios não destrutivos (velocidade de pulso ultrassônico, VPU; módulo dinâmico por Técnica de Excitação por Impulso, TEI / IET) para monitoramento da homogeneidade e do retomo elástico; e análises micrográficas (estereomicroscopia, microscopia eletrônica ou difração) para caracterização morfológica e mineralógica das precipitações (identificação de CaCO_3 , calcita/vaterita/aragonita) e quantificação da redução da abertura de fissura. A combinação desses métodos permite correlacionar mudanças microestruturais com alterações nas propriedades mecânicas e de transporte do material.

Apesar de avanços relevantes na área, lacunas técnicas persistem: há necessidade de estudos comparativos controlados que quantifiquem o efeito do regime de cura (disponibilidade contínua de água versus a umidade limitada) sobre a

eficiência de distintas linhagens bacterianas, assim como o impacto de aditivos (incorporadores de ar) e de suplementação nutricional na viabilidade microbiana e nas propriedades mecânicas da matriz.

O presente trabalho propõe investigar essas variáveis de forma sistemática, utilizando duas linhagens de *Bacillus subtilis* (AP91 e BCAP/B2 1-18), diferentes regimes de cura (submersa e manta geotêxtil), e a inclusão de aditivo incorporador de ar e nutrientes, objetivando compreender os mecanismos físico-químicos subjacentes à autocicatrização biológica em argamassas e avaliar sua aplicabilidade técnica.

2 JUSTIFICATIVA

A otimização de estratégias de reparo e aumento da durabilidade do concreto tem impacto direto na segurança estrutural, sustentabilidade ambiental e economia de ciclo de vida das obras. Intervenções tradicionais de reparo (injeção de resinas, selagem epóxi, recobrimentos) são, em muitos casos, intervenções pontuais e com custo elevado quando escaladas ao ambiente construído.

A tecnologia de autocicatrização biológica tem potencial para reduzir a necessidade de manutenções periódicas, minimizar paradas operacionais e diminuir o consumo de materiais e energia associados a reparos, resultando em mitigação de emissões indiretas de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura.

Tecnicamente, o presente estudo justifica-se pelos seguintes motivos:

1. **Relevância científica e inovação tecnológica** — a comparação entre regimes de cura e sua influência na biomineralização por diferentes linhagens bacterianas fornece subsídios técnicos para aplicação em estruturas reais. Estudos sistemáticos sobre cura e germinação bacteriana ainda são escassos, sendo necessários para definir protocolos robustos.
2. **Avaliação integrada de desempenho** — ao combinar ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos e análise microestrutural, o trabalho proporciona uma visão multidimensional dos efeitos da adição bacteriana sobre resistência, módulo dinâmico e permeabilidade, permitindo avaliar *trade-offs* (por exemplo, redução de resistência por ar incorporado relacionada ao ganho em capacidade de cicatrização).
3. **Aplicabilidade prática** — resultados que identifiquem combinações de linhagem, regime de cura e aditivos compatíveis com manutenção de propriedades mecânicas e com alta eficiência de cicatrização pode ser traduzidos em protocolos de produção industrial (exemplo: encapsulamento em agregados porosos, ajustes de dosagem) e recomendações de obra.
4. **Sustentabilidade e redução de custos de longo prazo** — promover autocicatrização efetiva reduz substituições e reparos futuros, impactando positivamente no custo total de propriedade de infraestrutura civil e na geração de resíduos de demolição e reparo.
5. **Contribuição ao conhecimento local** — a utilização de uma linhagem isolada localmente (BCAP/B2 1-18) e a comparação com uma linhagem de fonte

agroindustrial (AP91 — casca de arroz) podem revelar potenciais cepas adaptadas ao clima e insumos regionais, com implicações para transferência de tecnologia a nível local (exemplo: parcerias com instituições como UNILA e EMBRAPA).

Por fim, este projeto atende às demandas contemporâneas por materiais mais resilientes e tecnologias construtivas de baixo impacto ambiental, além de preencher lacunas metodológicas relevantes para a engenharia de materiais cimentícios. A combinação de experimentação controlada e avaliação técnica detalhada fornecerá subsídios para a adoção responsável e cientificamente fundamentada da autocatrização biológica no setor da construção.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de diferentes linhagens bacterianas, métodos de cura, adição de aditivo incorporador de ar e suplementação nutricional na eficiência do processo de autocicatrização biológica de materiais cimentícios.

3.2 Objetivos específicos

a) Analisar dois diferentes tipos de bactérias (AP91 e BCAP/B2) quanto a capacidade de reparação de fissuras em materiais cimentícios devido à biodeposição de carbonato de cálcio (CaCO_3).

b) Comparar os efeitos dos tipos de cura (cura submersa e cura utilizando a manta geotêxtil).

c) Analisar o desempenho de linhagens bacterianas selecionadas, incluindo uma cepa isolada de uma edificação e posteriormente depositada na coleção de microrganismos da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), quanto à sua eficácia na promoção da autocicatrização biológica em materiais cimentícios e a outra fornecida pela EMBRAPA.

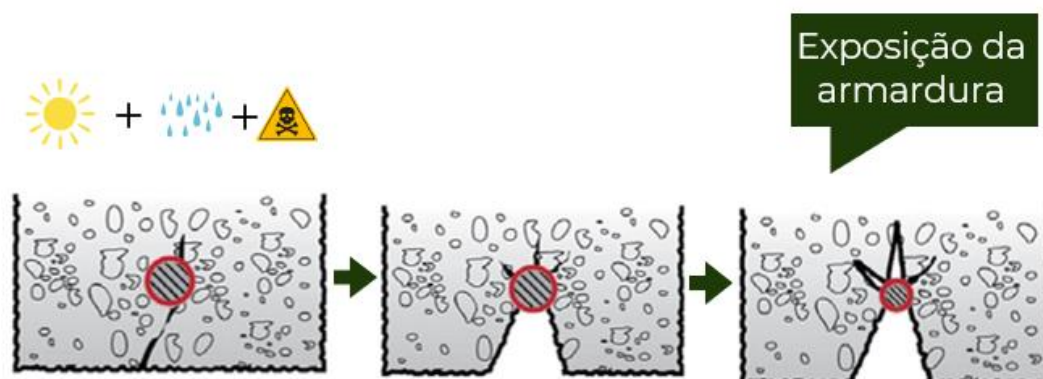
4 REVISÃO DE LITERATURA

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados devido à sua capacidade única de atender simultaneamente a requisitos de resistência, durabilidade e moldabilidade. Segundo Olsson *et al.* (2023), “não há alternativa que atenda à mesma capacidade funcional do concreto” para sistemas de construção e engenharia civil, especialmente em contextos de rápido crescimento populacional e expansão urbana.

Outrora, projeções indicam que, até 2030, a população urbana mundial crescerá em cerca de 22%, o que se traduzirá num aumento proporcional na demanda por concreto para habitação, transporte, saneamento e obras de arte (OLSSON *et al.*, 2023). Além disso, o mercado global de aditivos para concreto está estimado em US\$ 18 bilhões em 2025, impulsionado por projetos de cidades inteligentes e pela necessidade de soluções mais sustentáveis na construção civil (FMI, 2025).

Entretanto, o desempenho dos sistemas de concreto pode ser comprometido por diversas patologias, manifestadas sobretudo sob a forma de fissuras, trincas e rachaduras. Essas discontinuidades são sintomas de processos físico-mecânicos iniciais e atuam como portas de entrada para agentes agressivos, facilitando o desencadeamento de reações químicas deletérias. A Figura 1 apresenta um esquema de como ocorre a corrosão da armadura em decorrência da abertura da fissura: a ação de agentes externos como variações térmicas, umidade e substâncias agressivas penetra pelo concreto, ampliando fissuras até atingir a armadura. Com isso, o aço perde sua proteção, inicia o processo de corrosão e fica exposto, comprometendo a durabilidade e a segurança da estrutura.

Figura 1 - Processo de corrosão da armadura



Fonte: Adaptado de HELENE, 2016.

Revisões recentes apontam a importância de entender os mecanismos que levam ao surgimento e à evolução dessas falhas, a fim de planejar estratégias de monitoramento e manutenção eficazes (ZHANG *et al.*, 2024)

As fissuras de origem física ou mecânica decorrem de diferentes fatores. Já esforços excessivos, vibrações e tráfego intenso são responsáveis pela degradação mecânica direta da matriz cimentícia, originando fissuras que, se não tratadas, podem crescer e comprometer a estabilidade estrutural (CONCRETE DEGRADATION, 2025).

Uma vez abertas, essas fissuras permitem a penetração de água, íons cloreto e dióxido de carbono, propiciando reações químicas como a reação álcali-sílica (RAS) e o ataque por sulfatos. Na RAS, álcalis do cimento reagem com sílica amorfa dos agregados, formando um gel expansivo que induz tensões internas e fendas adicionais (ICHIKAWA; MIURA, 2007).

O ataque por sulfatos pode ocorrer devido a fatores internos (formação retardada de etringita) ou fontes externas de sulfatos, resultando na precipitação de produtos expansivos como etringita e gesso que preenchem poros e geram pressão de cristalização, provocando fraturas e perda de massa (DAWSON; TIAN, 2000).

Além disso, a penetração de cloretos favorece a corrosão dos vergalhões, provocando empenamentos e destacamentos do cobrimento de concreto (CONCRETE DEGRADATION, 2025), e conseqüentemente perda da capacidade portante dos elementos estruturais.

As principais causas de fissuras podem assim ser agrupadas em:

1. **Retração plástica e por secagem:** decorrente da perda de água antes e após a pega do concreto;
2. **Retração autógena:** típica de concretos de baixo traço água/cimento;
3. **Variações térmicas:** expansão e contração por mudanças de temperatura;
4. **Sobrecarga e vibração:** esforços estáticos e dinâmicos além do projeto;
5. **Ciclos gelo–degelo:** expansão volumétrica da água congelada;
6. **Ataques químicos:** como ASR, sulfatos e cloretos.

Assim, temos que fissuras ativas apresentam abertura variável ao longo do tempo, frequentemente associada a movimentações estruturais ou variações higrotérmicas, enquanto fissuras passivas mantêm-se estáveis, normalmente relacionadas a processo de retração (ZHANG *et al.*, 2024).

O tratamento das fissuras varia conforme sua natureza. Para fissuras passivas, aplicam-se selantes rígidos ou flexíveis, selantes epóxi ou poliuretano, visando restabelecer a impermeabilidade e prevenir a infiltração (ZHANG *et al.*, 2024).

Em fissuras ativas, recorre-se a juntas de dilatação, selantes elásticos e sistemas de reforço que acomodem deslocamentos (MDPI, 2025). Métodos estruturais, como injeção de resinas acrílicas ou epóxi e reparos com argamassa de cimento modificado, são empregados conforme a extensão e criticidade do dano (ZHANG *et al.*, 2024).

Tendo em vistas estas patologias, recentemente, avanços tecnológicos têm possibilitado concretos autocicatrizantes que incorporam microcápsulas de nutrientes e esporos de bactérias formadoras de calcita (genus *Bacillus*). Estas germinam ao contato com a água, precipitam carbonato de cálcio nas fissuras e selam as discontinuidades de forma autônoma, aumentando a vida útil das estruturas e reduzindo custos de manutenção (DE MUYNCK *et al.*, 2010; OLSSON *et al.*, 2024). Tais inovações evidenciam o potencial de materiais bioinspirados para a construção de infraestruturas urbanas mais resilientes e sustentáveis, sendo estes processos apresentados nos tópicos a seguir.

4.1 Conceito de autocura em concretos

A definição de *self-healing* refere-se à autocura do concreto como um processo no qual o material é capaz de se regenerar, reparando suas próprias fissuras com o objetivo de recuperar propriedades físicas e mecânicas, prolongando, assim, sua vida útil. Este conceito vem ganhando destaque na construção civil devido à necessidade de reduzir custos com manutenção e aumentar a durabilidade das estruturas.

Existem dois tipos principais de autocura do concreto:

A autocura do concreto pode ser classificada em dois tipos principais: autocura autógena e autocura autônoma. A autocura autógena ocorre naturalmente por processos como a hidratação contínua do cimento e a carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), o que contribui para o fechamento de fissuras e aumento da durabilidade do concreto (CAVALLI, 2019).

Por outro lado, a autocura autônoma envolve a introdução de agentes externos, como cápsulas ou redes vasculares contendo substâncias que promovem a precipitação de carbonatos, diretamente na matriz do concreto. Esses agentes são ativados pela presença de água ou pela abertura de fissuras, proporcionando uma cicatrização adicional e controlada das trincas (CAVALLI, 2019).

Entre os principais métodos estão:

1. **Polímeros superabsorventes (SAPs):** materiais que, ao entrarem em contato com a umidade, incham e formam um gel que preenche as fissuras. Esse gel encolhe quando seca e volta a expandir com nova exposição à umidade.
2. **Agentes químicos inorgânicos:** como aditivos cristalinos, óxido de magnésio e compostos à base de sílica. Em geral, precisam ser encapsulados para só reagirem no momento adequado.
3. **Adesivos reativos:** aplicados em cápsulas para união das superfícies fissuradas. Podem ser monocomponentes (ativados por radiação, umidade ou calor) ou multicomponentes (necessitam de dois elementos encapsulados, como adesivo + acelerador).
4. **Bactérias:** atuam como catalisadores biológicos, promovendo a precipitação de carbonato de cálcio.

Podem ser aplicadas por:

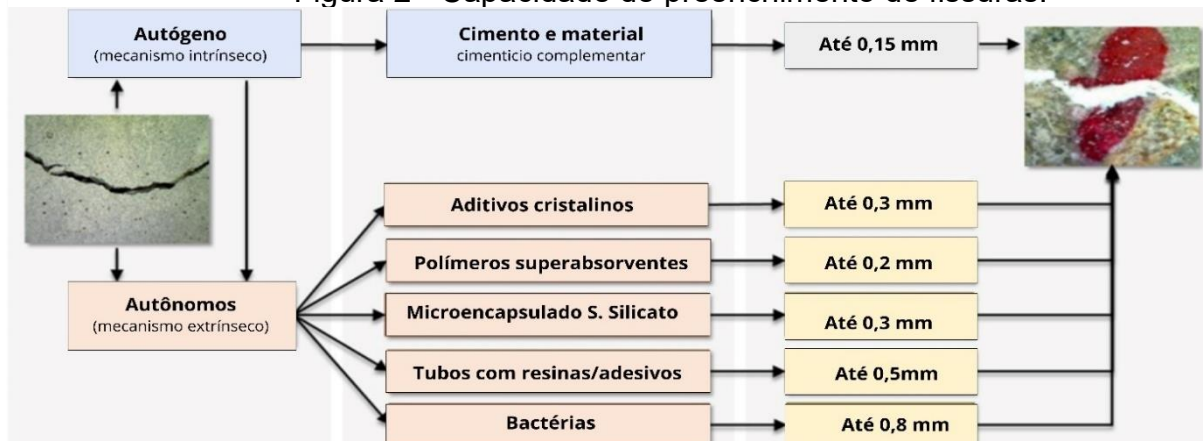
- Dispersão direta dos esporos na matriz;
- Imobilização em partículas porosas (esporulação);
- Encapsulamento.

Há dois tipos de encapsulamento:

1. **Cápsulas dispersas:** para fissuras imprevisíveis;
2. **Cápsulas localizadas:** estrategicamente distribuídas em zonas de fissuração previsível.

Ambas exigem paredes resistentes que suportem as tensões do concreto durante o processo de cura e uso. A Figura 2 apresenta uma comparação entre os métodos de autocura, evidenciando a eficiência de preenchimento das fissuras em função do tipo de agente utilizado.

Figura 2 - Capacidade de preenchimento de fissuras.

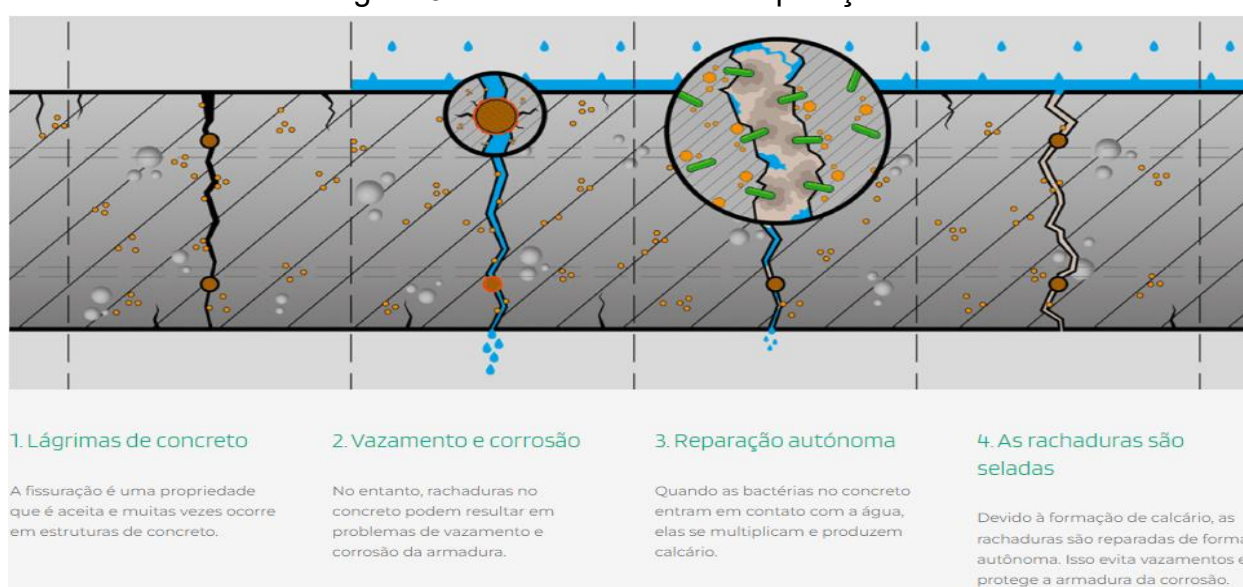


Fonte: Adaptado de ROIG-FLORES, FORMAGINI, SERNA; 2020.

Considerando que o concreto apresenta elevada resistência à compressão, porém baixa resistência à tração, a formação de fissuras ao longo do tempo é inevitável. Com o intuito de mitigar esse problema, uma solução inovadora consiste na incorporação de bactérias e fontes de cálcio diretamente na mistura do concreto.

Quando ocorre a formação de fissuras, a entrada de umidade e oxigênio ativa os esporos bacterianos presentes na matriz. Em contato com os nutrientes disponíveis, essas bactérias iniciam um processo de biomineralização, resultando na precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), que atua como agente selante das trincas, conforme apresentado na Figura 3 a seguir:

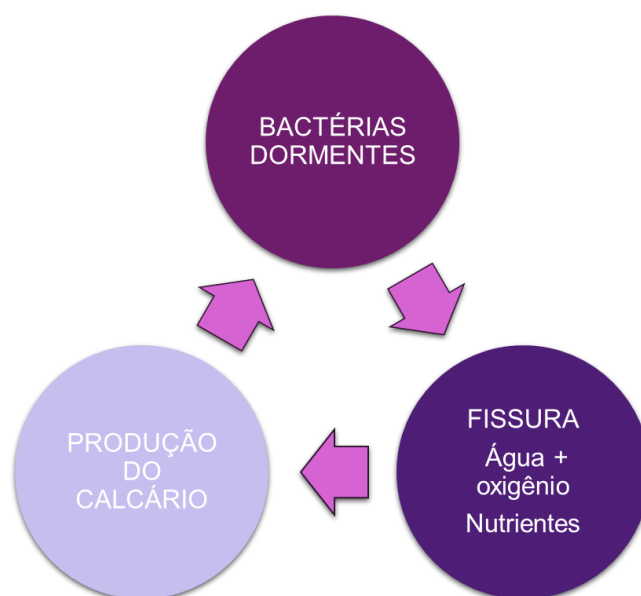
Figura 3 - Processo de biorrecuperação.



Fonte: SANTOS, 2018.

Esse mecanismo de autocicatrização não apenas recupera a integridade estrutural do material, mas também contribui para o aumento de sua durabilidade. Estudos demonstram que o concreto com adição bacteriana tende a apresentar resistência superior à do concreto convencional, especialmente ao longo do tempo, à medida que o processo de cicatrização atua de forma contínua e autônoma. A Figura 4 ilustra o ciclo de autocura promovido pelas bactérias, desde a formação da fissura até sua completa selagem.

Figura 4 - Ciclo de autocicatrização com bactérias.



Fonte: AUTORA, 2025.

Desta forma, durante o processo de autocura, as atividades metabólicas das bactérias promovem a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) diretamente nas fissuras do concreto, atuando como um agente selante natural (ELGENDY, 2025). À medida que as trincas vão sendo preenchidas por esse material, ocorre a restauração da integridade estrutural da matriz cimentícia (LEE, Y. S., PARK, W., 2018).

Uma vez concluída a cicatrização e cessado o acesso à umidade e nutrientes, as bactérias entram novamente em estado de dormência, permanecendo inativas até que novas fissuras se formem. Caso isso ocorra, o contato com a umidade reativa os esporos bacterianos, reiniciando o ciclo de autocura de forma autônoma e eficiente (ROIG-FLORES, M., FORMAGINI, S., SERNA, P., 2021).

4.2 Bactérias utilizadas e suas condições nutricionais

As bactérias do gênero *Bacillus*, notadamente o *Bacillus subtilis*, vêm sendo amplamente investigadas devido à sua capacidade de formar esporos e de sobreviver em ambientes com elevada alcalinidade, como aqueles presentes em matrizes cimentícias. Essa capacidade de esporulação confere a essas bactérias uma resistência singular às condições extremas durante a produção e cura de concretos e argamassas, sendo um fator-chave para sua aplicação em tecnologias de concreto auto curável. Os esporos bacterianos permanecem em estado dormente dentro da matriz do concreto e, quando em contato com água proveniente de fissuras ou microtrincas, podem germinar, ativando o metabolismo bacteriano que induz a precipitação de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3), promovendo a autocicatrização das fissuras (GHELLERE, 2021).

Para assegurar a viabilidade e eficiência do processo de esporulação, é necessário utilizar meios de cultura adequados, que forneçam os nutrientes essenciais ao metabolismo bacteriano. O meio líquido Mueller Hinton (MH) é amplamente empregado nesse contexto, por ser rico em fontes de nitrogênio e carbono, compostas por peptona de caseína, peptona de carne e amido. A correta formulação e proporção desses componentes influencia diretamente na capacidade metabólica das bactérias e na produção de esporos viáveis e estáveis (GHELLERE, 2021). Essa etapa é crítica, pois determina a resistência das bactérias às condições físico-químicas agressivas do concreto, como o pH elevado e o ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio.

Após a produção dos esporos, o processo de ativação bacteriana ocorre em laboratório, geralmente por meio do descongelamento das cepas estocadas e do subsequente cultivo em meio nutriente sólido, como o ágar nutriente (NA). Essa etapa tem como objetivo estimular a germinação e a multiplicação bacteriana em ambiente controlado, favorecendo o crescimento de colônias puras. A confirmação da pureza e da morfologia das bactérias é realizada por meio de técnicas microbiológicas clássicas, como a coloração de Gram, que permite diferenciar bactérias Gram-positivas, como o *Bacillus subtilis*, pela coloração violeta característica, e a coloração com verde malaquita, específica para a visualização de esporos, que aparecem como estruturas ovais e refringentes no interior das células vegetativas (TRABULSI; ALTERTHUM, 2015).

Esse rigor no preparo microbiológico é essencial para garantir a eficácia do concreto autocicatrizante, uma vez que apenas culturas puras, bem esporuladas e metabolicamente ativas são capazes de promover a precipitação de carbonato de cálcio em quantidade suficiente para preencher microfissuras, restabelecendo parcialmente a integridade mecânica e a estanqueidade da estrutura. Além disso, a integração de *Bacillus subtilis* em compósitos cimentícios representa um avanço tecnológico promissor no campo da biotecnologia aplicada à engenharia civil, permitindo o desenvolvimento de materiais mais duráveis, sustentáveis e com menor necessidade de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

4.3 Quantificação de esporos

A esporulação é um processo biológico altamente especializado por meio do qual bactérias do gênero *Bacillus*, como o *Bacillus subtilis*, estas formam estruturas resistentes denominadas esporos endógenos. Esses esporos permitem que as bactérias sobrevivam em condições ambientais adversas, como falta de nutrientes, variações extremas de temperatura, radiação UV, desidratação e, especialmente, altos níveis de alcalinidade, como os encontrados no interior do concreto (TRABULSI; ALTERTHUM, 2015).

Esse processo de esporulação é induzido quando a bactéria detecta a escassez de nutrientes essenciais no meio. Em resposta, ela entra em um ciclo de desenvolvimento celular diferenciado, no qual o DNA é replicado, e uma nova parede celular começa a se formar em torno de uma das cópias do genoma bacteriano. Esse envoltório é composto por várias camadas de proteínas e peptidoglicanos altamente resistentes, tornando o esporo inativo extremamente durável e capaz de permanecer viável por anos ou até décadas (STEPHENS, 1998).

A esporulação é particularmente importante na biotecnologia aplicada ao concreto autocicatrizante, pois permite que as bactérias sejam incorporadas ao concreto durante a mistura, sem perder a viabilidade. Ou seja, no interior da matriz cimentícia, os esporos permanecem dormentes até que uma fissura ocorra e a água penetre no material, ativando-os. Uma vez ativados, os esporos germinam, a célula vegetativa emerge e inicia o metabolismo, incluindo a produção de carbonato de cálcio (CaCO_3) a partir de reações bioquímicas, selando assim as fissuras.

Segundo Ghellere (2021), o sucesso deste concreto depende diretamente da viabilidade e integridade dos esporos após o processo de mistura e cura. Por isso, os procedimentos laboratoriais devem garantir uma esporulação eficaz e a manutenção das condições ideais para sua preservação, como o cultivo em meios específicos (como Mueller Hinton) e posterior liofilização ou encapsulamento.

4.4 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais é uma etapa fundamental no desenvolvimento de procedimentos experimentais na área da engenharia civil, especialmente quando se trata de concretos com funcionalidades avançadas, como os autocicatrizantes. Essa etapa permite compreender as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos componentes envolvidos, como cimento, agregados, aditivos e agentes biológicos, garantindo a confiabilidade, a reprodutibilidade e a validade dos resultados obtidos (LIMA, 2025).

A caracterização adequada assegura a escolha correta dos materiais e permite controlar variáveis que podem interferir significativamente no desempenho do compósito. Parâmetros como granulometria, absorção, resistência mecânica dos agregados, pH do meio, porosidade do compósito e capacidade de incorporação bacteriana são essenciais para projetar uma matriz cimentícia eficiente e compatível com os objetivos do experimento. Além disso, quando micro-organismos como as bactérias são introduzidos, é indispensável conhecer a interação entre o material cimentício e o agente biológico, o que só é possível com uma caracterização prévia detalhada.

Segundo Schwantes-Cezario *et al.* (2021), a caracterização dos materiais cimentícios e biológicos foi decisiva para a imobilização eficiente das bactérias e para a obtenção de resultados consistentes quanto à precipitação de carbonato de cálcio. Do mesmo modo, Lima *et al.* (2020) destacam que o comportamento do concreto autocicatrizante depende da compatibilidade entre os materiais utilizados, sendo a caracterização uma etapa crucial para garantir o sucesso da aplicação.

4.5 Aditivos incorporadores de ar

A utilização de aditivos incorporadores de ar tem como objetivo modificar a microestrutura da argamassa, criando espaços que possibilitem o crescimento e a proteção das bactérias. De acordo com os estudos conduzidos por Nicole Schwantes-Cezario, a utilização de aditivos incorporadores de ar em concretos autocicatrizantes beneficia significativamente a sobrevivência e a atividade das bactérias do gênero *Bacillus*, especialmente o *Bacillus subtilis*, no interior da matriz cimentícia.

Esses aditivos introduzem microbolhas de ar uniformemente distribuídas no concreto, criando microambientes que oferecem as seguintes vantagens para as bactérias, sendo estas:

1. **Proteção contra condições adversas:** As microbolhas atuam como zonas de amortecimento, protegendo os esporos bacterianos das altas pressões e do pH elevado durante a hidratação do cimento.
2. **Espaço para colonização e atividade metabólica:** As cavidades de ar fornecem espaços onde as bactérias podem se alojar e, ao serem ativadas pela presença de água, realizar a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), promovendo a autocicatrização de fissuras.
3. **Melhoria na durabilidade do concreto:** A presença de microbolhas contribui para a redução da permeabilidade do concreto, dificultando a entrada de agentes agressivos e, conseqüentemente, prolongando a vida útil da estrutura.

Assim, a incorporação de aditivos incorporadores de ar não apenas melhora as propriedades físicas do concreto, mas também cria condições favoráveis para a eficácia das bactérias autocuráveis, resultando em estruturas mais duráveis e sustentáveis.

4.6 Estudos anteriores

Nos últimos anos, diversas pesquisas realizadas na Universidade da Integração Latino Americana – UNILA, têm se dedicado ao desenvolvimento de materiais cimentícios com capacidade de autocicatrização, sendo o uso de bactérias precipitando carbonato de cálcio (CaCO_3) uma das abordagens mais promissoras.

Nesse contexto, o estudo de Ghellere (2021) se destaca por realizar a seleção e avaliação de bactérias produtoras de CaCO_3 visando a recuperação de fissuras em

materiais à base de cimento. A autora realizou o isolamento de microrganismos de ambientes naturais, focando naqueles que apresentavam maior capacidade de precipitação biogênica de carbonato de cálcio. No qual, as cepas selecionadas foram posteriormente incorporadas em matrizes cimentícias e demonstraram potencial significativo na biocicatrização, promovendo a obstrução de fissuras e contribuindo para o aumento da durabilidade dos materiais.

Complementando essa abordagem, Lenz (2022) investigou a influência de diferentes linhagens bacterianas, bem como a presença ou ausência de ar incorporado e nutrientes, na eficiência do processo de autocicatrização. Foram utilizadas linhagens como *Bacillus subtilis* AP91, *Bacillus cf. subtilis* e *Bacillus cf. pumilus*, combinadas com distintos nutrientes, com o objetivo de compreender como esses fatores afetam a produção de CaCO_3 e o fechamento das fissuras. Nesta estudos, os resultados revelaram que a presença de ar incorporado pode facilitar a sobrevivência bacteriana e aumentar a eficiência da autocicatrização, enquanto a linhagem bacteriana e o tipo de nutriente influenciam diretamente o desempenho do sistema.

Zottis (2021), por sua vez, conduziu um estudo centrado na biorecuperação de microfissuras em concreto por meio da biodeposição. A pesquisa avaliou a incorporação de cepas bacterianas em amostras de concreto e analisou sua capacidade de induzir a precipitação de carbonato de cálcio no interior das fissuras. A autora observou que a presença das bactérias favoreceu o preenchimento das microfissuras e melhorou a integridade estrutural do compósito, evidenciando a viabilidade do uso de agentes biológicos como alternativa sustentável e eficiente para o reparo de estruturas de concreto.

Esses três estudos convergem ao demonstrar que a biotecnologia aplicada à engenharia civil oferece soluções inovadoras para a autossustentabilidade e durabilidade de estruturas. A utilização de bactérias capazes de promover a autocicatrização representa uma ruptura com os métodos convencionais de manutenção e reparo, promovendo ganhos técnicos, econômicos e ambientais.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto experimental foi estruturado com o objetivo de avaliar a influência de diferentes linhagens bacterianas, métodos de cura e aditivos na eficiência da autocicatrização biológica de argamassas. As etapas metodológicas foram definidas para permitir a reprodução do estudo e garantir a coerência entre os procedimentos realizados e os resultados obtidos, que foi conduzida conforme as seguintes fases:

- **Caracterização dos materiais:** identificação e descrição dos componentes empregados na produção das argamassas autocicatrizantes.
- **Preparação das argamassas:** dosagem e mistura dos materiais, incluindo variáveis experimentais como adição de bactérias, nutrientes e aditivo incorporador de ar.
- **Cura das amostras:** aplicação de dois tipos de cura (submersa e com manta geotêxtil) para avaliar a influência da umidade na atividade bacteriana.
- **Indução das fissuras:** geração controlada de fissuras em amostras endurecidas para posterior observação do processo de cicatrização.
- **Ensaio em estado endurecido:** execução de testes destrutivos e não destrutivos para análise mecânica e microestrutural das amostras.

5.1 Materiais

Os materiais utilizados foram selecionados conforme normas técnicas da ABNT e estudos anteriores relacionados à autocicatrização bacteriana em matrizes cimentícias.

- **Cimento:** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), conforme NBR 5733 (ABNT, 1991), devido à rápida hidratação e elevada resistência mecânica inicial, características que favorecem a estabilidade das argamassas e a avaliação dos efeitos bacterianos.
- **Areia:** Areia natural de origem quartzosa proveniente do Rio Paraná.
- **Bactérias:** Duas linhagens de *Bacillus subtilis* (Tabela 1) foram utilizadas:
 - **AP91**, isolada da casca de arroz e fornecida pela EMBRAPA;

- **BCAP/B2 1-18**, isolada de uma edificação e pertencente à coleção de microrganismos da UNILA.

As bactérias foram utilizadas já preparadas e em condições adequadas de aplicação, sem necessidade de cultivo laboratorial no escopo deste estudo.

- **Aditivo incorporador de ar:** utilizado para introduzir microbolhas que formam espaços internos capazes de abrigar colônias bacterianas e reduzir a permeabilidade da matriz.
- **Nutrientes:** adicionados em determinadas composições para favorecer a germinação dos esporos e o metabolismo bacteriano, potencializando a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Tabela 1 – Bactérias utilizadas no presente trabalho.

Nomenclatura	Descrição
AP91	Bactéria <i>Bacillus subtilis oriunda da casca de arroz</i>
BCAP/B2 (1-18)	Bactéria <i>Bacillus subtilis</i> isoladas da parede interna de uma edificação

Fonte: AUTORA, 2025.

5.2 Preparação das argamassas

As argamassas foram moldadas a partir de traços experimentais (Tabela 2) baseados em Ghellere (2021), ajustados para este estudo. A relação água/cimento em massa adotada foi de 0,48, buscando equilíbrio entre trabalhabilidade, resistência e porosidade controlada. A mistura foi realizada em misturador mecânico, assegurando homogeneidade e dispersão adequada das bactérias e aditivos.

Tabela 2 - Traço para 1 amostra.

Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Bac	Molde (cm)
150	450	72	BCAP(B2)/AP91	4x4x16
Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Bac	Molde (cm)
117	350	56	BCAP(B2)/AP91	5x10

Fonte: GHELLERE, 2021

Os corpos de prova (Tabela 3) foram moldados em dois formatos:

- **Cilíndricos (5 × 10 cm):** destinados aos ensaios de resistência à compressão e ultrassom;
- **Prismáticos (4 × 4 × 16 cm):** destinados à indução de fissuras e monitoramento visual da cicatrização.

Tabela 3 – Quantidade de amostras.

Molde – 5x10 cm				Molde – 4x4x16 cm		
	Sem BAC	BAC AP91	BCAP/B2	Sem BAC	BAC AP91	BCAP/B2
Ref.	8	8	8	3	3	3
Manta geotêxtil	8	8	8	3	3	3
Nutrientes	8	8	8	3	3	3
Incorporador de ar	8	8	8	3	3	3
Total	96			36		

Fonte: AUTORA, 2025.

As amostras foram produzidas em grupos experimentais, variando conforme o tipo de bactéria, presença de nutrientes e aditivo incorporador de ar, e tipo de cura. Amostras sem adição bacteriana serviram como referência (SBAC), as Tabela 4 e 5 apresentam os respectivos traços e amostras:

Tabela 4 – Traço amostras 5x10 cm em kg/m³.

TRAÇO 5X10					TRAÇO 5X10			
Com manta geotextil (8 amostras)					Com manta geotextil (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)		BAC (m³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	
0,936	2,8	0,448		0,00000625	0,936	2,8	0,448	
Com nutrientes (8 amostras)					Com nutrientes (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Nutrientes (kg)	BAC (m³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Nutrientes (kg)
0,936	2,8	0,448	0,00468	0,00000625	0,936	2,8	0,448	0,00468
Com incorporador de ar (8 amostras)					Com incorporador de ar (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	BAC (m³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
0,936	2,8	0,448	0,00468	0,00000625	0,936	2,8	0,448	0,00468
Referência (8 amostras)					Referência (3 amostras)			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	BAC (m³)		Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	
0,936	2,8	0,448	0,00000625		0,936	2,8	0,448	

Fonte: AUTORA, 2025.

Tabela 5 – Traço amostras 4x4x16 cm em kg/m³.

TRAÇO 5X10					TRAÇO 5X10			
Com manta geotextil (8 amostras)					Com manta geotextil (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)		BAC (m ³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	
0,936	2,8	0,448		0,00000625	0,936	2,8	0,448	
Com nutrientes (8 amostras)					Com nutrientes (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Nutrientes (kg)	BAC (m ³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Nutrientes (kg)
0,936	2,8	0,448	0,00468	0,00000625	0,936	2,8	0,448	0,00468
Com incorporador de ar (8 amostras)					Com incorporador de ar (3 amostras) - Referência			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	BAC (m ³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
0,936	2,8	0,448	0,00468	0,00000625	0,936	2,8	0,448	0,00468
Referência (8 amostras)					Referência (3 amostras)			
Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)		BAC (m ³)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	
0,936	2,8	0,448		0,00000625	0,936	2,8	0,448	

Fonte: AUTORA, 2025.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 24 horas e, em seguida, transferidos para o regime de cura correspondente:

- **Cura submersa:** amostras totalmente imersas em água, com trocas periódicas para garantir oxigenação e simular o ambiente de renovação hídrica contínua.
- **Cura com manta geotêxtil:** amostras envolvidas em manta úmida, representando ambientes de umidade restrita, mais próximos de condições reais de serviço em estruturas internas.

A Figura 5 apresenta as amostras durante o processo de cura e a tabela 4 apresenta o tipo de cura de cada amostra.

Figura 5 - Preparação das amostras.



Fonte: AUTORA, 2025.

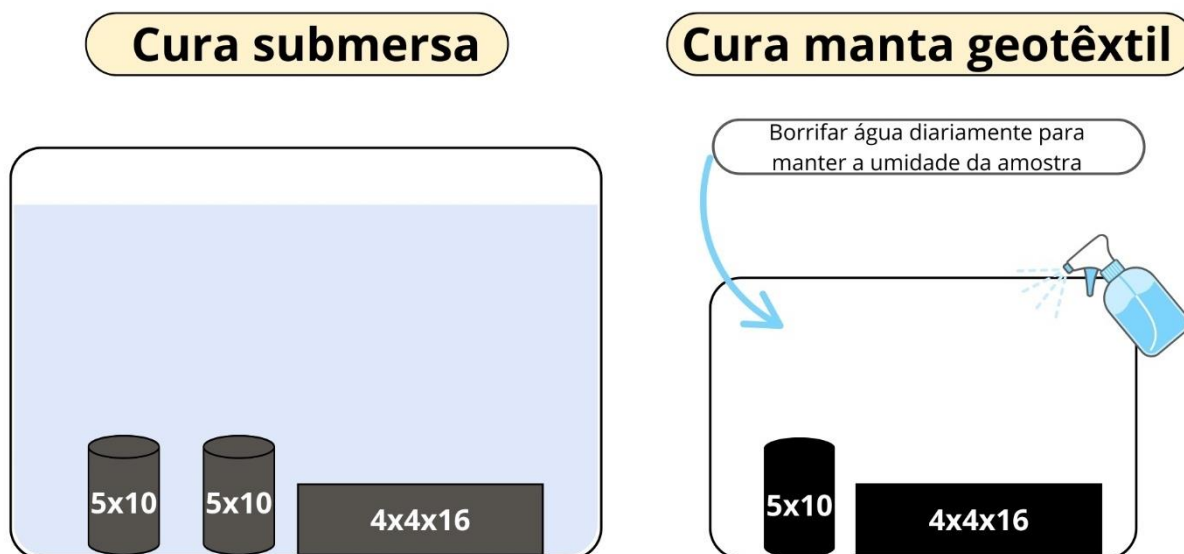
Tabela 6 - Determinação do tipo de cura.

Amostra	Tipo de cura
Referência	Manta geotêxtil
AP91	Manta geotêxtil
BAC UNILA (BCAP/B2)	Manta geotêxtil
Referência Geral	Cura submersa
Referência AP91	Cura submersa
Referência BAC UNILA (BCAP/B2)	Cura submersa

Fonte: AUTORA, 2025.

Ou seja, as amostras foram removidas da cura nas datas estipuladas para inspeção visual e outros ensaios, e quando retornadas ao recipiente, a água foi trocada, de modo a simular as condições de renovação natural de água, que ocorrem em situações reais, a Figura 6 a seguir apresenta o esquema de como foi realizado este processo de cura das amostras:

Figura 6 - Amostras na cura.



Fonte: AUTORA, 2025.

5.3 Indução de fissuras

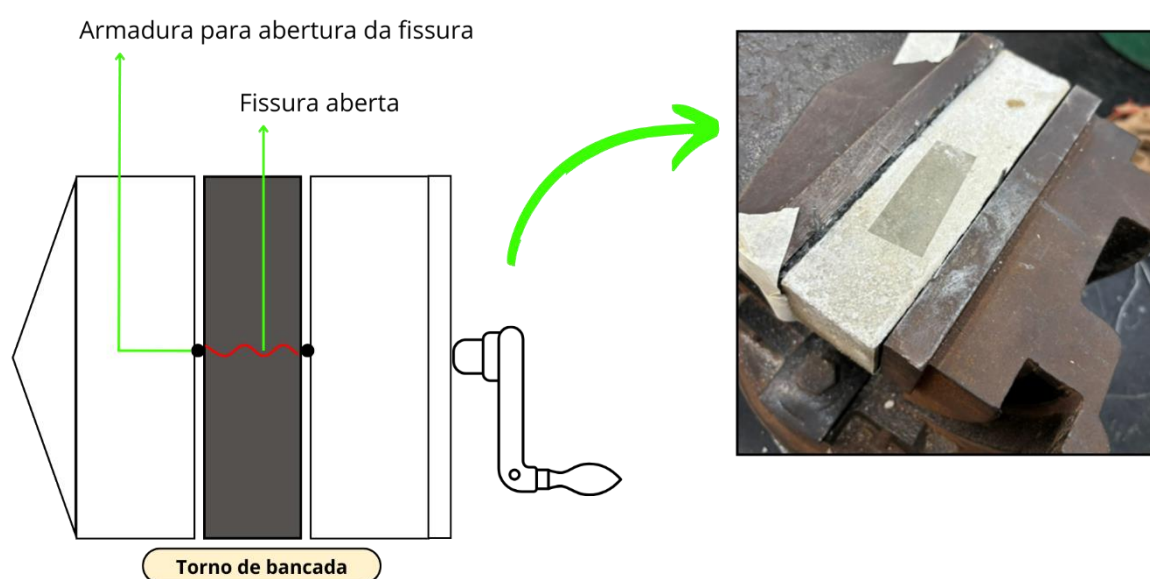
A geração das fissuras foi realizada após o período inicial de cura, utilizando uma morsa de bancada e uma haste metálica para aplicação controlada de carga (Figura 7). O método foi escolhido por permitir fissuras finas e localizadas, sem promover ruptura total da amostra.

Para evitar danos superficiais e perda de material, utilizou-se manta geotêxtil como proteção entre a haste e a amostra.

As fissuras formadas apresentaram aberturas variando entre 0,05 mm e 0,8 mm, sendo posteriormente medidas por meio de microscópio óptico portátil. Amostras com fissuras fora do intervalo desejado ou com ruptura total foram descartadas.

Após a fissuração, as amostras retornaram ao respectivo regime de cura para início do processo de autocicatrização.

Figura 7 – Abertura de fissuras.



Fonte: AUTORA, 2025.

5.4 Ensaios em estado endurecido

Os ensaios foram realizados para avaliar o desempenho mecânico e a eficiência do processo de cicatrização biológica das argamassas. Foram considerados tanto ensaios destrutivos quanto não destrutivos, complementados por análises visuais e micrográficas.

5.4.1 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de compressão axial foi conduzido em prensa hidráulica de 2000 kN, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). As leituras foram realizadas aos 28 e 63 dias

de idade, permitindo observar a evolução das propriedades mecânicas com o tempo e o efeito das variáveis experimentais (tipo de bactéria, aditivos e cura).

Os resultados obtidos foram comparados entre as diferentes composições, destacando a influência da incorporação bacteriana sobre a resistência da matriz.

5.4.2 Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A velocidade de propagação de onda ultrassônica foi medida utilizando equipamento *Proceq Pundit Lab*, com transdutores posicionados em faces opostas das amostras cilíndricas.

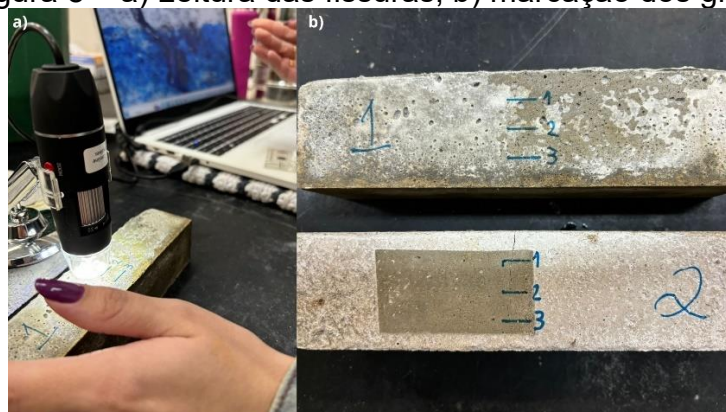
O ensaio seguiu as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019), avaliando a homogeneidade e integridade interna da matriz cimentícia. O aumento da velocidade de propagação foi interpretado como indicativo de maior densificação e fechamento de descontinuidades internas, associadas à precipitação de carbonato de cálcio nas fissuras.

5.4.3 Análise visual e registro do fechamento das fissuras

O fechamento das fissuras foi acompanhado visualmente aos 7, 14, 28 e 63 dias após a fissuração.

As observações foram realizadas com o auxílio de estereomicroscópio óptico (aumento de 10x a 40x) e registradas por meio de fotografias digitais. Foram definidos três pontos de observação por amostra (grids 1, 2 e 3 (Figura 8)), sempre na região central da fissura.

Figura 8 – a) Leitura das fissuras; b) marcação dos grids.



Fonte: AUTORA, 2025.

As imagens foram comparadas temporalmente, permitindo quantificar a redução da abertura e identificar o avanço do processo de cicatrização biológica. Os registros foram tratados com software de análise de imagem para estimativa percentual do fechamento das fissuras.

5.4.4 Análise micrográfica e identificação de precipitados

Para confirmação do processo biogênico, fragmentos das regiões fissuradas foram analisados em estereomicroscópio sob diferentes ampliações. As micrografias permitiram identificar a formação de precipitados de carbonato de cálcio (CaCO_3), observados como cristais brancos aderidos às paredes internas das fissuras.

Esses precipitados foram correlacionados aos resultados mecânicos e de ultrassom, reforçando a eficiência da autocicatrização em função das variáveis estudadas.

5.5 Organização experimental

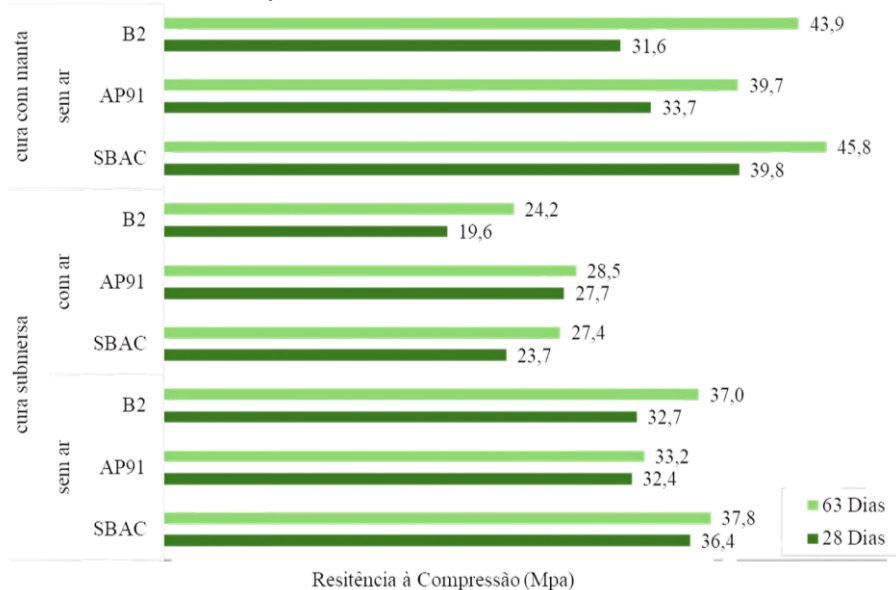
As combinações entre as variáveis independentes, como: tipo de bactéria (AP91 e BCAP/B2 1-18), regime de cura (submersa e manta geotêxtil) e adição de nutrientes e aditivo incorporador de ar, resultaram em diferentes grupos experimentais, incluindo amostras de referência sem bactéria.

Essa organização permitiu avaliar, de forma comparativa, a influência de cada variável no desempenho das argamassas quanto à resistência, homogeneidade e capacidade de autocicatrização.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

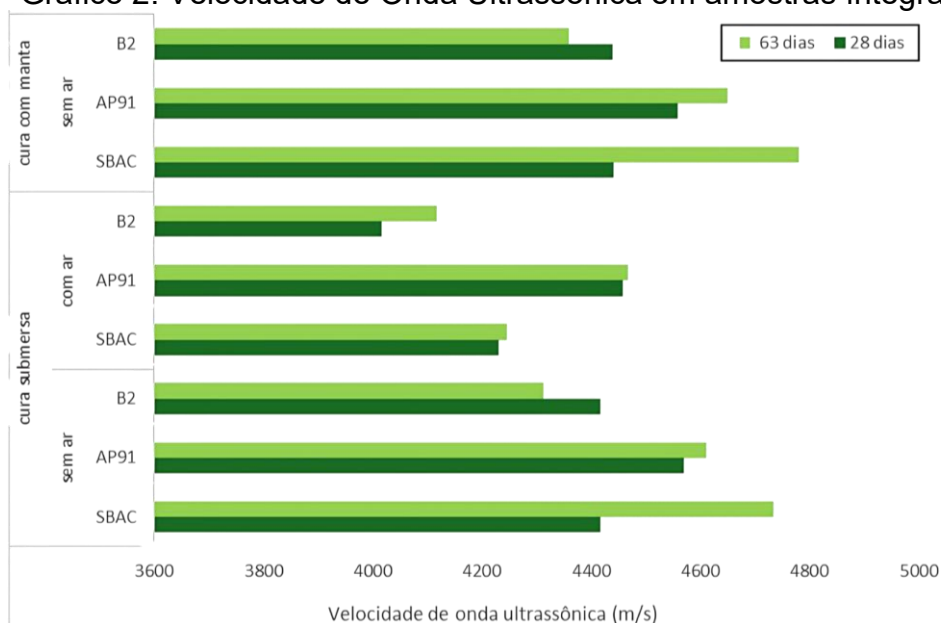
Os resultados para as amostras íntegras indicam que tanto a resistência à compressão axial quanto a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas são significativamente influenciadas pela presença de ar incorporado, pelo tipo de cura e pela presença e linhagem bacteriana, conforme apresentado no gráfico 1 e 2 abaixo:

Gráfico 1 - Resistência à compressão axial aos 28 e 63 dias em amostras íntegras.



Fonte: Autora, 2025.

Gráfico 2: Velocidade de Onda Ultrassônica em amostras íntegras.



Fonte: Autora, 2025.

A introdução de ar incorporado nas argamassas tende a reduzir a resistência à compressão em até 38% aos 28 dias e 25% aos 63 dias, refletindo o aumento da porosidade e a diminuição da continuidade da matriz cimentícia.

A cura com manta geotêxtil provoca redução menos expressiva, cerca de 3,6% aos 63 dias, demonstrando menor impacto sobre a densidade da matriz. As amostras sem adição de bactérias e sem ar incorporado apresentam os maiores valores de resistência, corroborando os achados de Xu e Wang (2018), que evidenciam a importância da densidade e uniformidade da matriz cimentícia para o desempenho mecânico do concreto.

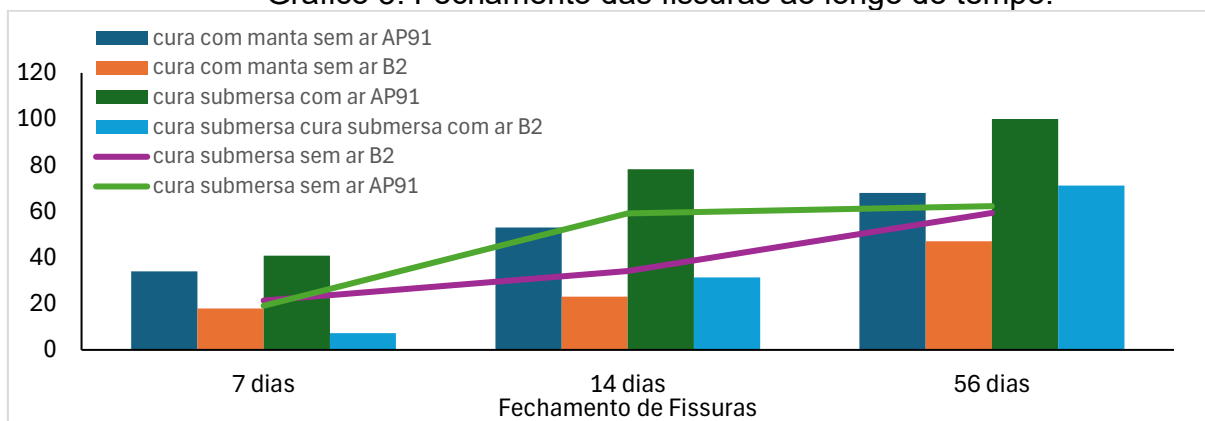
A velocidade de propagação ultrassônica, determinada pelo tempo necessário para que o pulso percorra o corpo de prova (ASTM C597, 2018), apresentou valores ligeiramente inferiores nas amostras com ar incorporado, refletindo maior presença de vazios e descontinuidades internas.

No entanto, as amostras que receberam a bactéria *Bacillus subtilis* AP91 em combinação com o incorporador de ar apresentaram velocidades superiores às de algumas amostras sem ar, sugerindo que a atividade biológica contribuiu para densificação parcial da matriz e melhoria da continuidade interna, indicando efeito positivo da precipitação de carbonatos, conforme observado por Jonkers e Schlangen (2008) e Ghellere *et al.* (2025).

Nos corpos de prova fissurados, prismáticos de 4×4×16 cm, as leituras foram realizadas aos 7, 14, 28 e 63 dias após a moldagem, conforme descrito na metodologia. Para fins de apresentação no texto, foram selecionadas apenas as leituras mais representativas, que evidenciam o fechamento mais eficiente das fissuras, enquanto as demais leituras serão disponibilizadas nos anexos.

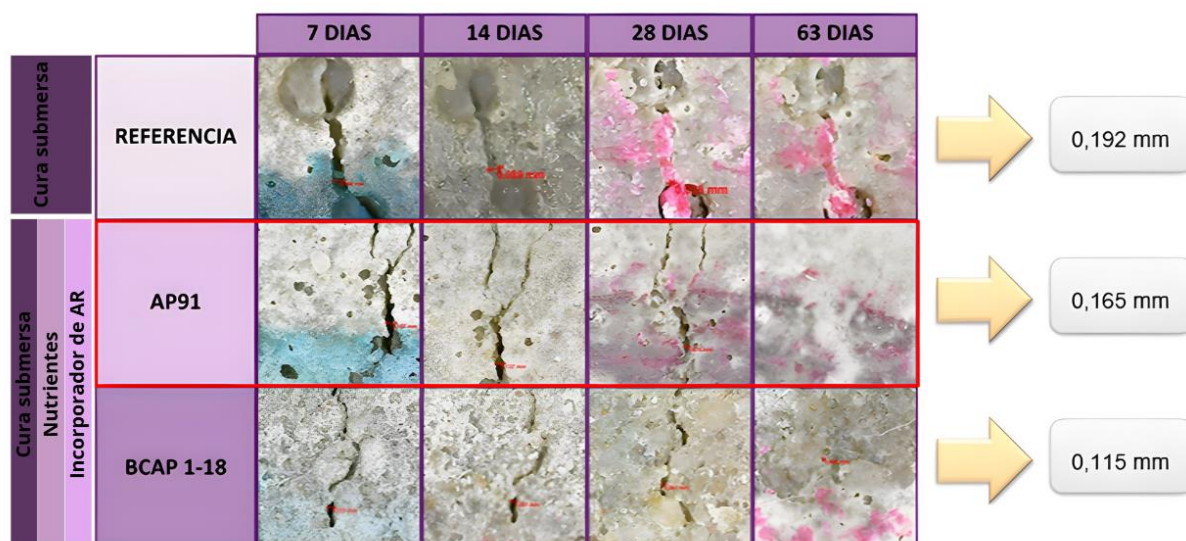
Foram analisados três trechos centrais das amostras (grids 1, 2 e 3), cujas imagens registraram a redução progressiva da abertura das fissuras ao longo do tempo. Destacaram-se os resultados das amostras com melhor desempenho, obtido sob cura submersa, conforme apresentado no Gráfico 3 e na Figura 10. Em anexo ao documento, encontram-se algumas leituras complementares referentes a cada tipo de bactéria, contemplando variações de aditivos e nutrientes utilizados.

Gráfico 3: Fechamento das fissuras ao longo do tempo.



Fonte: Autora, 2025.

Figura 9 – Registros fotográficos adicionais das fissuras.



Fonte: Autora, 2025.

Observou-se que o fechamento das fissuras ocorreu de forma contínua, indicando a ação combinada da autocicatrização autógena, resultante da hidratação contínua do cimento, e da autocicatrização biológica, promovida pelos agentes bacterianos adicionados à matriz.

O desempenho observado demonstrou correlação direta com a largura inicial das fissuras, sendo que fissuras inferiores a 0,5 mm apresentaram maior eficiência de cicatrização, enquanto fissuras mais largas tenderam a fechar de forma mais lenta, conforme Hollmann (2020). A variabilidade observada, entre 0,05 mm e 0,8 mm, evidenciou a dificuldade de padronização do ensaio de indução de fissuras, justificando a necessidade de utilização de múltiplas amostras para seleção das mais representativas.

As amostras com incorporador de ar mostraram que, apesar da maior porosidade, a presença de bactérias e nutrientes permitiu precipitação acelerada de carbonato de cálcio (CaCO_3), resultando no preenchimento parcial ou total de vazios e fissuras. Esse efeito foi consistente com os resultados dos ensaios não destrutivos, nos quais se verificou aumento progressivo da velocidade ultrassônica e do módulo dinâmico, refletindo melhoria da homogeneidade interna, rigidez e comportamento elástico da matriz, especialmente nas amostras tratadas com AP91 em cura submersa.

A análise microestrutural evidenciou a presença de precipitados carbonáticos preenchendo fissuras e poros, com maior densidade nas amostras bacterianas em cura submersa, estabelecendo estreita correlação entre o fechamento das fissuras, o comportamento mecânico e as propriedades elásticas da matriz, conforme Jonkers e Schlangen (2008) e Ghellere *et al.* (2025).

A cura submersa proporcionou maior eficiência no fechamento das fissuras, mantendo umidade adequada para a germinação dos esporos e a atividade metabólica bacteriana, o que acelerou a precipitação de CaCO_3 . Por outro lado, a cura com manta geotêxtil apresentou desempenho inferior devido à limitação hídrica, mas ainda forneceu dados relevantes sobre a eficiência das linhagens bacterianas em condições restritivas de umidade, simulando ambientes internos de estruturas de concreto.

Quanto às linhagens bacterianas, a AP91 demonstrou maior eficiência em condições de umidade elevada, enquanto a BCAP/B2 (1-18) apresentou desempenho satisfatório em situações de menor disponibilidade hídrica, evidenciando diferenças na adaptação ao microambiente interno da matriz. A adição de nutrientes e incorporador de ar criou microambientes favoráveis à sobrevivência bacteriana, intensificando a precipitação de carbonatos, ainda que com leve comprometimento da resistência mecânica devido ao aumento da porosidade.

Nos ensaios mecânicos, verificou-se que as amostras bacterianas apresentaram recuperação parcial da resistência à compressão, decorrente do preenchimento progressivo das fissuras por CaCO_3 . Ensaio de flexão indicaram ganhos modestos, porém consistentes, em comparação às amostras de referência. Ensaio não destrutivo, incluindo velocidade ultrassônica e módulo dinâmico, evidenciaram melhoria da homogeneidade e rigidez elástica da matriz, especialmente nas amostras tratadas com AP91 em cura submersa. As análises microestruturais,

realizadas em estereomicroscópio, confirmaram o preenchimento das fissuras por precipitados carbonáticos, correlacionando-se diretamente com os ganhos mecânicos observados.

Em síntese, os resultados obtidos apontaram para maior eficiência de cicatrização em cura submersa, superioridade da linhagem AP91, efeito positivo da suplementação nutricional e ganhos progressivos mensuráveis por meio de ensaios destrutivos, não destrutivos e análises microestruturais, corroborando a viabilidade da autocicatrização biológica como estratégia para aumento da durabilidade e desempenho estrutural do concreto.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos ensaios planejados e na literatura especializada, foi possível concluir que a incorporação de agentes biológicos capazes de precipitar carbonato de cálcio (CaCO_3) na matriz cimentícia exerce influência significativa na autocicatrização de fissuras em estruturas de concreto. Os resultados evidenciam que tanto o tipo de cura quanto a linhagem bacteriana são determinantes para a eficiência desse processo.

Nos corpos de prova submetidos à cura submersa, a manutenção contínua de umidade favoreceu a germinação dos esporos e a atividade metabólica das bactérias, promovendo a formação acelerada de cristais de CaCO_3 e resultando no fechamento mais eficiente das fissuras, especialmente nas amostras que receberam a linhagem *Bacillus subtilis* AP91. Já a cura com manta geotêxtil, embora menos eficiente devido à menor disponibilidade hídrica, reproduziu condições próximas de ambientes internos de estruturas, permitindo avaliar diferenças de desempenho entre as linhagens bacterianas.

A comparação entre as linhagens indicou que a cepa AP91 apresentou maior eficiência de autocicatrização em relação à BCAP/B2 (1-18), corroborando a literatura. Entretanto, a BCAP/B2 (1-18) mostrou potencial de adaptação em condições de menor disponibilidade hídrica, sugerindo que diferentes cepas podem ser otimizadas conforme os objetivos do projeto — seja para maximizar a resistência mecânica ou a recuperação de fissuras.

A presença de aditivo incorporador de ar e nutrientes contribuiu para a criação de microambientes favoráveis à sobrevivência bacteriana, ainda que com leve comprometimento da resistência mecânica devido à maior porosidade. A suplementação nutricional, por sua vez, potencializou a atividade metabólica das bactérias, acelerando a precipitação de carbonatos e promovendo maiores taxas de cicatrização.

Nos ensaios mecânicos, observou-se manutenção ou ligeira redução da resistência à compressão, atribuída à incorporação de ar, mas as amostras bacterianas demonstraram recuperação parcial dessas propriedades ao longo do período de cura, decorrente do preenchimento progressivo das fissuras por CaCO_3 . De forma semelhante, os ensaios de flexão indicaram ganhos modestos, porém consistentes, nas amostras tratadas com bactérias em comparação às referências.

Os ensaios não destrutivos evidenciaram aumento da velocidade de propagação do pulso ultrassônico e elevação do módulo dinâmico, indicando maior homogeneidade da matriz, redução das descontinuidades internas e melhoria do comportamento elástico, particularmente para a linhagem AP91 em cura submersa. As análises microestruturais em estereomicroscópio confirmaram a presença de precipitados carbonáticos, dentro das fissuras, refletindo a redução da abertura média das trincas e a correlação positiva entre parâmetros microestruturais e mecânicos, conforme evidenciado nos gráficos e imagens anexados.

Em síntese, os resultados obtidos e esperados apontam para: (i) maior eficiência de cicatrização em condições de cura submersa; (ii) superioridade da linhagem AP91 em relação à BCAP/B2 (1-18) na promoção de autocicatrização e (iii) ganhos progressivos e mensuráveis em ensaios destrutivos, não destrutivos e observações micrográficas. Esses achados confirmam a viabilidade da autocicatrização biológica como tecnologia inovadora para aumento da durabilidade, resistência e sustentabilidade de estruturas de concreto, abrindo perspectivas para aplicações práticas em engenharia civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDULAZEEZ, M. M.; ZHANG, H. Sustainable strategies for concrete infrastructure preservation: A comprehensive review and perspective. *Infrastructures*, v. 10, n. 4, p. 99, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/10/4/99>. Acesso em: 19 maio 2025.

Assis, A. P., Silva, R. M., Costa, M. F. (2016). Diagnóstico de patologias em estruturas de concreto. *Revista Engenharia Estrutural*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776:2020 — Agregado miúdo — Determinação da massa específica por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003 — Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

Bundura, Z. B., Amiri, A., Ersan, Y. C., Boon, N., De Belie, N. (2017). Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. *Cement and Concrete Research*, 98, 44-49.

Cappellesso, F. (2018). Patologias em estruturas de concreto. *Revista Engenharia Civil*.

Carneiro, L. R. S., et al. (2019). Concreto autocicatrizante pela introdução de bactérias – uma revisão. *CONPAT*.

COLLEPARDI, M. Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete. *International Concrete Abstracts Portal*, v. 200, p. 21-38, 2001. DOI: 10.14359/10569.

Elgendy, I. M., Elkaliny, N. E., Saleh, H. M., Darwish, G. O., Almostafa, M. M., Metwally, K., Yahya, G., Mahmoud, Y. A.-G. (2025). Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and future prospects. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*.

FUTURE MARKET INSIGHTS INC. Sustainability and Urbanization to Shape the Future of the Concrete Admixture Market. *GlobeNewswire*, 14 jan. 2025. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/01/14/3009153/0/en/Sustainability-and-Urbanization-to-Shape-the-Future-of-the-Concrete-Admixture-Market-Study-by-Future-Market-Insights-Inc.html>. Acesso em: 19 maio 2025.

Ghellere, R. (2021). Bioconcreto: Inovação na construção civil. Revista Construção e Tecnologia.

GHELLERE, S. R. *Produção de concreto autocurável com esporos bacterianos imobilizados em gel de sílica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 22. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf>. Acesso em: 18 maio 2025.

IBRACON. (2023). *Análise da Demanda de Concreto na Construção Civil*. Instituto Brasileiro do Concreto.

International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). (2023). "Durability of Concrete: Influence of Air-Entraining Admixtures on Concrete Performance". Volume 10, Issue 1. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V10/i1/IRJET-V10I119.pdf>

Jonkers, H. M., Schlangen, E. (2010). Development of a bacteria-based self-healing concrete. Delft University of Technology.

Lee, Y. S., Park, W. (2018). Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. Applied Microbiology and Biotechnology.

Lenz, A. (2022). Concreto vivo: Aplicações e benefícios. Revista Engenharia Sustentável.

LIMA, P. R. L. et al. *Caracterização de materiais cimentícios modificados com aditivos biológicos para aplicação em concreto autocurável*. Revista Matéria, v. 25, n. 3, p. e12456, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BxF34DRPZBcMZz4qB>. Acesso em: 15 maio 2025.

Materials and Structures. (2022). "Effect of Air-Entraining Admixtures on Concrete Durability". SpringerLink. DOI: 10.1617/s11527-022-02098-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-022-02098-1>

MDPI Materials. (2022). "Air-Entraining Admixtures in Concrete: Enhancing Durability and Performance". Volume 15, Issue 13, Article 4382. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4382>

Medeiros, M. H. F., Andrade, J. J. O., Helene, P. (2011). Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. PhD Engenharia & Consultoria.

OLSSON, M. A. et al. Near-term pathways for decarbonizing global concrete production. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10387082/>. Acesso em: 15 maio 2025.

Pinheiro, S. M. M., Costa Junior, M. P. (2021). Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento. *Revista ALCONPAT*, 11(2), 17-37.
Roig-Flores, M., Formagini, S., Serna, P. (2021). Bacterial self-healing concrete: A sustainable approach. *Journal of Materials Science*.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. *Viability of Bacillus subtilis immobilization using silica gel for self-healing of cement based materials. Construction and Building Materials*, v. 283, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>. Acesso em: 14 maio 2025.

SILVA, J. R., PEREIRA, M. A., & COSTA, L. F. (2021). *Concreto e Mobilidade Urbana: Desafios e Oportunidades*. Revista Brasileira de Engenharia Civil.

STEPHENS, C. M. *Bacterial sporulation: A search for the signals and sensors that trigger the process. Current Biology*, v. 8, n. 14, 1998, p. R521–R524.

Thirupathi, S., Palanisamy, S., Asokan, V. (2025). Enhancing sustainability in construction: Exploring the self-healing mechanisms of bio-concrete. *Research on Engineering Structures & Materials*.

TIAN, B.; COHEN, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 117-123, jan. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00211-2).

TRABULSI, L. R.; ALTERTHUM, F. *Microbiologia*. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2015.

UNIFAP. (2020). *Sustentabilidade na Construção: O Papel do Concreto*. Universidade Federal do Amapá.

Vishal, A., Chepuri, A., Chandana, N. (2025). Assessment of bacteria-based self-healing concrete through experimental investigations — a sustainable approach. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*.

WIKIPEDIA. Alkali–silica reaction. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Alkali%E2%80%93silica_reaction. Acesso em: 18 maio 2025.

WIKIPEDIA. Concrete degradation. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_degradation. Acesso em: 18 maio 2025.

WIKIPEDIA. Rebar. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rebar>. Acesso em: 18 maio 2025.

WIKIPEDIA. Sulfate attack in concrete and mortar. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfate_attack_in_concrete_and_mortar. Acesso em: 18 maio 2025.

ZOTTIS, Amanda L. Avaliação da capacidade de autocicatrização em argamassas especiais contendo adições pozolânicas e agentes biológicos incorporados em casca de arroz. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

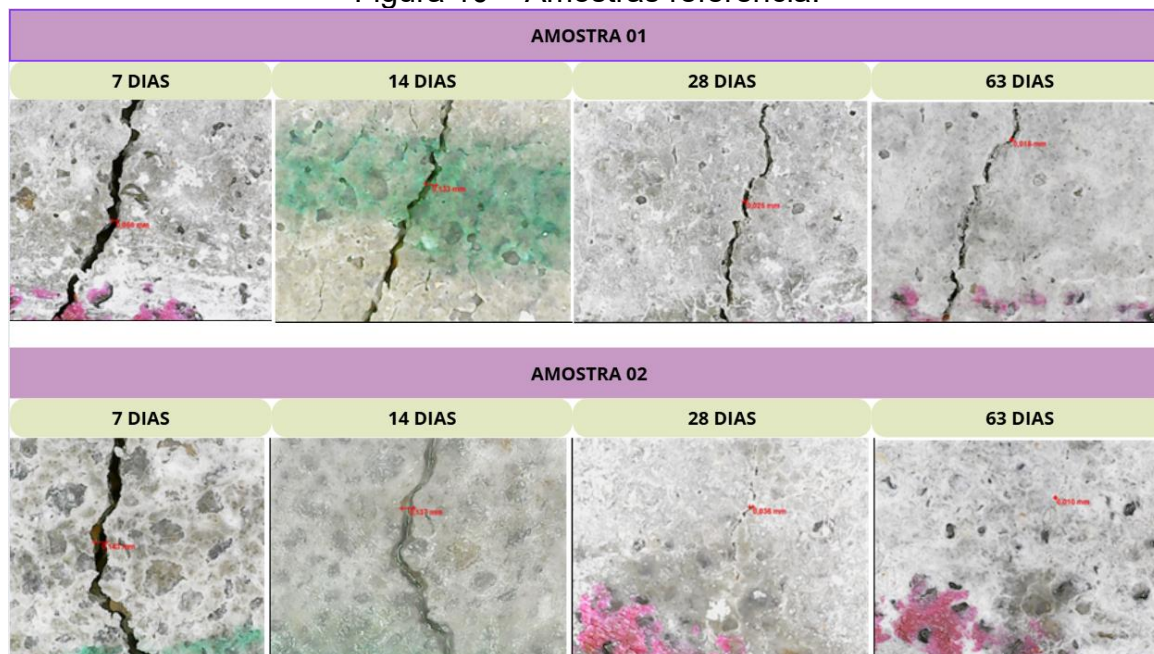
ZHANG, Jinghua; PENG, Lisha; WEN, Shuzhi; HUANG, Songling. A review on concrete structural properties and damage evolution monitoring techniques. *Sensors*, Basel, v. 24, n. 2, p. 620, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/2/620>. Acesso em: 14 maio 2025.

ZHAO, J.; LI, Z.; LIU, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; ZHANG, J. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, v. 876, p. 163477, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724047016>. Acesso em: 14 maio 2025.

ANEXO

- Amostras referência AP91

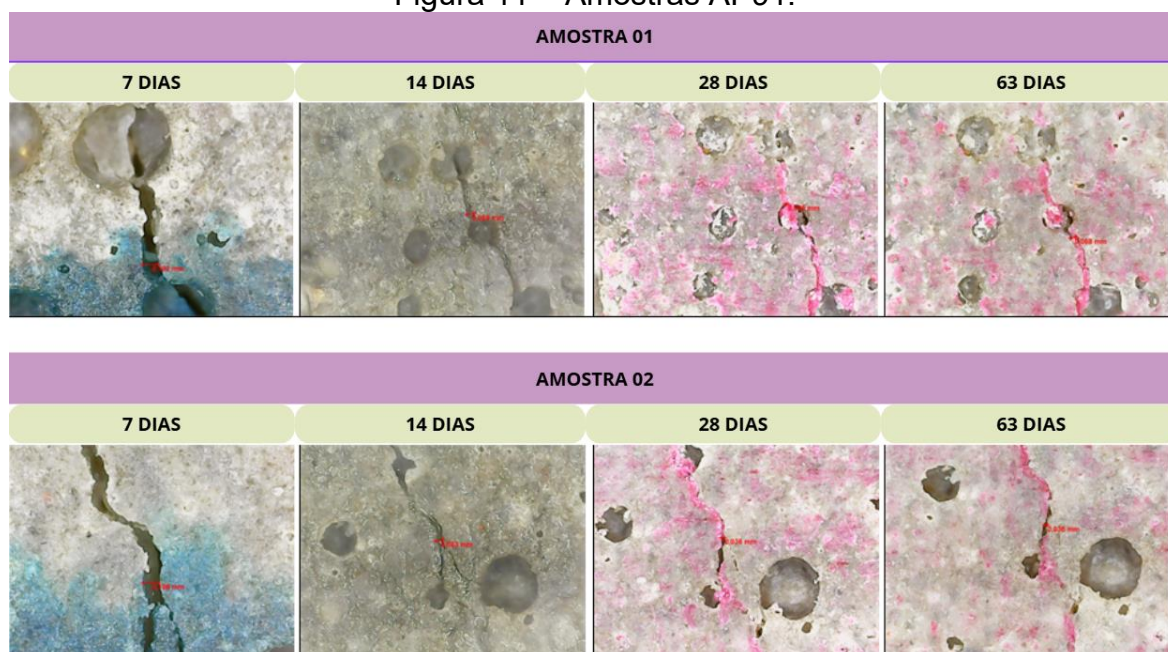
Figura 10 – Amostras referência.



Fonte: Autora, 2025.

- Amostras com incorporador de ar AP91

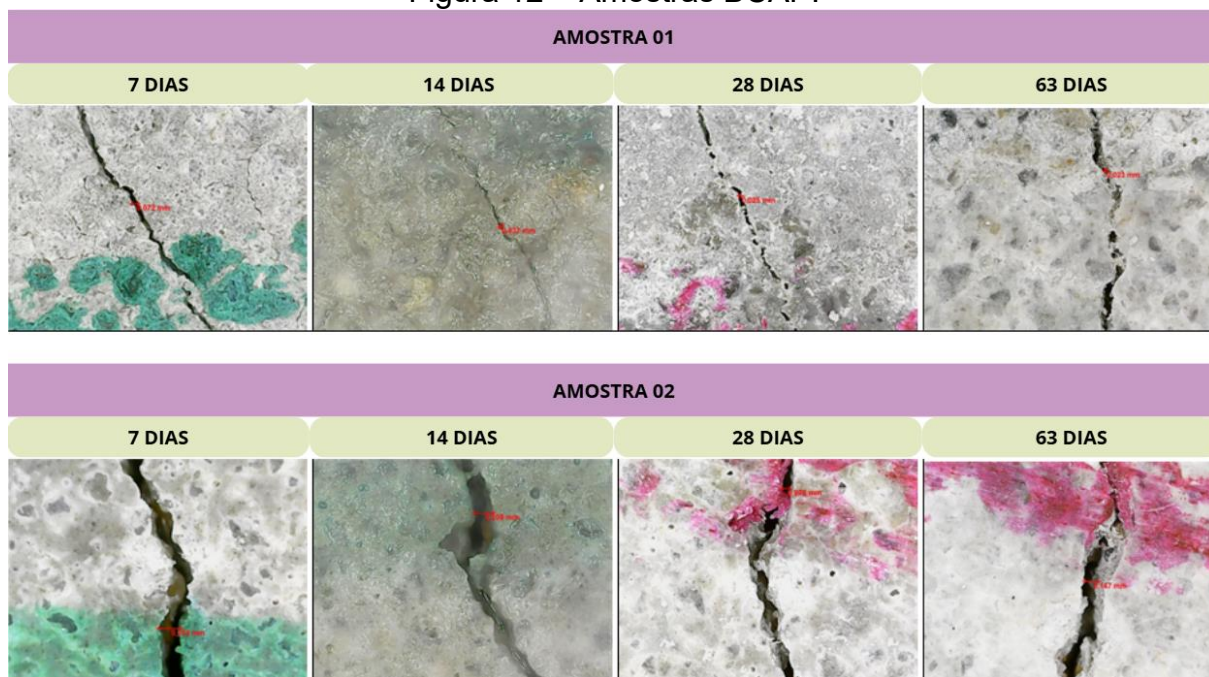
Figura 11 – Amostras AP91.



Fonte: Autora, 2025.

- Amostras referência geral BCAP

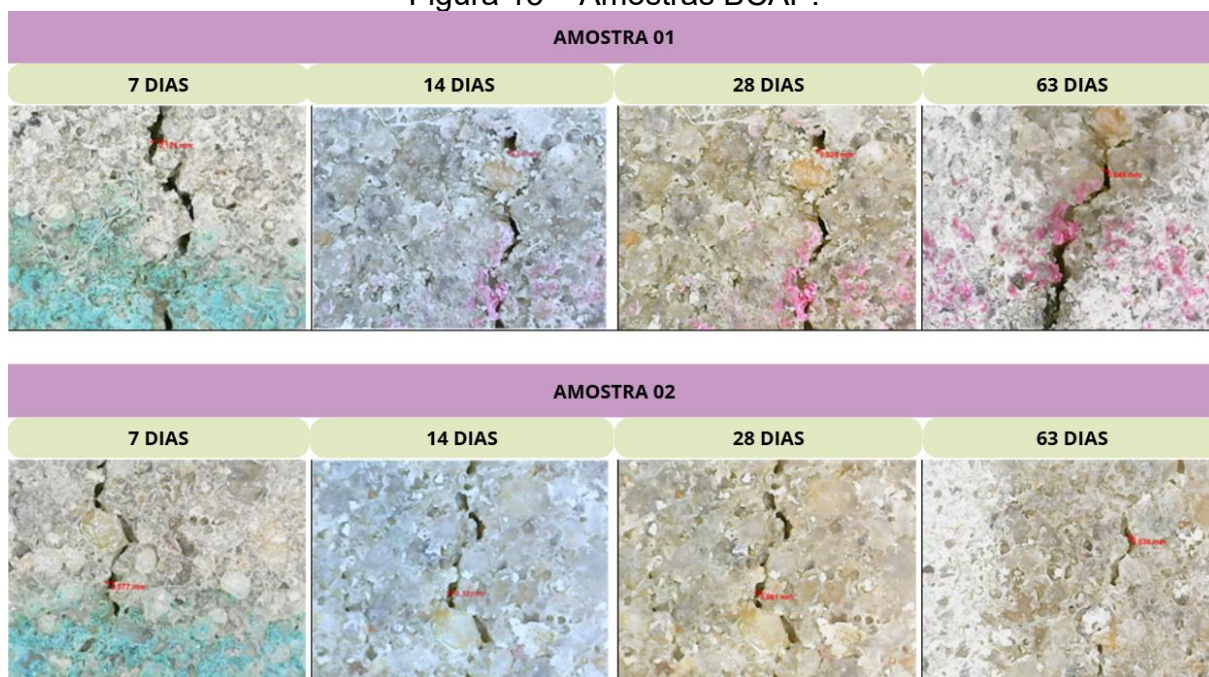
Figura 12 – Amostras BCAP.



Fonte: Autora, 2025.

- Amostras com incorporador de ar BCAP

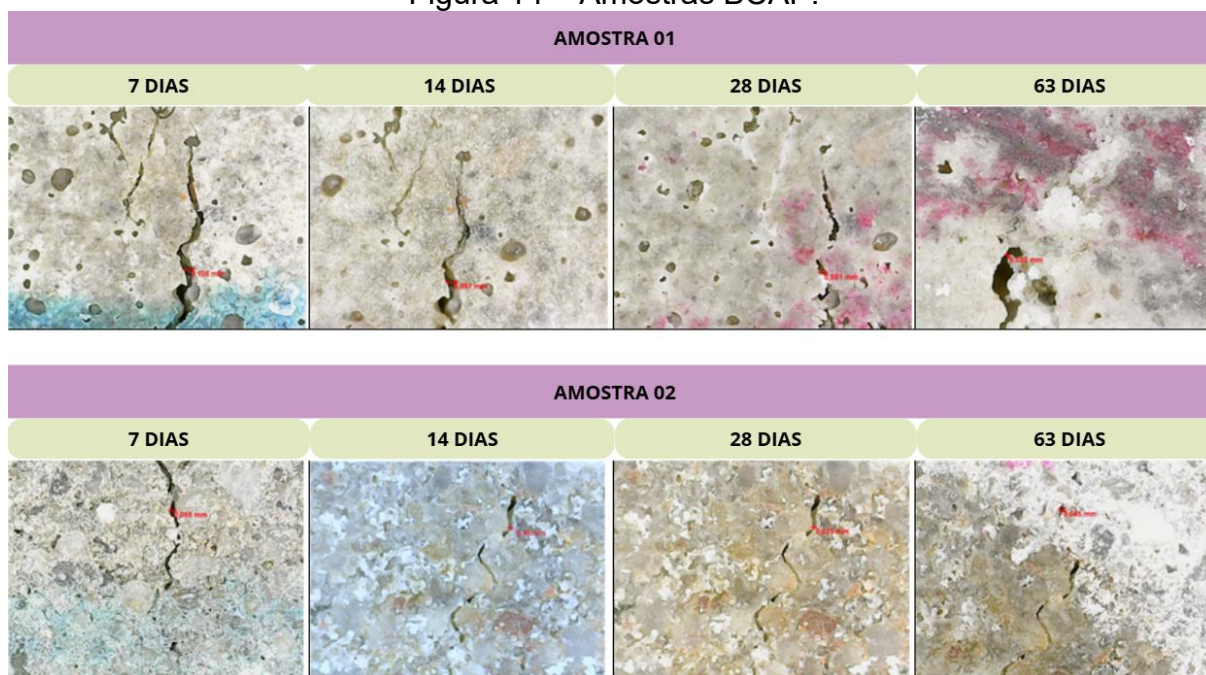
Figura 13 – Amostras BCAP.



Fonte: Autora, 2025.

- Amostras com nutrientes BCAP

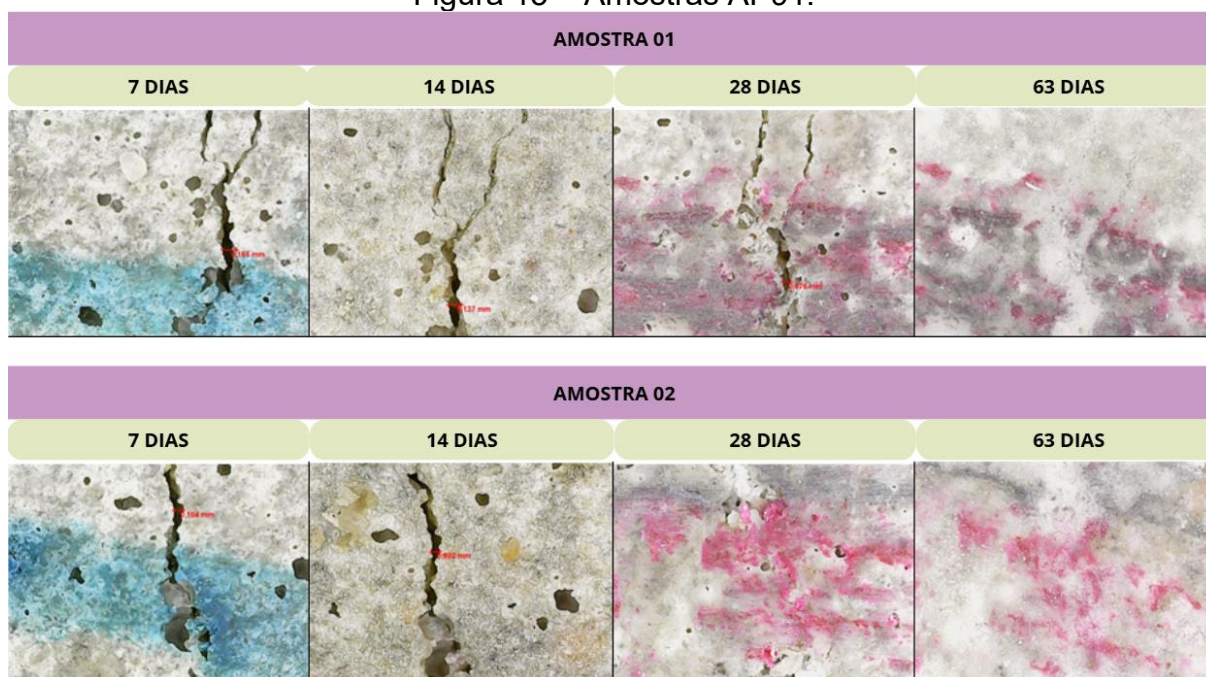
Figura 14 – Amostras BCAP.



Fonte: Autora, 2025.

- Amostras com nutrientes AP91

Figura 15 – Amostras AP91.



Fonte: Autora, 2025.