



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



CIDIRLEI DE PAULA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA AVALIAÇÃO DA
AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM A ADIÇÃO DE
PRODUTO CRISTALIZANTE E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DEVIDO AO ATAQUE DE ÍONS SULFATOS**

VOLTA REDONDA

2025

CIDIRLEI DE PAULA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA AVALIAÇÃO DA
AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM A ADIÇÃO DE
PRODUTO CRISTALIZANTE E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DEVIDO AO ATAQUE DE ÍONS SULFATOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos e linha de pesquisa em materiais Compósitos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cirlene F. Bandeira

Coorientador: Prof. Dr. Roberto de O. Magnago

VOLTA REDONDA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

S586d Silva, Cidirlei de Paula

Desenvolvimento de protocolo para avaliação da autocatrização do concreto com a adição de produto cristalizante e análise das propriedades mecânicas devido ao ataque de íons sulfatos. / Cidirlei de Paula Silva. - Volta Redonda: UniFOA, 2025. 84 p.: Il

Orientador (a): Profª Dra. Cirlene Fourquet Bandeira.

Coorientador (a): Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2025

1. Materiais - dissertação. 2. Durabilidade. 3. Resistência. 4. Autocatrização - concreto. I. Bandeira, Cirlene Fourquet. II. Magnago, Roberto de Oliveira. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



CIDIRLEI DE PAULA SILVA

DESENVIMENTO DE PROTOCOLO PARA AVALIAÇÃO DA
AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE PRODUTOS
CRISTALIZANTE E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DEVIDO
AO ATAQUE DE SULFATOS

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cirlene Fourquet Bandeira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Roberto de Oliveira Magnago

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Cirlene Fourquet Bandeira

Prof.^a Dr.^a Cirlene Fourquet Bandeira
Presidente / UniFOA

Sérgio Roberto Montoro

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro
Examinador interno / UniFOA

Caio Marcello F. A. Cossú

Prof. Dr. Caio Marcello Felbinger A. Cossú
Examinador externo / Estácio de Sá

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a minha família em especial a minha esposa e filhos, que sempre estiveram ao meu lado sendo a fonte da minha inspiração; à minha orientadora, Prof^a. Dr^a Cirlene Fourquet Bandeira e meu coorientador, Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, por terem dedicado o tempo para incentivar e orientar durante todo o desenvolvimento do presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder a dádiva da vida, por fortalecer minha fé nos momentos mais difíceis e, acima de tudo, por me dar coragem para seguir em frente e alcançar objetivos que antes pareciam distantes.

À memória de pessoas muito especiais, fundamentais na construção do meu caminho: meu pai Alcides e minha mãe Aparecida, que, mesmo ausentes fisicamente, continuam presentes em minhas lembranças e conquistas. Tenho certeza de que, onde estiverem, estão felizes e orgulhosos da minha jornada, principalmente por minha perseverança em busca de um futuro melhor para minha família.

À minha esposa e companheira de vida, Ilsa Silvânia, por seu amor, apoio incondicional e incentivo para que eu retornasse às salas de aula. Sua força foi essencial em todos os momentos desta trajetória. Junto aos nossos filhos, demonstrou dedicação, paciência e compreensão, renunciando a muitos momentos em família para que este sonho se tornasse realidade. Sou imensamente grato por tudo.

Aos meus filhos, pela compreensão nas horas em que precisei me ausentar devido aos estudos e à elaboração deste trabalho. Vocês são a razão do meu esforço e minha maior motivação. Amo vocês!

Aos meus familiares, especialmente meus irmãos, com quem compartilho uma história de lutas e conquistas. Cada etapa vencida em nossas vidas foi marcada por união, fé e determinação, e isso tornou a nossa caminhada ainda mais significativa.

Aos amigos conquistados ao longo dessa jornada, pela parceria e palavras de incentivo nos momentos desafiadores. À professora Cirlene Bandeira e ao professor Roberto Magnago, meus sinceros agradecimentos não apenas pela orientação técnica, mas também pela amizade, paciência e incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelo tempo e pelas valiosas contribuições. E, por fim, a todos os professores e funcionários da UNIFOA, que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação acadêmica e para a realização deste sonho. Muito obrigado!

EPÍGRAFE

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

“Marthin Luther King”

SILVA, C. P. **Desenvolvimento de protocolo para avaliação da autocicatrização do concreto com a adição de produto cristalizante e análise de propriedades mecânicas devido ao ataque de íons sulfatos.** 2025. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

RESUMO

A resistência estrutural do concreto, em ambientes hostis, especialmente quando expostas a íons sulfato, é uma questão de grande importância na engenharia civil. Neste estudo, o foco foi no desenvolvimento de um procedimento experimental para avaliar a autocicatrização do concreto com adição de aditivos cristalizantes, analisando seu desempenho mecânico e a resistência ao ataque dos íons sulfatos. Foram manufaturados corpos de prova com cimento CP III divididos em três grupos: amostra sem aditivo, amostra 1 e amostra 2 com diferentes cristalizantes, sendo os ensaios realizados em duas condições, com e sem a exposição aos íons sulfatos. Para a realização da pesquisa, foram realizados ensaios (resistência à compressão axial) em 7, 14, 28, 56 e 90 dias, bem como análise visual das fissuras, com o intuito de avaliar a capacidade de autocicatrização e selamento ao longo do tempo. Estes resultados indicaram que as amostras com aditivos apresentaram melhor desempenho mecânico e maior resistência à ação dos sulfatos. A amostra 2 contendo o cristalizante “x” obteve os melhores resultados, com incremento médio de até 7% na resistência em comparação à amostra sem adição dos cristalizantes, além de evidências do processo de autocicatrização e selamento parcial das fissuras a partir dos 49 dias. Observou-se queda de desempenho aos 90 dias em todas as amostras expostas ao ataque de sulfatos, com ou sem aditivos, indicando degradação por ataque químico. Com isso, conclui-se que, estes aditivos cristalizantes, contribuíram para mitigação dos efeitos do ataque dos íons sulfatos, melhorando, desta forma, não apenas a durabilidade, mas também o desempenho do concreto. O protocolo proposto nesta pesquisa mostrou-se eficaz, em ambientes com presença de sulfatos, como ferramenta de avaliação do processo de autocicatrização, sendo aplicável em estudos futuros com diferentes materiais e condições adversas de exposição.

Palavras-chave: Desempenho mecânico; Durabilidade; Resistência; Aditivos.

SILVA, C. P. **Development of a protocol for evaluating the self-healing of concrete with the addition of a crystallizing product and analysis of mechanical properties due to sulfate ion attack.** 2025. Dissertation (Professional Master's Degree in Materials) – Oswaldo Aranha Foundation, University Center of Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

ABSTRACT

The structural strength of concrete in hostile environments, especially when exposed to sulfate ions, is a matter of great importance in civil engineering. This study focused on developing an experimental procedure to evaluate the self-healing of concrete with the addition of crystallizing additives, analyzing its mechanical performance and resistance to sulfate ion attack. Test specimens were manufactured with CP III cement and divided into three groups: sample without additives, sample 1, and sample 2 with different crystallizers. The tests were conducted under two conditions: with and without exposure to sulfate ions. Axial compression tests were performed at 7, 14, 28, 56, and 90 days, as well as visual analysis of cracks to assess self-healing and sealing capacity over time. These results indicated that the samples with additives presented better mechanical performance and greater resistance to sulfate action. Sample 2 containing crystallizer "x" achieved the best results, with an average increase of up to 7% in strength compared to the sample without crystallizers, in addition to evidence of the self-healing process and partial crack sealing after 49 days. A decrease in performance was observed at 90 days in all samples exposed to sulfate attack, with or without additives, indicating degradation due to chemical attack. Therefore, it is concluded that these crystallizing additives helped mitigate the effects of sulfate ion attack, thus improving not only the durability but also the performance of the concrete. The protocol proposed in this research proved effective in sulfate-containing environments as a tool for assessing the self-healing process and is applicable in future studies with different materials and adverse exposure conditions.

Keywords: Mechanical performance; Durability; Resistance; Additives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Degradação devido a carbonatação do concreto.....	34
Figura 2. Ilustração de degradação do concreto por cloretos.....	35
Figura 3. Degradação do concreto devido ao processo de lixiviação.....	36
Figura 4. Degradação devido ao processo de corrosão das armaduras.....	37
Figura 5. Degradação devido ao processo da reação álcali agregado.....	38
Figura 6. Degradação do concreto devido ao ataque por íons sulfatos.....	40
Figura 7. Degradação devido a formação de etringita no interior do concreto.....	41
Figura 8. Degradação do concreto devido a formação da taumasita.....	42
Figura 9. Formação dos cristais no interior do concreto.....	48
Figura 10. Etapas de ensaio de abatimento do tronco de cone.....	54
Figura 11. Processo de mistura do concreto.....	60
Figura 12. Ensaio de abatimento do tronco de cone “ <i>Slump</i> ”	61
Figura 13. Prensa hidráulica usada para a realização dos ensaios.....	63
Figura 14. Formação de fissuras após o ensaio de resistência á tração por compressão diametral no corpo de prova.....	64
Figura 15. Ensaio de permeabilidade à água em corpos de prova de concreto utilizando o equipamento desenvolvido e patenteado.....	65
Figura 16. Representação gráfica do equipamento em perspectiva isométrica.....	68
Figura 17. Desvio padrão dos corpos de prova sem a exposição aos íons sulfato.....	72
Figura 18. Desvio padrão dos corpos de prova com a exposição aos íons sulfato.....	73
Figura 19. Vazão volumétrica para a verificação e controle das fissuras em exposição aos íons sulfato.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores típicos para a relação água /cimento.....	29
Tabela 2. Composição química e propriedades físicas do cimento CIII.....	56
Tabela 3. Propriedades do concreto – ensaio 1	70
Tabela 4. Propriedades do concreto – ensaio 2	70
Tabela 5. Propriedades do concreto – ensaio 3	70
Tabela 6. Propriedades do concreto (média)	70
Tabela 7. Determinação da resistência a compressão axial (MPa) - sem sulfato.....	71
Tabela 8. Determinação da resistência a compressão axial (MPa) - com sulfato.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
Ca ²⁺	Íon cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio (forma abreviada de Ca(OH) ₂)
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP-RS	Cimento Portland Resistente a Sulfatos
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MPa	Megapascal (unidade de pressão ou resistência mecânica)
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
PCE	Éter policarboxílico
RAA	Reação álcalis-agregado
RAS	Reação álcali-sílica
RASS	Reação álcali-silicato

RAC Reação álcali-carbonato

RS Resistente a sulfatos

SO_4^{2-} Íon sulfato

% Porcentagem

mm Milímetro

°C Grau Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 MATERIAIS CERÂMICOS.....	22
2.1.1 Classificação e utilização dos materiais cerâmicos.....	22
2.1.1.1 Cerâmica vermelha.....	22
2.1.1.2 Cerâmicas brancas.....	22
2.1.1.3 Materiais de revestimento com placas cerâmicas.....	23
2.1.1.4 Materiais refratários.....	23
2.1.1.5 Abrasivos.....	23
2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	24
2.3 COMPÓSITOS.....	24
2.4 CONCRETO.....	25
2.4.1 Princípio básico do concreto.....	25
2.4.2 Composição do concreto simples.....	26
2.4.2.1 Cimento portland.....	27
2.4.2.2 Agregados.....	28
2.4.2.3 Água de amassamento.....	29
2.4.2.4 Aditivos.....	30

2.5 PATOLOGIA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	31
2.6 FATORES DA DEGRADAÇÃO E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO.....	32
2.6.1 Carbonatação do Concreto.....	33
2.6.2 Ataque por Cloretos.....	34
2.6.3 Lixiviação.....	35
2.6.4 Corrosão das armaduras.....	36
2.6.5 Reação álcali agregado.....	37
2.6.6 Ataque por sulfatos.....	39
2.6.7 Formação da etringita	40
2.6.8 Formação da taumasita	42
2.7 FISSURAS.....	43
2.7.1 Principais causas das fissurações.....	44
2.7.2 Fissuras ocasionadas devido ao ataque de agentes químicos	45
2.8 PREVENÇÃO E CONTROLE DAS FISSURAS.....	46
2.9 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO.....	47
2.9.1 Processo da autocicatrização anterior a adoção de aditivos cristalizantes.....	49
2.9.2 Diferentes técnicas de autocicatrização do concreto.....	49
2.9.3 Avaliação da autocicatrização do concreto.....	50
2.9.4 Aditivos cristalizantes.....	51
2.9.4.1 Tipos de Cristalizante.....	53
2.10 ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE “ <i>SLUMP TEST</i> ”	54
2.11 ENSAIO DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56

3.1 MATERIAIS	56
3.1.1 Cimento.....	56
3.1.2 Agregados.....	57
3.1.3 Água.....	57
3.1.4 Aditivos cristalizantes.....	58
3.1.5 Sulfato de sódio (Na_2SO_4)	58
3.1.6 Moldes para corpos de prova.....	59
3.2 MÉTODOS.....	59
3.2.1 Preparo dos traços de concreto.....	59
3.2.2 Ensaio de abatimento e moldagem dos corpos de prova	61
3.2.3 Cura dos corpos de prova	62
3.2.4 Ensaio de resistência a compressão axial.....	62
3.2.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	63
3.2.6 Teste de vazão com solução saturada com Na_2SO_4	64
3.2.7 Avaliação da autocicatrização.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1 EQUIPAMENTO PARA TESTE DA VAZÃO E ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO (PATENTEADO).....	67
4.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	69
4.3 TESTE DE COMPRESSÃO SEM EXPOSIÇÃO AO SULFATO.....	71
4.4 TESTE DE COMPRESSÃO COM EXPOSIÇÃO AO SULFATO.....	71
4.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SEM E COM A EXPOSIÇÃO AO SULFATO.....	72
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E VERIFICAÇÃO DAS FISSURAS EM EXPOSIÇÃO AOS ÍONS SULFATO.....	74

5 CONCLUSÕES	76
6 TRABALHOS FUTUROS.....	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto permanece, na construção civil, como um dos principais materiais estruturais, graças à sua elevada resistência mecânica à compressão e ampla aplicabilidade. Contudo, a durabilidade desse material pode ser severamente comprometida por fatores ambientais, exigindo uma abordagem criteriosa desde a sua formulação até a manufatura da estrutura (Silva *et al.*, 2022).

Ambientes agressivos, como solos e águas contendo íons sulfato, são fatores de risco, significativo, para estruturas de concreto. Essas substâncias reagem com os produtos oriundos da hidratação do cimento, resultando em compostos expansivos que causam fissuração e perda de desempenho ao longo do tempo (Bonifácio *et al.*, 2022).

Além disso, a umidade constante, facilita a percolação de agentes deletérios, o que acelera processos de deterioração, especialmente em regiões com climas extremos ou exposição a substâncias industriais. Estratégias preventivas tornam-se essenciais para controlar esse tipo de degradação (Dourado *et al.*, 2022).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de reforço estrutural têm se mostrado promissores na mitigação de danos e na recuperação da integridade de estruturas afetadas. O uso de fibras, aditivos e concretos especiais vem ganhando destaque nesse cenário (Monteiro *et al.*, 2024). Dessa forma, torna-se indispensável que os profissionais da engenharia acompanhem a evolução tecnológica do setor. A aplicação de normas atualizadas, somada a inspeções e manutenções adequadas, contribui, de forma direta, no aumento da vida útil das edificações de concreto (Statera, 2024).

O ataque promovido pelos íons sulfatos é um dos processos químicos mais agressivos que afetam a durabilidade deste material. Ele ocorre quando esses íons presentes no solo, na água ou em ambientes industriais reagem com os compostos hidratados do cimento, principalmente aluminatos e hidróxido de cálcio. Essa reação, que leva à formação de produtos expansivos, tais como gipsita e tringita, geram

tensões internas e provocam fissuras, perda de resistência e desagregação da estrutura (Bonifácio *et al.*, 2022).

É comum a presença de íons sulfatos em ambientes marinhos, esgotos sanitários e solos contaminados, o que torna o problema recorrente em obras de infraestrutura, como fundações, reservatórios, estações de tratamento e túneis. Em muitos casos, a deterioração causada por esses íons compromete não apenas o desempenho funcional da estrutura, mas também sua segurança e vida útil. Tornando-se indispensável avaliar previamente o ambiente e adotar soluções técnicas adequadas (Silva *et al.*, 2022).

Entre as principais medidas preventivas para evitar o ataque deletério devido aos sulfatos está na escolha e adoção de cimentos resistentes aos íons sulfatos e controle rigoroso da relação água/cimento para se obter o fck esperado e redução da porosidade do concreto. Também é recomendável a adições de minerais (ex. pozolanas), que reduzem a disponibilidade para a reação com os íons sulfato, quando em contato com o hidróxido de cálcio na forma livre. Essas ações retardam ou até impedem a formação de compostos deletérios, aumentando significativamente a durabilidade da estrutura (Monteiro *et al.*, 2024).

Quando os efeitos do ataque dos íons sulfatos SO_4^{2-} já estão presentes, é necessário recorrer a técnicas de recuperação que envolvam a substituição ou reforço de partes danificadas. A aplicação de produtos cristalizantes, o uso de argamassas especiais e a técnica de encamisamento estrutural com concreto projetado são opções eficientes para reabilitar os elementos estruturais comprometidos. Em casos mais avançados, a remoção do concreto contaminado pode ser inevitável (Dourado *et al.*, 2022).

A combinação entre técnicas de prevenção e recuperação garante maior vida útil às estruturas, reduz os custos com manutenção e previne falhas estruturais. Portanto, a compreensão dos mecanismos do ataque por sulfato e a aplicação de métodos adequados são essenciais do ponto de vista econômico, técnico e ambiental, ao evitar a demolição precoce de obras de engenharia (Statera, 2024).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é o de formular um protocolo experimental para a avaliação do processo de autocicatrização do concreto com a adição de cristalizantes quando expostos ao ataque de sulfato, bem como analisar as propriedades mecânicas após a exposição química.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento do concreto após adição de aditivo cristalizante expostos ao ataque de sulfato.
- Determinar a eficiência da cicatrização e fechamento de fissuras em concretos mesmo devido a exposição química.
- Analisar o impacto da autocicatrização em relação a resistência mecânica do concreto.
- Comparar o desempenho do concreto com aditivo cristalizante antes a após a exposição de sulfato.
- Avaliar a eficiência e importância do equipamento patenteado pelo autor, para o desenvolvimento da pesquisa.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, o aumento das exigências por estruturas mais duráveis, sustentáveis e com baixo custo de manutenção tem impulsionado a busca por inovações tecnológicas na engenharia civil. Um dos grandes desafios enfrentados atualmente é garantir a durabilidade do concreto frente a ambientes agressivos, especialmente aqueles contendo íons sulfato, que promovem reações com os compostos do cimento hidratados, resultando em fissurações, perda de resistência e redução do tempo de vida das estruturas.

Paralelamente, a crescente preocupação com o impacto ambiental gerado pelos resíduos da construção civil evidencia a necessidade de práticas mais sustentáveis. O descarte precoce de estruturas degradadas gera não apenas custos

econômicos elevados com demolição e reconstrução, mas também acentua a demanda no tocante aos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Nesse cenário, o desenvolvimento de métodos que aumentem a vida útil das estruturas de concreto e reduzam intervenções corretivas se torna estratégico. A autocicatrização do concreto, principalmente quando aditivos cristalizantes são utilizados, surge como uma alternativa promissora por promover o fechamento autônomo de microfissuras, reduzir a permeabilidade e proteger a matriz cimentícia contra agentes agressivos.

Dessa forma, a proposta deste trabalho justifica-se pela relevância técnica e ambiental do tema, ao buscar avaliar a eficiência de aditivos cristalizantes na autocicatrização de concretos quando submetidos ao ataque de íons sulfato. Além disso, o desenvolvimento de um protocolo experimental específico contribui não apenas para a compreensão dos mecanismos envolvidos, mas também para a criação de ferramentas aplicáveis em projetos de reabilitação e durabilidade de estruturas, alinhando-se aos princípios da engenharia sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS CERÂMICOS

De acordo com Sushi (2024), cerâmicas são compostos formados por elementos metálicos e não-metálicos, nos quais as ligações interatômicas são, total ou predominantemente, iônicas com alguma natureza covalente. Esta denominação (cerâmica) é originada do grego (“keramikos”) que significa matéria prima queimada, ou seja, as propriedades desejadas estão diretamente correlacionadas a um processo de tratamento térmico de alta temperatura, conhecido como ignição.

2.1.1 Classificação e utilização dos materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são largamente empregados em aplicações técnicas e funcionais, com finalidades que variam desde o uso estético até soluções industriais. Em sua forma tradicional, são classificados conforme a composição e aplicação final, sendo os principais grupos: cerâmica vermelha, cerâmica branca, placas de revestimento, materiais refratários, abrasivos e isolantes térmicos. Essa diversidade se deve às propriedades como dureza, resistência térmica e estabilidade química (Lima *et al.*, 2021).

2.1.1.1 Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha é produzida a partir de argilas que possui alto teor de Fe_2O_3 (óxidos de ferro), responsáveis por sua coloração característica. Este material é amplamente utilizado, na construção civil, para fabricação de blocos, tijolos, telhas e tubos cerâmicos, além de utensílios domésticos simples. Seu destaque está na facilidade de conformação, baixo custo e ampla disponibilidade de matéria-prima, sendo uma das formas mais antigas e comuns de cerâmica estrutural (Costa *et al.*, 2022).

2.1.1.2 Cerâmicas brancas

As cerâmicas brancas são materiais de coloração clara, compostos principalmente por caulim, feldspato e quartzo. Devido à sua composição mais pura,

são destinadas a produtos que exigem alto valor estético e de desempenho técnico, como porcelanas, louças sanitárias e revestimentos vitrificados. Apresentam boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e acabamento superficial de elevada qualidade. Em razão da pureza das matérias-primas, seu processamento requer maior controle nas etapas de conformação e queima, a fim de garantir uniformidade e propriedades finais adequadas (Andrade *et al.*, 2021).

2.1.1.3 Materiais de revestimento com placas cerâmicas

Na construção civil, as placas cerâmicas são usadas como revestimentos funcionais e decorativos em pisos, paredes, fachadas e bancadas. Esses materiais apresentam elevada resistência ao desgaste e à umidade, além de facilidade de manutenção. Azulejos, porcelanatos, lajotas e pastilhas são exemplos comerciais desse tipo de cerâmica. A escolha da placa ideal depende do ambiente de aplicação e do desempenho esperado (Macedo *et al.*, 2023)..

2.1.1.4 Materiais refratários

Os materiais refratários são projetados para suportar temperaturas elevadas sem comprometer sua integridade estrutural ou química. São utilizados principalmente em fornos industriais, caldeiras e equipamentos sujeitos a ataques químicos e a variações térmicas. Destacam-se as argilas refratárias, a zircônia (ZrO_2) e a cromita ($FeCr_2O_4$), que oferecem alta resistência térmica e estabilidade mecânica. Seu uso é essencial em setores como siderurgia, fundição e cerâmica industrial (Rodrigues *et al.*, 2021).

2.1.1.5 Abrasivos

Os abrasivos cerâmicos são materiais de alta dureza usados para cortar, polir ou desgastar outros materiais. Entre os principais compostos utilizados estão o óxido de alumínio, a areia de sílica e o carbetto de silício. Esses produtos apresentam grande resistência ao desgaste e são aplicados em ferramentas de usinagem, lixas industriais e discos de corte. O processo de fabricação se assemelha ao de outras cerâmicas técnicas, exigindo alta precisão na sinterização (Lima *et al.*, 2021).

2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os materiais poliméricos têm se consolidado como uma solução inovadora em diversos setores, inclusive na área de construção civil, por suas características únicas tais como baixa densidade, resistência à corrosão e versatilidade. Quando aplicados como compósitos reforçados com fibras, especialmente naturais, esses materiais oferecem desempenho mecânico satisfatório e benefícios ambientais. Santos, Forti e Longo (2023) destacam sua aplicação em elementos estruturais e de revestimento, enquanto Chantre et al. (2022) ressaltam a importância da modificação de fibras vegetais para melhorar a aderência com a matriz polimérica.

Além do uso estrutural, muitos polímeros têm sido empregados em sistemas de impermeabilização, proteção UV e isolamento térmico. Bugiereck *et al.* (2024) demonstram que a adição de aditivos específicos amplia a vida útil dos materiais em ambientes externos. Outro avanço relevante é a reciclagem de resíduos poliméricos para fabricação de componentes construtivos, como perfis e painéis. Araújo *et al.* (2023) destacam que a reutilização adequada desses resíduos pode manter propriedades compatíveis com os requisitos da construção civil.

Por fim, Hohemberger (2023) argumenta que a adoção de materiais poliméricos representa uma transformação positiva no setor construtivo, promovendo soluções mais sustentáveis e tecnicamente viáveis. Sua aplicação contribui para a inovação tecnológica, a redução de impactos ambientais e o aumento da durabilidade das edificações, alinhando-se aos princípios da construção sustentável e da economia circular.

2.3 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são formados pela união macroscópica de dois ou mais constituintes que possuem propriedades físicas e químicas distintas. Nessa combinação, a matriz é o elemento contínuo que envolve e mantém unidos os demais componentes, enquanto o reforço é responsável por fornecer resistência mecânica, rigidez e outras propriedades específicas. Os reforços podem estar presentes em forma de partículas, fibras curtas ou longas, com diâmetros variando entre 0,003 mm

e 0,03 mm. Essa combinação visa gerar um novo material com desempenho superior ao dos componentes utilizados isoladamente (Fonseca, 2005).

A escolha dos materiais constituintes e a configuração do compósito dependem da aplicação pretendida. Entre os principais fatores considerados estão: resistência mecânica, rigidez, resistência à fadiga, estabilidade térmica, comportamento acústico, aparência e propriedades eletromagnéticas. Adicionalmente, os compósitos apresentam excelente resistência à corrosão, desgaste e variações térmicas, o que contribui para reduzir os custos de manutenção e aumentar a durabilidade dos produtos (Fonseca, 2005).

Embora os concretos com polímeros não sejam classificados como compósitos avançados, eles representam uma categoria promissora. Com características de elevada resistência e durabilidade, os chamados concretos poliméricos vêm ganhando espaço em aplicações estruturais e funcionais. Essa tendência reflete a busca por materiais mais leves, duráveis e eficientes em termos de desempenho mecânico e comportamento ambiental (Dias, 2004).

Nas últimas décadas, os compósitos têm sido amplamente aplicados em áreas como engenharia aeronáutica, naval, mecânica e, mais recentemente, na engenharia civil. O desenvolvimento de laminados reforçados por fibras de alto desempenho, como carbono ou vidro, destaca-se pelo potencial de substituição de materiais, ditos, tradicionais tais como aço e madeira. Contudo, o uso em estruturas civis exige estudos sobre a durabilidade e o comportamento desses materiais ao longo do tempo, considerando a longa vida útil exigida em obras de infraestrutura (Dias, 2004).

2.4 CONCRETO

2.4.1 Princípio básico do concreto

O concreto, segundo Neville e Brooks (2013), é definido como um produto obtido pela mistura de um material aglomerante com agregados e água, formando uma massa que adquire resistência com o tempo. Na prática, refere-se à mistura de cimento portland, areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo), água e aditivos (sendo este último opcional) visando ajustar suas propriedades químicas, físicas e mecânicas conforme a aplicação.

A norma brasileira NBR 6118:2014 define, em seu item 3.1.2, que o concreto simples estrutural é aquele que não possui armadura ou que contém armadura em quantidade inferior ao exigido para o concreto armado. Esse tipo de concreto é adequado apenas para estruturas submetidas predominantemente à compressão, visto que o material apresenta baixa resistência à tração.

A fim de superar essa limitação, barras de aço são incorporadas ao concreto, originando o concreto armado. Essa combinação tira proveito da alta resistência à compressão do concreto e da elevada resistência à tração do aço. Ainda na norma mencionada, no item 3.1.3, o concreto armado é caracterizado pela dependência da aderência entre os dois materiais, sem aplicação de pré-alongamento nas armaduras antes da pega.

O uso do concreto armado possibilita sua aplicação em elementos estruturais (pilares, vigas, fundações e lajes). Essa tecnologia tornou-se a base da engenharia estrutural moderna, viabilizando obras de pequeno e grande porte, com segurança, durabilidade e eficiência técnico-econômica (Neville; Brooks, 2013).

2.4.2 Composição do concreto simples

De forma geral, o concreto simples é composto essencialmente por água, agregados graúdos e miúdos e cimento Portland. Essa combinação forma uma matriz heterogênea que endurece com o tempo, adquirindo resistência mecânica adequada para aplicações estruturais limitadas à compressão. A proporção dos materiais influencia diretamente a trabalhabilidade, resistência e durabilidade da mistura. Além dos componentes básicos, o concreto pode receber aditivos químicos ou adições minerais para modificar suas propriedades, seja no estado fresco ou endurecido. Aditivos plastificantes, retardadores ou aceleradores são comumente utilizados, assim como pozolanas e escórias, que melhoram o desempenho a longo prazo. Esses ajustes tornam o concreto um material versátil e adaptável a diversas condições de uso e exigências normativas (Silva et al., 2022). Na sequência, serão exibidos os componentes do concreto simples, que conforme já mencionado anteriormente é constituído da mistura do cimento portland, água, areia (agregado miúdo) e pedra ou brita (agregado graúdo), com possíveis adições de aditivos químicos.

2.4.2.1 Cimento portland

O principal aglomerante utilizado na composição do concreto é o cimento Portland, sendo o responsável por promover a união dos materiais constituintes por meio das reações de hidratação. Sua composição básica inclui o clínquer, que é o principal componente, além de adições (escórias granuladas de alto-forno, gesso, materiais carbonáticos e pozolânicos) (Neville; Brooks, 2013). É a presença do *clínquer* que confere ao cimento a capacidade de endurecimento, quando em contato com a água.

A produção do *clínquer* se dá a partir da mistura de argila moída e calcário britado. Este produto é submetido a temperaturas elevadas, em torno de 1450 °C, em fornos rotativos. Após essa etapa, o material fundido é resfriado abruptamente, formando grânulos sólidos que constituem o clínquer. Este, por sua vez, é moído até se transformar em um pó fino e, posteriormente, misturado às adições mencionadas, dando origem ao cimento Portland (Metha; Monteiro, 2014).

No Brasil, a norma ABNT NBR 16697:2018, regulamenta os tipos de cimento, que são classificados com base na composição e resistência mecânica. Os principais tipos incluem o CP I (Portland comum), CP II (composto), CP III (alto-forno), CP IV (pozolânico), CP V-ARI (alta resistência inicial), CP-RS (resistente a sulfatos), além de cimentos especiais como de baixo calor de hidratação e o branco (ABCP, 2022). Cada tipo é indicado para diferentes aplicações conforme suas propriedades físico-químicas.

Dentre os cimentos mais utilizados em obras civis estão o CII-E-32, CII-F-32 e o CIII-40, que apresentam bom desempenho para estruturas convencionais e obras de médio porte. O CPV-ARI, por sua rápida evolução de resistência, é amplamente empregado na fabricação de elementos pré-moldados. Já o CP-RS é indicado para obras em ambientes agressivos, devido à sua resistência ao ataque de íons sulfato, especialmente, em estações de tratamento e fundações em solos contaminados (Helene, 2004).

Os cimentos são comercializados principalmente em sacos de 25 kg e 50 kg, sendo que o CPV-ARI pode ser também fornecido em embalagens de 40 kg, conforme especificações de mercado. Cada tipo é fabricado de acordo com faixas de resistência

à compressão características, normalmente entre 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa, verificadas em ensaio padrão aos 28 dias (NBR 16697, 2018). A escolha adequada do tipo de cimento é essencial para garantir o desempenho estrutural e a durabilidade das obras.

2.4.2.2 Agregados

Os agregados compõem entre 70% e 80% do volume total do concreto e exercem influência significativa sobre suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Segundo a ABNT NBR 7211:2023, os agregados para concreto devem atender a requisitos específicos de granulometria, forma, limpeza, absorção e resistência, a fim de garantir o desempenho adequado do material composto.

A seleção adequada desses materiais é fundamental para a obtenção de concretos com bom desempenho (Metha; Monteiro, 2014). São classificados em agregados miúdos (como as areias) e graúdos (como as britas), podendo ser de origem natural ou artificial. Os naturais são os extraídos diretamente da natureza, como seixos rolados e areia lavada. Já os agregados artificiais, resultam de processos industriais, como as britas obtidas por trituração de rochas. Com o avanço da sustentabilidade na construção civil, destaca-se a reciclagem dos agregados oriundos dos resíduos de construção e/ou demolição (RCD).

Os estudos mais recentes indicam que a substituição parcial dos agregados naturais, especialmente brita e areia, por reciclados pode ser viável tecnicamente. Segundo Pereira *et al.* (2022), a substituição de até 30% do agregado graúdo por reciclados, no concreto, não causam problemas significativos a resistência à compressão, desde que os resíduos sejam corretamente processados, classificados e estejam em conformidade com as normas técnicas. Essa abordagem contribui de forma relevante para a sustentabilidade da construção civil, promovendo o reaproveitamento de materiais, a redução dos impactos ambientais e a conservação dos recursos naturais.

2.4.2.3 Água de amassamento

A água desempenha papel essencial na formação da matriz cimentícia do concreto, visto que ela reage quimicamente com o cimento por meio do processo de hidratação. Essa reação resulta principalmente na formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o responsável principal pela coesão e resistência mecânica do material endurecido (Neville; Brooks, 2013). Com isso, têm-se que a hidratação é fundamental, quando adequadamente realizada, para o desenvolvimento das propriedades desejadas ao longo do tempo.

A quantidade de água incorporada à mistura influencia diretamente a fluidez, a trabalhabilidade e a facilidade de lançamento do concreto, bem como seu adensamento. Um teor de água bem dosado reduz o risco de segregação dos materiais e minimiza a formação de vazios, favorecendo o desempenho estrutural e a durabilidade da peça (Metha; Monteiro, 2014). Assim, o controle do teor de água é tão importante quanto a seleção dos demais materiais constituintes.

A relação água/cimento (a/c) é considerada um dos fatores mais críticos no projeto do concreto. Quando os valores de a/c são elevado, formam-se concretos mais porosos, com menor resistência, enquanto relações muito baixas, dificultam a hidratação completa, podendo comprometer a integridade da mistura e sua trabalhabilidade (Helene, 2004). Portanto, o controle rigoroso da relação a/c e a qualidade da água utilizada são fundamentais para garantir um concreto durável, com bom desempenho estrutural e resistente às ações do ambiente. A tabela 1 apresenta os valores típicos para a relação água /cimento.

Tabela 1- Valores típicos para relação água /cimento

Relação água /cimento			
Relação a/c	Resistência MPA	Porosidade	Durabilidade
0,40	Alta	Baixa	Elevada
0,50	Média	Moderada	Média
0,65	Baixa	Baixa	Reduzida

Fonte: ABNT (2014)

2.4.2.4 Aditivos

Aditivos são materiais incorporados ao concreto durante a mistura, em pequenas quantidades, visando a modificação das propriedades da mistura, que podem estar no estado fresco ou no estado endurecido. De acordo com a ABNT NBR 11768 (2011), os aditivos se classificam de acordo com sua função: plastificantes, superplastificantes, aceleradores de pega, retardadores, incorporadores de ar e impermeabilizantes. Nos últimos anos, a evolução tecnológica dos aditivos tem proporcionado maior controle sobre a reologia e a durabilidade do concreto, permitindo atender às exigências de desempenho e sustentabilidade das obras (Polesello; Dreher, 2021).

Superplastificantes à base de éter policarboxílico (PCE) têm se destacado pela alta eficiência na redução da água e melhoria da fluidez do concreto, sendo fundamentais em aplicações que exigem concretos de alta resistência ou autoadensáveis. De acordo com Costa *et al.* (2022), o uso correto desses aditivos impacta diretamente a densidade do concreto e a resistência à compressão, melhorando seu desempenho estrutural e sua durabilidade, especialmente quando em ambientes agressivos.

Aditivos aceleradores e retardadores permitem adaptar o concreto a diferentes condições climáticas e logísticas. Em regiões quentes, os retardadores evitam a pega rápida, enquanto em locais frios os aceleradores favorecem a desforma precoce (Mapa da Obra, 2022). Já os impermeabilizantes atuam diminuindo a absorção de água e/ou a penetração de agentes agressivos, o que contribui significativamente para a longevidade das estruturas (Camargo Química, 2023).

Além dos benefícios técnicos, os aditivos têm papel importante na sustentabilidade da construção civil. A indústria tem desenvolvido formulações com menor impacto ambiental, promovendo maior eficiência energética e redução das emissões de CO₂ associadas à produção de concreto (Global Growth Insights, 2023). Nesse contexto, o uso adequado de aditivos, aliado ao conhecimento técnico, é fundamental para o desenvolvimento de soluções inovadoras, bem como, para a sustentabilidade no setor.

2.5 PATOLOGIA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O termo patologia, no contexto da construção civil, deriva das palavras gregas *pathos* (doença) e *logos* (estudo), significando o estudo das doenças que afetam as edificações. Na engenharia, refere-se à investigação das causas, mecanismos e efeitos de manifestações patológicas que comprometem o desempenho das estruturas (Helene, 2004). Esse campo tem ganhado relevância frente à necessidade de garantir a segurança das construções modernas e a sua durabilidade (Silva; Mota; Andrade, 2024).

Patologia das construções é definida como a área da engenharia que se dedica ao estudo das anomalias construtivas, sejam elas decorrentes de erros de projeto, execução inadequada, uso de materiais fora de especificação ou condições ambientais adversas (Caporrino, 2018). Segundo Borges e Pedreiro (2023), tais manifestações impactam diretamente a vida útil das estruturas, sendo essencial seu diagnóstico e controle desde as etapas iniciais do empreendimento.

As manifestações patológicas mais comuns, em estruturas de concreto, incluem fissuras, corrosão das armaduras, eflorescências, deslocamentos, e manchas superficiais. Tais ocorrências podem ter origem em retrações, movimentações térmicas, infiltrações, falhas de concretagem ou exposição a agentes agressivos, como íons cloreto e sulfato (Costa, 2022). Cada uma dessas manifestações apresenta riscos distintos, exigindo análises específicas quanto à causa e à severidade.

A umidade é um dos principais agentes indutores de patologias em estruturas de concreto. Quando presente em excesso, pode acelerar reações químicas deletérias, favorecer o ataque de sulfatos e a carbonatação do concreto, além de iniciar o processo de corrosão das armaduras (Borges; Pedreiro, 2023). A presença constante de água potencializa os danos e dificulta a recuperação estrutural, sendo um fator crítico a ser controlado.

Souza e Ripper (1998) definem a patologia das estruturas como um estudo feito nas origens, nos mecanismos, nas formas de manifestação e nas consequências das falhas. Já Helene (2004) amplia esse conceito ao incluir a “terapia das estruturas”, ou seja, o conjunto de técnicas de reabilitação que busca restaurar a capacidade

resistente, a integridade e o desempenho funcional das estruturas afetadas por degradação.

A prevenção das manifestações patológicas exige o cumprimento rigoroso de critérios técnicos em todas as etapas do ciclo construtivo. Isso inclui o planejamento conforme normas vigentes, elaboração de projetos consistentes, execução controlada e manutenção periódica (Bazant; Planas, 1998). A negligência em qualquer uma dessas fases pode resultar em falhas irreversíveis, comprometendo a estrutura e elevando os custos de reparo.

Além das práticas tradicionais de prevenção, estudos recentes apontam o uso de tecnologias modernas, como sensores embarcados e sistemas de monitoramento estrutural, como aliados na detecção precoce de patologias (Grossman, 2011). Essas ferramentas permitem maior previsibilidade de falhas e facilitam a gestão da integridade estrutural ao longo do tempo de vida útil da edificação.

2.6 FATORES DA DEGRADAÇÃO E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

A degradação do concreto é um fenômeno paulatino que compromete a durabilidade, bem como a segurança das estruturas. Diversos fatores físicos, químicos e mecânicos estão envolvidos nesse processo, sendo os principais a carbonatação, a penetração de íons cloreto (Cl^-), o ataque por sulfatos (SO_4^{2-}), a reação álcali-agregado (RAA) e a corrosão das armaduras. Segundo Costa *et al.* (2022), esses mecanismos são potencializados por defeitos construtivos, baixa qualidade dos materiais e falta de manutenção preventiva.

O ataque de agentes químicos como cloretos e sulfatos promove reações deletérias na matriz cimentícia, levando à formação de produtos que se expandem e à fissuração interna. Além disso, o processo de carbonatação do concreto reduz o pH da matriz e acelera a corrosão das armaduras. Conforme relatado por Dourado *et al.* (2022), a presença de fissuras ou elevada porosidade facilita a percolação desses agentes, tornando o concreto mais vulnerável à deterioração.

As variações térmicas, a umidade e os ciclos de congelamento e degelo também contribuem para a degradação ao induzirem microfissuras e fadiga estrutural. De acordo com Silva *et al.* (2023), ambientes com alternância de temperatura e

umidade exigem concretos com aditivos específicos ou proteção superficial para garantir maior durabilidade. Estruturas expostas a ambientes industriais e urbanos, por sua vez, sofrem com poluentes atmosféricos que aceleram os processos de deterioração.

A compreensão dos fatores que afetam a integridade do concreto é essencial para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e recuperação. O uso de adições minerais, aditivos impermeabilizantes, cobrimento adequado das armaduras e inspeções periódicas são algumas das soluções recomendadas. Como aponta Monteiro *et al.* (2024), a durabilidade do concreto depende diretamente do seu desempenho frente aos agentes externos e da adoção de práticas construtivas corretas desde o projeto até a manutenção.

2.6.1 Carbonatação do concreto

Um dos principais mecanismos de degradação, especialmente, em estruturas de concreto armado é a carbonatação. Ocorre pela reação entre o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e os compostos alcalinos da pasta de cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, resultando na formação de CaCO_3 (carbonato de cálcio) e redução do pH do concreto. Essa queda de alcalinidade elimina a proteção natural das armaduras, favorecendo o início do processo de corrosão (Silva *et al.*, 2022).

A velocidade de penetração do CO_2 no concreto está relacionada à porosidade da matriz, ao teor de umidade, ao tipo de cimento utilizado e à qualidade do cobrimento das armaduras. De acordo com Costa *et al.* (2021), concretos mal compactados ou com baixa resistência tendem a apresentar maior suscetibilidade à carbonatação. A presença de microfissuras também acelera a entrada de CO_2 , ampliando o risco de despassivação da armadura.

Para mitigar os efeitos da carbonatação, diversas estratégias têm sido propostas, tais como o uso de adições minerais (pozolanas, sílica ativa), aumento do cobrimento e aplicação de revestimentos protetores. Segundo Monteiro *et al.* (2023), o controle da carbonatação é fundamental para garantir a durabilidade das estruturas, principalmente em ambientes urbanos e industriais, onde a concentração de CO_2 é

elevada e a manutenção preventiva é negligenciada. A figura 1, mostra o processo de degradação devido à carbonatação do concreto.

Figura 1: Degradação devido à carbonatação do concreto



Fonte: blog da engenharia (2017)

2.6.2 Ataque por cloretos

O ataque por cloreto é um dos principais agentes causadores da corrosão em armaduras presentes em estruturas de concreto armado. Os cloretos penetram pela superfície do concreto e atingem a armadura, rompendo a camada passivadora de óxidos que a protege, mesmo quando o pH permanece elevado. Esse processo ocorre frequentemente em ambientes marinhos, industriais ou com uso de agentes descongelantes (Silva *et al.*, 2021).

A penetração dos íons cloretos depende da porosidade, da relação água/cimento, do tipo de cimento e do grau de compactação do concreto. De acordo com Souza *et al.* (2022), a baixa resistência do concreto e a presença de fissuras facilitam a difusão dos íons, acelerando o processo corrosivo. O avanço da corrosão leva à expansão dos produtos formados, causando fissuração, delaminação e perda da aderência entre concreto e aço.

Para reduzir os efeitos do ataque de cloretos, é recomendada a utilização de adições minerais, aditivos impermeabilizantes e cobrimento adequado das

armaduras. Além disso, tratamentos superficiais e inspeções periódicas são estratégias eficazes de mitigação. Segundo Ferreira *et al.* (2023), o controle tecnológico no lançamento e cura do concreto também desempenha papel essencial na prevenção desse tipo de degradação. A figura 2, ilustra a degradação do concreto devido ao ataque por do cloretos.

Figura 2: Ilustração de degradação do concreto por cloretos



Fonte: Antunes (2018)

2.6.3 Lixiviação

A lixiviação no concreto é um processo de degradação causado pela dissolução e transporte de compostos solúveis, como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio), para fora da matriz cimentícia. Esse fenômeno ocorre geralmente em estruturas expostas a fluxos constantes de água, como túneis, galerias e reservatórios, levando à formação de cavidades internas e à redução da alcalinidade do concreto (Lima *et al.*, 2021).

A progressão da lixiviação compromete a integridade da matriz do concreto, tornando-o mais poroso e suscetível à penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e dióxido de carbono. Segundo Oliveira *et al.* (2022), a velocidade da lixiviação está relacionada ao grau de porosidade, à presença de microfissuras e ao tempo de exposição à água. Além disso, o uso de cimento com alta quantidade de aluminatos pode aumentar a vulnerabilidade a esse tipo de ataque químico.

Para mitigar os efeitos da lixiviação, recomenda-se a utilização de adições minerais pozolânicas, que promovem a formação de compostos menos solúveis, e o emprego de aditivos impermeabilizantes. De acordo com Fernandes *et al.* (2023), o controle da relação água/cimento, a boa cura e a aplicação de barreiras superficiais são estratégias eficazes para aumentar a resistência do concreto à lixiviação e prolongar sua vida útil. A figura 3, ilustra a degradação do concreto devido ao processo de lixiviação.

Figura 3: Degradação do concreto devido ao processo de lixiviação



Fonte: Engenharia360 (2024)

2.6.4 Corrosão das armaduras

A corrosão em armaduras é um dos mecanismos mais críticos de degradação de estruturas de concreto armado, uma vez que compromete tanto a durabilidade quanto a segurança estrutural. Ela ocorre principalmente quando agentes agressivos, como íons cloreto ou dióxido de carbono, penetram no concreto e rompem a camada passiva que protege o aço. Segundo Costa *et al.* (2021), esse processo resulta na formação de óxidos que se expandem, gerando fissuração e deslocamento do revestimento.

Diversos fatores influenciam a velocidade da corrosão, incluindo a porosidade do concreto, a espessura do revestimento e a presença de umidade. De acordo com Santos *et al.* (2022), estruturas localizadas em regiões litorâneas ou industriais estão mais expostas à corrosão devido à alta concentração de cloretos no ambiente. Além disso, as falhas na execução de adensamento inadequado e/ou cura deficiente, podem agravar a penetração de agentes corrosivos.

A prevenção e o controle da corrosão exigem a adoção de práticas adequadas desde o projeto, como o uso de concretos de baixa permeabilidade, aditivos inibidores de corrosão e inspeções periódicas. Segundo Ferreira *et al.* (2023), a aplicação de revestimentos protetores e o uso de armaduras com proteção epóxi ou aço inoxidável têm mostrado bons resultados em obras com alta agressividade ambiental. A figura 4, ilustra a degradação devido ao processo de corrosão das armaduras.

Figura 4: Degradação devido ao processo de corrosão das armaduras



Fonte: Axfiber (2017)

2.6.5 Reação álcali-agregado

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um processo patológico que ocorre no interior dos poros do concreto entre os hidróxidos alcalinos e certos tipos de agregados reativos. Essa reação gera um gel higroscópico que, ao absorver água, se expande, provocando tensões internas, fissuras e perda de desempenho estrutural. De acordo com Oliveira *et al.* (2021), a RAA representa uma das principais causas de deterioração, especialmente em pontes, barragens e fundações.

A RAA pode ser classificada em três tipos principais: Reação Álcali-Sílica (RAS), Reação Álcali-Silicato (RA-S) e Reação Álcali-Carbonato (RAC). A RAS é a forma mais comum e ocorre com agregados que contêm formas amorfas ou mal cristalizadas de sílica, como opala, cristobalita e vidro vulcânico. Já a RAC, embora menos frequente, envolve rochas carbonáticas específicas, como dolomitos com textura crítica (Santos *et al.*, 2022).

A identificação da reatividade potencial dos agregados é fundamental para prevenir a manifestação da RAA. Segundo Lima *et al.* (2023), ensaios acelerados e análises petrográficas são amplamente utilizados para essa finalidade. Além disso, a especificação de materiais pozolânicos, como metacaulim e sílica ativa, tem se mostrado eficaz na mitigação da reação, uma vez que reduzem a quantidade de álcalis disponíveis e melhoram a microestrutura do concreto.

A durabilidade do concreto frente à RAA depende do controle da umidade, do tipo de cimento e do uso de agregados comprovadamente não reativos. Estudos recentes enfatizam a importância da abordagem preventiva no projeto, como a limitação do teor de álcalis na mistura e o emprego de aditivos específicos. Conforme Ferreira *et al.* (2023), a gestão adequada desses fatores é essencial para evitar fissuração prematura e perda de desempenho estrutural. A figura 5 ilustra as anomalias em um bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA (Pecchio *et al.*, 2006).

Figura 5 : Degradação devido ao processo da reação álcali agregado



Fonte: Pecchio et al. (2006)

2.6.6 Ataque por sulfatos

Os íons sulfato (SO_4^{2-}) estão amplamente distribuídos no ambiente e podem ser originados de fontes naturais ou decorrentes da atividade humana. Na natureza, são formados pela oxidação de compostos sulfurados como a pirita (FeS_2) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), principalmente em ambientes úmidos e aerados. Também ocorrem em regiões vulcânicas, ambientes marinhos e na decomposição de matéria orgânica rica em enxofre. Já as fontes antrópicas incluem efluentes industriais, fertilizantes e queima de combustíveis fósseis (Leone *et al.*, 2021; Martins e Souza, 2022).

Quimicamente, os sulfatos são sais derivados do ácido sulfúrico (H_2SO_4), em que o ânion SO_4^{2-} se combina com diversos cátions metálicos. Os compostos mais comuns são o sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e sulfato de magnésio (MgSO_4), todos solúveis em água em diferentes proporções. Esses sais são estáveis sob condições normais, mas, quando em solução, podem reagir com componentes do concreto, influenciando negativamente suas propriedades mecânicas e estruturais (Barbosa *et al.*, 2023).

Em solos e águas subterrâneas, os sulfatos ocorrem naturalmente em regiões com rochas sedimentares, depósitos evaporíticos e contaminação antrópica. Quando em contato com materiais cimentícios, os íons SO_4^{2-} penetram na estrutura por difusão e reagem com aluminatos do cimento, promovendo a formação de etringita expansiva. Esse fenômeno pode causar fissuração, deslocamento e perda de resistência do concreto, comprometendo sua durabilidade (Neville, 2013; Vieira *et al.*, 2021).

O ataque de sulfatos é uma reação química deletéria que afeta a durabilidade do concreto, especialmente em ambientes agressivos como solos e águas contaminadas por compostos sulfatados. Essa degradação ocorre devido à reação entre os íons sulfato (SO_4^{2-}) e os produtos da hidratação do cimento, formando compostos expansivos como a etringita e a gipsita. De acordo com Bonifácio *et al.* (2022), essa reação provoca aumento de volume, fissuração e perda de resistência mecânica do concreto.

O ataque de sulfatos pode ser classificado como interno ou externo. O ataque externo ocorre quando os sulfatos penetram no concreto a partir do meio ambiente,

enquanto o ataque interno resulta da presença de sulfatos nos próprios materiais constituintes da mistura. Além disso, pode ser classificado como ataque por sulfato de cálcio, magnésio ou sódio, cada um com características e mecanismos distintos de deterioração (Souza *et al.*, 2021).

A severidade do ataque depende da concentração dos íons, da permeabilidade do concreto, do tipo de cimento e da disponibilidade de umidade. Segundo Silva *et al.* (2023), concretos com alta relação água/cimento e ausência de adições minerais são mais suscetíveis ao ataque. Ambientes úmidos e solos contaminados com sulfatos solúveis aceleram a propagação da deterioração, especialmente em fundações, reservatórios e estações de esgoto.

Para mitigar os efeitos do ataque de sulfatos, recomenda-se a utilização de cimentos resistentes, como o cimento pozolânico ou com escória, além de adições minerais como metacaulim e sílica ativa. Outras estratégias incluem o uso de aditivos impermeabilizantes, controle da permeabilidade e adequação do cobrimento das armaduras. Conforme Ferreira *et al.* (2023), a prevenção começa no projeto e deve considerar as características do ambiente onde a estrutura será inserida. A figura 6, representa a degradação do concreto devido ao ataque de íons sulfatos.

Figura 6 : Degradação do concreto devido ao ataque de íons sulfatos



Fonte: Pecchio et al. (2006)

2.6.7 Formação da etringita

A etringita é um composto cristalino que se forma na matriz do concreto a partir da reação entre aluminatos do cimento, íons cálcio e sulfato, sendo normalmente

gerada durante a hidratação inicial do cimento. Em condições controladas, sua formação é desejável, pois contribui para o preenchimento de poros e aumento da resistência inicial. No entanto, em excesso ou quando formada tardiamente, pode provocar expansão e fissuração no concreto (Souza *et al.*, 2021).

A formação da etringita pode ser classificada como primária ou secundária. A etringita primária se desenvolve nas primeiras horas de hidratação e não representa risco à integridade da estrutura. Já a etringita secundária ou tardia ocorre após a pega do concreto, quando há redistribuição de sulfatos em ambientes úmidos, podendo gerar expansão interna significativa (Ferreira *et al.*, 2022). Essa expansão pode levar à diminuição da vida útil da estrutura devido à desagregação do concreto.

A presença de etringita tardia está associada a ambientes com elevada umidade, uso excessivo de sulfatos ou compostos presentes em adições minerais mal controladas. De acordo com Lima *et al.* (2023), esse fenômeno é particularmente crítico em estruturas expostas à água, como barragens, fundações e túneis. A microexpansão causada pela cristalização da etringita secundária forma tensões internas que resultam em microfissuras progressivas.

Para evitar a formação indesejada de etringita, recomenda-se o uso de cimentos com baixo teor de aluminatos e sulfatos, além de controle rigoroso da relação água/cimento e do processo de cura. Segundo Monteiro *et al.* (2023), o emprego de adições pozolânicas como metacaulim e escória pode ajudar a estabilizar os produtos de hidratação, diminuindo a mobilidade dos íons sulfato e a possibilidade de reações expansivas. A figura 7, representa a degradação devido a formação de etringita no interior do concreto.

Figura 7 : Degradação devido a formação de etringita no interior do concreto



Fonte: Desek (2017)

2.6.8 Formação da taumasita

A taumasita é um produto de degradação formado pela reação entre sulfatos, carbonatos e aluminatos em ambientes frios e úmidos, afetando a matriz cimentícia do concreto. Sua formação está associada ao ataque por sulfatos em temperaturas inferiores a 15 °C, levando à decomposição da fase C-S-H, responsável pela resistência do concreto (Silva *et al.*, 2021). A presença de taumasita resulta em perda de coesão, amolecimento da estrutura e redução significativa da resistência mecânica.

A taumasita pode ser classificada como parte do ataque por sulfato do tipo III, também conhecido como "ataque por sulfato com carbonatação", onde ocorre simultaneamente a reação com íons sulfato e carbonato. De acordo com Almeida *et al.* (2022), essa forma de degradação é rara em climas tropicais, mas pode surgir em estruturas subterrâneas, túneis e obras expostas a águas contaminadas com sulfatos em regiões frias ou mal ventiladas.

A prevenção da formação de taumasita envolve o uso de cimentos com baixo teor de aluminatos e sulfatos, controle da temperatura de cura e da exposição prolongada à umidade. Ferreira *et al.* (2023) recomendam o uso de adições pozolânicas, como metacaulim e escória de alto-forno, que ajudam a densificar a matriz do concreto e, desta forma, reduzir a penetração de agentes agressivos. A correta especificação de materiais e o entendimento das condições ambientais são fundamentais para evitar essa forma de ataque. A figura 8, mostra a degradação do concreto devido a formação da taumasita.

Figura 8 : Degradação do concreto devido a formação da taumasita



Fonte: Linhares (2019)

2.7 FISSURAS

Fissuras são manifestações que ocorrem com frequência em estruturas de concreto armado e indicam alterações de desempenho que podem evoluir para comprometimentos estruturais. Essas discontinuidades podem surgir por efeitos físicos, químicos ou mecânicos. Conforme Lopes *et al.* (2022), a presença de fissuras está associada a tensões internas que excedem a resistência à tração do concreto, principalmente nos primeiros dias após a concretagem.

A retração do concreto, seja autógena ou plástica, é um dos fatores principais na origem de fissuras superficiais. Em condições onde há baixa umidade relativa somada a altas temperaturas, pode ocorrer evaporação que leva ao aparecimento de microfissuras. Silva e Barros (2023) apontam que a ausência de cura adequada acelera esse processo, afetando diretamente a integridade superficial e a impermeabilidade do concreto.

Um outro fator que contribui de forma significativa para o surgimento de fissuras é o ataque químico por íons sulfatos (SO_4^{2-}). Quando os SO_4^{2-} penetram na matriz cimentícia, ocorrem reações com aluminatos, formando produtos expansivos como etringita secundária. Segundo Ferreira e Almeida (2022), essa expansão interna leva à abertura de fissuras, principalmente nas bordas e cantos das peças estruturais expostas a ambientes agressivos.

A corrosão das armaduras também atua como fator de geração de fissuras no concreto armado. A oxidação do aço promove o aumento de volume dos produtos de corrosão, provocando fissuras longitudinais paralelas às barras. De acordo com Dias *et al.* (2024), essas fissuras comprometem a aderência entre aço e concreto e facilitam a entrada de agentes agressivos, como cloretos e água, agravando o processo corrosivo.

As fissuras podem ser classificadas como passivas ou ativas, dependendo da estabilidade de sua abertura ao longo do tempo. Oliveira *et al.* (2022) destacam que fissuras ativas indicam movimentações ou reações em andamento, exigindo monitoramento e intervenções corretivas. Já fissuras passivas, mesmo estabilizadas, podem exigir tratamento por representarem caminhos preferenciais para agentes agressivos.

Associado ao mecanismo de atuação dos aditivos cristalizantes, destaca-se a capacidade desses sistemas em promover a autocatrização de microfissuras passivas, ou seja, aquelas que não sofrem movimentações ativas ao longo do tempo. Em particular, a formação de cristais insolúveis ao longo dos capilares permite o selamento eficaz de fissuras com aberturas de até 0,4 mm, valor limite estabelecido pela NBR 6118 (2014 para estruturas de concreto armado inseridas na Classe de Agressividade Ambiental I (ABNT, 2014). Essa propriedade é essencial para interromper a continuidade de novos caminhos de penetração da água, aumentando a durabilidade e a resistência da estrutura frente a processos de degradação

Frente a esse cenário, soluções inovadoras têm sido propostas, como o uso de aditivos cristalizantes que promovem a autocatrização do concreto. Rocha *et al.* (2023) mostram que esses aditivos reagem com a umidade, formando cristais que preenchem microfissuras e reduzem significativamente a permeabilidade do concreto, contribuindo para a longevidade de estruturas em ambientes agressivos.

2.7.1. Principais causas das fissurações

As fissuras em estruturas de concreto podem surgir por diferentes causas, sendo a retração do concreto uma das mais frequentes. A retração plástica se dá nas primeiras horas após a concretagem, enquanto a autógena está associada à hidratação do cimento em ambientes selados. Segundo Silva e Barros (2023), a ausência de cura adequada potencializa essas fissurações, especialmente em climas quentes.

Variações térmicas também contribuem significativamente para o surgimento de fissuras, especialmente em estruturas expostas ao sol. A dilatação e contração diferencial entre diferentes partes da estrutura geram tensões internas que podem romper o concreto, como observado por Lopes *et al.* (2022), sendo mais crítico em juntas mal posicionadas ou ausência de armaduras de controle.

As sobrecargas, deformações estruturais e recalques diferenciais são causas mecânicas importantes. Quando a carga excede a capacidade da seção ou ocorre deslocamento da fundação, surgem fissuras localizadas. Oliveira *et al.* (2022) afirmam

que esse tipo de fissuração deve ser analisado com atenção por indicar possível comprometimento estrutural.

Um outro fator determinante é a corrosão das armaduras. De acordo com Dias *et al.* (2024), a formação de produtos de corrosão expande o volume do aço, gerando pressões internas no concreto e provocando fissuras longitudinais. Esse processo costuma ser lento, mas contínuo, e compromete a durabilidade e a segurança da estrutura.

Por fim, o ataque químico de agentes externos, como sulfatos e cloretos, também é causa relevante. Ferreira e Almeida (2022) destacam que essas reações químicas formam produtos expansivos no interior do concreto, gerando tensões que se manifestam como fissuras, principalmente em regiões expostas à umidade constante e materiais agressivos.

2.7.2 Fissuras ocasionadas devido ao ataque de agentes químicos

O concreto armado, embora resistente à compressão, é vulnerável a certos agentes químicos que comprometem sua durabilidade. Entre os mecanismos de degradação, o ataque por sulfatos é um dos mais agressivos, promovendo fissuração interna progressiva. De acordo com Ferreira e Almeida (2022), a penetração de íons sulfato na matriz cimentícia resulta na formação de compostos expansivos, como etringita e gipsita, que causam tensões internas e fissuras.

Essas fissuras apresentam, geralmente, padrões irregulares e surgem a partir das bordas ou superfícies mais expostas à umidade. Lopes *et al.* (2022) explicam que esse tipo de manifestação patológica está relacionado à presença contínua de umidade e à reatividade dos aluminatos do cimento com os sulfatos. Esse processo é lento e contínuo, podendo comprometer gravemente a integridade estrutural.

Além dos sulfatos, outros agentes químicos, como cloretos e ácidos, também são responsáveis por processos de degradação com fissuração associada. Cloretos aceleram a corrosão das armaduras, enquanto ácidos dissolvem componentes da matriz cimentícia. Segundo Dias *et al.* (2024), os produtos dessas reações alteram o pH do concreto e favorecem a decomposição do gel C-S-H, responsável pela coesão estrutural.

A literatura recente indica que fissuras causadas por agentes químicos são classificadas como ativas e tendem a evoluir ao longo do tempo se não tratadas. Silva e Barros (2023) ressaltam que, além da abertura visível, essas fissuras aumentam a permeabilidade do concreto, facilitando ainda mais a penetração de agentes deletérios e criando um ciclo de degradação progressiva.

Ambientes como estações de esgoto, áreas industriais e regiões costeiras são especialmente suscetíveis ao ataque químico. Rocha *et al.* (2023) destacam que a escolha inadequada dos materiais, como o uso de cimentos não resistentes a sulfatos, agrava ainda mais o quadro. Sendo assim, a prevenção em conjunto com o monitoramento são essenciais para reduzir os danos causados por esse tipo de mecanismo.

2.8 PREVENÇÃO E CONTROLE DAS FISSURAS

A prevenção das fissuras provocadas por sulfatos começa pela escolha adequada dos materiais. Neste caso, uma das estratégias é o uso de cimentos resistentes a sulfatos, que apresentam baixos teores de aluminato tricálcico (C_3A), minimizando a formação de etringita expansiva. Segundo Ferreira e Almeida (2022), o CP-RS (Cimento Portland Resistente a Sulfatos) é recomendado para obras em solos e águas sulfatadas.

Outro ponto fundamental é o controle da permeabilidade do concreto. A redução da relação água/cimento, o uso de adições minerais como sílica ativa e pozolanas, e a aplicação de aditivos impermeabilizantes contribuem para limitar a penetração de sulfatos. De acordo com Rocha *et al.* (2023), concretos mais densos e duráveis retardam o início do processo de fissuração química.

A incorporação de aditivos cristalizantes é uma solução inovadora que vem se destacando em pesquisas recentes. Esses aditivos promovem a autocicatrização do concreto ao reagirem com a umidade, formando, assim, cristais insolúveis que acabam por obstruir as microfissuras e os poros. Lopes *et al.* (2022) relatam que essa tecnologia pode reduzir significativamente a progressão de fissuras e melhorar o desempenho em ambientes agressivos.

No caso de estruturas já afetadas, o tratamento das fissuras exige diagnóstico preciso e soluções compatíveis. Entre os métodos empregados estão a injeção de resinas epóxi, o recobrimento com argamassas poliméricas e o uso de barreiras químicas. Dias *et al.* (2024) reforçam que o sucesso do reparo depende da interrupção da ação dos sulfatos e da restauração da impermeabilidade.

Além dos métodos materiais, medidas construtivas preventivas também são importantes. A adequada execução da cura, o dimensionamento correto do cobrimento das armaduras e a proteção das superfícies expostas são ações essenciais. Silva e Barros (2023) afirmam que o controle ambiental e construtivo é tão importante quanto a formulação do concreto.

2.9 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

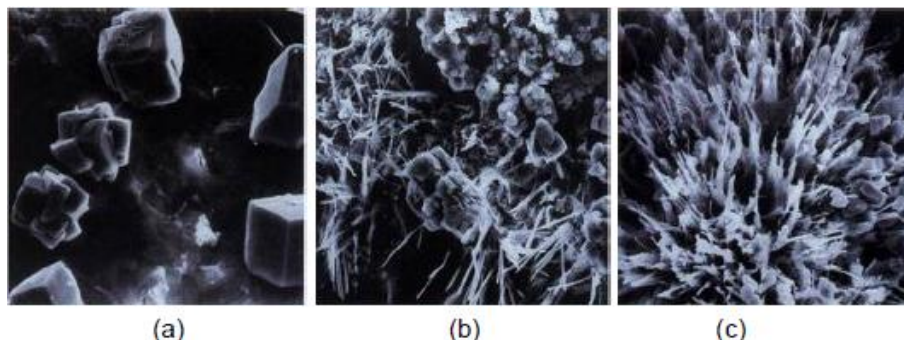
A autocicatrização do concreto é uma tecnologia emergente que visa restaurar a integridade de estruturas fissuradas por meio de processos naturais ou induzidos. O fenômeno consiste na capacidade do concreto de fechar fissuras sem intervenção externa, principalmente em microaberturas com até 0,3 mm. Segundo Rocha *et al.* (2023), os mecanismos naturais envolvem a continuação da hidratação de partículas de cimento não reagidas e a carbonatação do hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia.

Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007) determinaram que o tratamento por cristalização é um processo físico-químico em que os ingredientes ativos do aditivo cristalizante reagem de forma catalítica com os subprodutos da hidratação do cimento. Essas reações são totalmente compatíveis com o ambiente alcalino do concreto e promovem a formação de cristais insolúveis e não tóxicos, os quais se propagam por capilaridade em profundidades mínimas de 50 mm na estrutura. Esse processo resulta na obstrução dos poros capilares, impedindo a penetração de água, mesmo sob pressões hidrostáticas positivas e negativas de até 0,7 MPa, a figura 9, representa a formação dos cristais no interior do concreto.

Para potencializar esse processo, diversos estudos têm explorado o uso de aditivos cristalizantes e cápsulas com agentes selantes. Lopes *et al.* (2022) demonstraram que a adição de compostos cristalizantes pode aumentar a

durabilidade do concreto em ambientes com presença de íons sulfato e cloretos, reduzindo a permeabilidade e a necessidade de manutenções corretivas.

Figura 9: Formação dos cristais no interior do concreto



(a) Concreto não tratado; (b) Início da formação dos cristais; (c) Cristalização final.

Fonte: Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007)

A incorporação de aditivos cristalizantes ao concreto tem se destacado como uma solução eficiente para aumento da durabilidade, especialmente em estruturas expostas a ambientes agressivos. Esses aditivos contêm compostos químicos que, em contato com a umidade, reagem com os subprodutos da hidratação do cimento, formando, desta forma, cristais insolúveis que obstruem poros e microfissuras. Esse mecanismo reduz a permeabilidade e dificulta a entrada de agentes agressivos, como íons sulfato e cloreto, contribuindo para a preservação das propriedades mecânicas ao longo do tempo (Lee *et al.*, 2020).

Além da redução da permeabilidade, os aditivos cristalizantes favorecem a autocicatrização do concreto, permitindo o selamento autônomo de fissuras passivas. O processo é reativado sempre que há nova presença de água, promovendo o preenchimento de aberturas com cristais secundários. Estudos demonstram que esse mecanismo é eficaz para fissuras com até 0,4 mm de largura, sem necessidade de intervenção externa (Sisomphon *et al.*, 2021). Essa tecnologia contribui para estruturas mais duráveis, com menor demanda por manutenção ao longo da vida útil.

Além de melhorar o desempenho estrutural, a autocicatrização contribui para a sustentabilidade das construções ao reduzir o consumo de recursos para reparo. Ferreira e Almeida (2022) ressaltam que essa abordagem é especialmente útil em estruturas de difícil acesso ou submetidas a ambientes agressivos, como túneis, fundações e estações de tratamento. Embora ainda em desenvolvimento, essa

tecnologia mostra-se promissora para aumentar a vida útil das estruturas e reduzir custos com manutenção.

2.9.1 Processo da autocicatrização anterior a adoção de aditivos cristalizantes

Antes do desenvolvimento e aplicação de aditivos cristalizantes, a autocicatrização do concreto era atribuída principalmente a processos naturais e autógenos, relacionados à continuidade das reações de hidratação do cimento. Em concretos com elevado teor de cimento e relação água/cimento adequada, o material mantinha certo potencial de reagir com a água disponível em microfissuras, promovendo o preenchimento gradual por novos produtos de hidratação, especialmente o gel de C-S-H (Neville, 2013).

Esse processo natural, conhecido como autocura autógena, era mais evidente em ambientes com umidade constante ou imersão em água, pois a presença de umidade era essencial para reativar reações químicas latentes no interior da matriz cimentícia. A formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), por carbonatação do hidróxido de cálcio presente nos poros, também era um dos mecanismos observados, ajudando a selar fissuras de até 0,1 mm (Huang *et al.*, 2014).

Entretanto, esses mecanismos naturais apresentavam eficácia limitada, sendo dependentes de fatores como temperatura, disponibilidade de água, tempo de cura e composição do concreto. Além disso, a autocicatrização natural era mais efetiva apenas em microfissuras, com pouca capacidade de recuperação em fissuras acima de 0,2 mm. Por isso, seu uso prático como estratégia de durabilidade era restrito, motivando a busca por soluções mais eficientes e controláveis, como o uso de aditivos cristalizantes, cápsulas poliméricas e bactérias autônomas (Snoeck; De Belie, 2015).

2.9.2 Diferentes técnicas de autocicatrização do concreto

A autocicatrização do concreto tem ganhado destaque com o uso de bactérias calcificantes capazes de precipitar carbonato de cálcio, fechando fissuras de forma eficiente. Essas bactérias, principalmente do gênero *bacillus*, são encapsuladas para garantir sua viabilidade e ativadas na presença de umidade, promovendo a formação de calcita que restaura a integridade do material (Lee *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2023).

Outra técnica inovadora envolve microcápsulas que liberam agentes curativos como polímeros e resinas quando ocorrem fissuras. A liberação controlada desses agentes permite o fechamento autônomo das fissuras, sem necessidade de manutenção externa, aumentando a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto (Chen *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022).

Além disso, a incorporação de fibras sintéticas e naturais tem sido combinada com aditivos químicos que estimulam a formação de produtos hidratados adicionais, melhorando a resistência e a capacidade de autocicatrização do concreto. Fibras como polipropileno e fibras de celulose ajudam a controlar a abertura das fissuras, enquanto os aditivos reagem com a umidade para preencher as fissuras (Martínez *et al.*, 2021; Zhang; Li, 2023).

Por fim, o uso de materiais cristalinos expansivos e polímeros com capacidade de absorção de água tem se mostrado eficaz na autocicatrização, pois estes materiais se expandem ao contato com a umidade, preenchendo as fissuras e prevenindo a infiltração de agentes agressivos. Essa estratégia tem sido aplicada em diferentes tipos de concretos para aumentar sua durabilidade em ambientes agressivos (Kumar *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2022).

2.9.3 Avaliação da autocicatrização do concreto

A avaliação da autocicatrização em concretos tem sido objeto de diversos estudos experimentais, especialmente nos últimos anos, impulsionada pelo avanço dos aditivos cristalizantes e pelas exigências de durabilidade em estruturas. Os métodos mais empregados envolvem a indução controlada de fissuras, seguida pelo monitoramento do fechamento ao longo do tempo, normalmente sob condições de umidade constante ou imersão em água (Wiktor; Jonkers, 2011).

Para garantir reprodutibilidade, as fissuras são frequentemente induzidas por flexão em três pontos ou tração direta, com largura inicial controlada entre 0,1 mm e 0,4 mm, que corresponde aos limites aceitos por normas como a ABNT NBR 6118:2014. A medição da fissura é feita por meio de microscopia óptica, câmeras digitais de alta resolução ou mesmo sistemas de imageamento por software, que permitem avaliar o grau de fechamento ao longo do tempo (Roig-Flores *et al.*, 2015).

Além da inspeção visual, muitos estudos utilizam ensaios de permeabilidade para verificar a restauração da estanqueidade do concreto. Testes como o de absorção capilar, índice de permeabilidade ao gás ou passagem de água sob pressão são aplicados antes e depois do período de cicatrização, a fim de quantificar a eficiência da vedação proporcionada pela autocura (Alghamri *et al.*, 2016).

Outro método importante é a análise microestrutural, geralmente feita por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) ou EDX (Espectroscopia de Dispersão de Energia). Esses métodos permitem identificar os produtos formados nas fissuras após a cicatrização, como C-S-H, carbonato de cálcio ou cristais de aditivos cristalizantes. A formação e crescimento desses produtos são fundamentais para validar o mecanismo de autocicatrização (Snoeck *et al.*, 2014).

Algumas pesquisas também incorporam ensaios mecânicos complementares, como compressão axial ou tração indireta, realizados antes e após o processo de cicatrização, para avaliar eventuais ganhos ou perdas nas propriedades mecânicas do concreto. Tais ensaios são relevantes para aplicações estruturais onde a integridade mecânica precisa ser garantida, mesmo após a ocorrência de fissuras (Qureshi *et al.*, 2019).

2.9.4 Aditivos cristalizantes

Compostos químicos, adicionados ao concreto com a finalidade de reduzir sua permeabilidade por meio da formação de cristais insolúveis nos poros capilares são denominados de aditivos cristalizantes. Esses cristais se desenvolvem em contato com a umidade, bloqueando a passagem da água e aumentando a durabilidade do concreto. De acordo com Souza *et al.* (2021), esses aditivos são especialmente eficazes em ambientes sujeitos à ação de agentes agressivos, como estruturas enterradas ou expostas à umidade constante.

Pesquisas recentes apontam que os aditivos cristalizantes (CAs) são formulações complexas compostas por silicatos solúveis Na_2SiO_3 ou K_2SiO_3 (silicato de sódio ou potássio), agentes metálicos alcalinos (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}), catalisadores e aditivos orgânicos ou inorgânicos com formulações protegidas por patente. Esses componentes reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) da matriz do concreto,

formando produtos cristalinos insolúveis, como C-S-H (silicato de cálcio hidratado), portlandita e outros compostos secundários que atuam como selantes internos (Li *et al.*, 202; Oliveira *et al.*, 2021).

Esses aditivos são classificados como aditivos hidrofílicos, pois atuam internamente na matriz cimentícia sem formar barreiras superficiais. Existem dois principais tipos, os aditivos de pós-secura, aplicados como revestimento superficial, e os aditivos incorporados na mistura. Segundo Lima *et al.* (2022), o uso interno é o mais eficiente para estruturas sujeitas a pressões hidrostáticas negativas, como túneis, fundações e tanques de contenção.

Estudos recentes apontam que, além da impermeabilização, os aditivos cristalizantes também contribuem para a autocicatrização do concreto. Em presença de fissuras ativas e umidade, os componentes do aditivo reagem com os compostos da hidratação do cimento e com a água infiltrada, promovendo a formação de novos cristais que selam as fissuras. De acordo com Ferreira *et al.* (2023), isso melhora a resistência à penetração de íons deletérios, como cloretos e sulfatos.

O desempenho desses aditivos está diretamente relacionado à correta dosagem, ao teor de umidade disponível e à compatibilidade com os demais materiais da mistura. Monteiro *et al.* (2023) destacam que a eficiência do aditivo cristalizante pode variar conforme o tipo de cimento e as condições ambientais. Assim, sua aplicação deve ser acompanhada por critérios técnicos rigorosos para garantir o desempenho desejado em longo prazo.

Pesquisas sugerem e apontam que dosagens entre 1% e 2% em massa de cimento são adequadas para melhorar significativamente as propriedades do concreto. Antón e Gurdíán (2024) relataram aumento de até 5% na resistência à compressão em concretos com 1% de aditivo cristalizante. Além disso, Ghalehnovi *et al.* (2020) verificaram uma redução significativa na permeabilidade de até 90% quando comparado ao concreto de referência, com permeabilidade hidráulica reduzida de $6,4 \times 10^{-12}$ m/s para $0,5 \times 10^{-12}$ m/s.

A literatura aponta que os aditivos cristalizantes contribuem significativamente para o aumento da resistência do concreto ao ataque por sulfatos, devido à sua ação na obstrução dos poros e na limitação da penetração dos íons agressivos (Ghalehnovi *et al.*, 2021). Segundo os estudos de Zhang *et al.* (2019), concretos com aditivos

cristalizantes apresentaram menor perda de massa e menor redução de resistência após ciclos de imersão em soluções sulfatadas, quando comparados a concretos convencionais.

O desempenho dos aditivos cristalizantes em ambientes agressivos, como os contaminados com íons sulfato, tem sido amplamente investigado. Zhang *et al.* (2023) observaram que concretos com cristalizantes tem menor perda de massa, menor profundidade de carbonatação e menor degradação química quando expostos a soluções sulfatadas, em comparação com concretos convencionais. Estudos complementares demonstraram que a combinação de aditivos cristalizantes com adições minerais, como sílica ativa, potencializa ainda mais a resistência à penetração de agentes agressivos (Sideris *et al.*, 2023).

2.9.4.1 Tipos de cristalizantes

Quanto ao tipo os aditivos cristalizantes estão clasificados como, cristalizante de massa, cristalizantes superficiais e os cristalizantes híbridos. Os cristalizantes de massa incorporados diretamente na mistura, onde a formação contínua de cristais insolúveis de sílica ou silicato de cálcio hidratado (C-S-H) promove o fechamento de poros e microfissuras. Santos *et al.* (2021) indica que esses aditivos podem reduzir a permeabilidade do concreto em mais de 70% após 56 dias de cura, mesmo sob exposição contínua à umidade.

Os cristalizantes superficiais são aplicados sobre o concreto já endurecido, esses produtos penetram por difusão nos poros superficiais, onde iniciam a formação de cristais. Segundo Costa *et al.* (2023), embora sua capacidade de penetração seja limitada em relação aos cristalizantes de massa, eles são úteis como complemento em obras existentes ou como camada de proteção adicional contra a entrada de agentes agressivos em reservatórios, lajes de cobertura e túneis.

Os cristalizantes híbridos podem ser adicionados diretamente na mistura ou mesmo aplicados da superfície externa do concreto como revestimento. Oliveira e Mendes (2023) destacam que esses aditivos híbridos têm mostrado desempenho superior em termos de durabilidade e tempo de ação, com evidência de cicatrização de fissuras de até 0,4 mm em ambientes saturados.

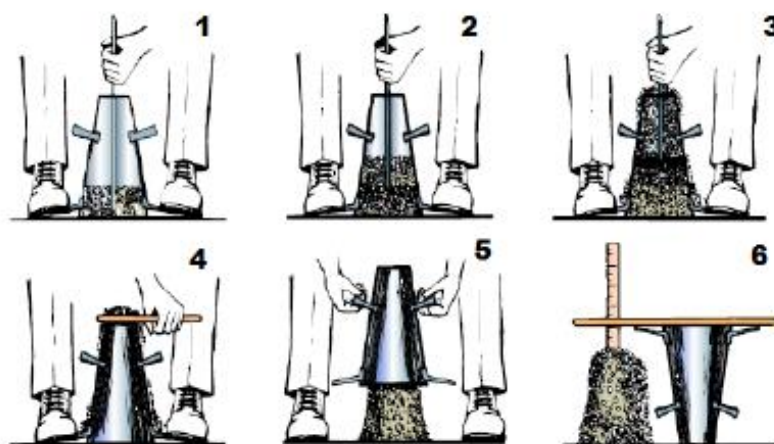
2.10 ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE “SLUMP TEST”

O *slump test* ou ensaio de abatimento do tronco de cone, é muito utilizado para determinar a consistência e a trabalhabilidade do concreto fresco. O procedimento consiste no preenchimento de um molde metálico em forma de cone truncado com concreto, seguido da sua retirada vertical e imediata. A diferença de altura entre o molde e o concreto abatido indica sua consistência (ABNT NBR NM 67, 1998; Silva *et al.*, 2022).

Esse método simples e rápido permite avaliar, de forma indireta, a fluidez do concreto no momento da aplicação, sendo especialmente útil em campo. A trabalhabilidade medida está relacionada à mobilidade, coesão e capacidade de adensamento do concreto sem segregação. Valores fora do padrão indicam necessidade de ajustes na dosagem, principalmente na relação água/cimento (Costa *et al.*, 2023).

O resultado do *slump test* pode ser classificado como colapsado, verdadeiro, cônico ou seco, conforme o comportamento do concreto após a retirada do molde. Ensaios com abatimento excessivo ou ausência de forma definida podem indicar mistura inadequada ou inconsistência nos materiais. Esse controle é crucial para a qualidade das estruturas, sobretudo em concretos especiais ou autocicatrizantes (Ferreira; Lima, 2022). A figura 10 ilustra as etapas necessárias para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Figura 10: Etapas do ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Site clube do concreto (2013)

No contexto de concretos com aditivos cristalizantes, o *slump test* continua sendo essencial para garantir a consistência desejada. A presença desses aditivos pode alterar a reologia da mistura, fazendo com que ajustes técnicos, se façam necessários, para manter a trabalhabilidade adequada sem comprometer a eficiência da autocicatrização (Andrade *et al.*, 2023).

2.11 ENSAIO DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Este ensaio é um dos mais importantes testes realizados em concreto, sendo fundamental para avaliar a resistência mecânica do material. Realizado de acordo com a NBR 5739:2018, o método consiste em submeter corpos de prova cilíndricos, normalmente com dimensões de 10x20 cm, à aplicação de carga axial crescente até a ruptura (ABNT, 2018). Desta forma, é possível determinar a resistência característica do concreto, servindo como parâmetro de controle da qualidade nas fases de projeto e execução. A resistência obtida é influenciada por diversos fatores, como a relação água/cimento, o tipo de cimento, o tempo de cura e o uso de aditivos ou adições minerais (Lima *et al.*, 2022).

Pesquisas recentes mostram que, além de ser um indicador de desempenho estrutural, a resistência à compressão está diretamente relacionada à durabilidade do concreto, especialmente em ambientes agressivos. Concretos com aditivos autocicatrizantes, por exemplo, apresentam variações no ganho de resistência ao longo do tempo, devido à formação contínua de produtos de hidratação (Melo *et al.*, 2023).

O controle do processo de moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova é essencial para a precisão dos resultados. Segundo Costa *et al.* (2022), negligências na preparação podem levar a variações significativas nos valores obtidos, prejudicando a confiabilidade do ensaio como ferramenta de avaliação da resistência real da estrutura. Além de sua função em projetos e obras correntes, o ensaio de compressão é, também, utilizado em estudos de desempenho de novos materiais, como concretos com materiais reciclados, fibras ou compostos cristalizantes. Essa versatilidade reforça sua relevância na caracterização e inovação dos materiais cimentícios (Ferreira; Andrade, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

Foi utilizada uma dosagem de 350 kg/m³ de cimento Portland do tipo CP III para a confecção dos corpos de prova. O cimento adotado apresenta massa específica de 3110 kg/m³, atendendo aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2020 - Cimento Portland (Requisitos), garantindo uma matriz cimentícia homogênea e com desempenho adequado para a avaliação das propriedades mecânicas e do comportamento frente ao ataque de agentes agressivos.

O CP III é um cimento com adição de escória granulada de alto-forno em proporções elevadas, sendo indicado para estruturas expostas a meios agressivos, devido à sua baixa permeabilidade e menor calor de hidratação. Essas características tornam o CP III particularmente adequado para estudos relacionados à aut cicatrização e resistência a sulfatos, como no escopo desta pesquisa.

A tabela 2 apresenta a composição química e as propriedades físicas do cimento CP III, utilizado nos ensaios. Os dados foram fundamentais para o entendimento do desempenho do concreto frente às condições experimentais propostas.

Tabela 2 - Composição química e propriedades físicas do cimento CP III

Clínquer+sulfatos de cálcio		Escória granulada de alto-forno			Material Pozolânico	Material Carbonático			
25-65		35-75			0	0-10			
Classe	Resistencia a compressão				Finura	Tempo de pega		Expansibilidade	
	MPA 3 dias	MPA 7 dias	MPA 28 dias	MPA 91 dias	Resíduo na peneira 75 µm	início (min)	Fim (min)	À frio (mm)	À quente (mm)
32	≥ 10	≥ 20	≥ 32	≥ 40	≤ 8	≥ 60	≤ 720	≤ 5	≤ 5
40	≥ 12	≥ 23	≥ 40	≥ 48	≤ 8	≥ 60	≤ 720	≤ 5	≤ 5

Fonte: CSN, 2024

3.1.2 Agregados

Os agregados miúdos utilizados na mistura foram peneirados e dosados na proporção de 700 kg/m³, consistindo em areia média com graduação contínua, conforme especificado pela ABNT NBR 17054:2022 – Agregados para concreto de cimento Portland. A seleção da granulometria adequada foi essencial para garantir boa distribuição dos vazios e contribuir para a coesão da mistura.

Já os agregados graúdos foram utilizados na proporção de 1700 kg/m³, sendo previamente separados e classificados por peneiramento com malha de 19 mm, em conformidade com os critérios da mesma norma. O material foi classificado como brita 1, com granulometria máxima de 19 mm, o que proporcionou compacidade adequada e trabalhabilidade satisfatória ao concreto durante o adensamento e moldagem dos corpos de prova.

A escolha e controle da granulometria dos agregados visaram assegurar uma melhor homogeneização da mistura, reduzindo o volume de vazios e otimizando o consumo de pasta de cimento, fatores que influenciam diretamente no desempenho mecânico e na durabilidade do concreto.

3.1.3 Água

A água utilizada na manufatura dos corpos de prova e nos ensaios de permeabilidade seguiu as exigências da ABNT NBR 15900-1:2009, que estabelece os critérios mínimos de qualidade para a água de amassamento de concretos. Utilizou-se água isenta de impurezas pudessem interferir negativamente nas reações de hidratação do cimento ou comprometer o desempenho dos aditivos cristalizantes incorporados à mistura.

Para o traço desenvolvido nesta pesquisa, foi utilizada a proporção de 175 litros de água por metro cúbico de concreto (175 l/m³), valor compatível com a relação água/cimento (a/c) de 0,50, considerada usual para concretos de uso estrutural de classe média de resistência. De acordo com a ABNT NBR 12655:2015, os valores típicos de água de amassamento para concretos convencionais variam entre 130 e

210 l/m³, dependendo da trabalhabilidade desejada e da granulometria dos agregados.

A manutenção da quantidade adequada de água foi fundamental para garantir boa trabalhabilidade, facilitar o adensamento e evitar segregação durante o processo de moldagem dos corpos de prova. Além disso, foi essencial para assegurar o desenvolvimento adequado das reações de hidratação, contribuindo diretamente para a resistência mecânica e durabilidade do concreto endurecido.

3.1.4 Aditivos cristalizantes

Foram incorporados à mistura dois aditivos distintos (x e y), ambos com propriedades voltadas à autocicatrização do concreto. Os produtos, fornecidos por fabricantes diferentes sob cláusula de confidencialidade, não tiveram suas identidades comerciais divulgadas. Cada aditivo foi incorporado na proporção de 1,5% em massa em relação ao conteúdo de cimento.

Esses aditivos atuam por meio de reações químicas desencadeadas pela presença de umidade na matriz cimentícia, promovendo a formação de cristais insolúveis de sílica hidratada e outros compostos secundários que se precipitam em microfissuras e poros capilares. Esse processo reduz significativamente a permeabilidade do concreto, bloqueando caminhos preferenciais para a penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e sulfato, o que contribui para a estanqueidade e a durabilidade da estrutura (Metha; Monteiro, 2014).

Trata-se de um mecanismo autônomo e contínuo, reativado a cada novo ciclo de reumidificação. Assim, caracteriza-se como um tipo de autocicatrização induzida, ativada pela ação de aditivos cristalizantes, conforme já observado em estudos experimentais com cimentos nacionais (Takagi, 2013).

3.1.5 Sulfato de sódio (Na₂SO₄)

Com o objetivo de simular o ataque por íons sulfato (SO₄²⁻), os corpos de prova foram, então, imersos em uma solução contendo 5% em massa de sulfato de sódio (Na₂SO₄) em água, concentração definida com base em estudos que visam acelerar

os mecanismos de degradação química do concreto. Essa exposição foi empregada para representar ambientes de elevada agressividade, como solos contaminados e efluentes industriais, nos quais a presença de íons sulfato (SO_4^{2-}) é significativa. A concentração adotada tem por finalidade intensificar os efeitos deletérios ao longo do tempo, permitindo a avaliação comparativa da resistência mecânica e da capacidade de aut cicatrização das amostras, especialmente na presença de aditivos cristalizantes.

3.1.6 Moldes para corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em formas cilíndricas de PVC rígido, com dimensões padronizadas de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, conforme as especificações da norma ABNT NBR 5739:2018, que trata do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto. Essas dimensões são amplamente adotadas em estudos experimentais por permitirem a obtenção de resultados confiáveis, com boa reprodutibilidade e representatividade do comportamento mecânico do concreto (Metha; Monteiro, 2014; Souza; Ripper, 1998).

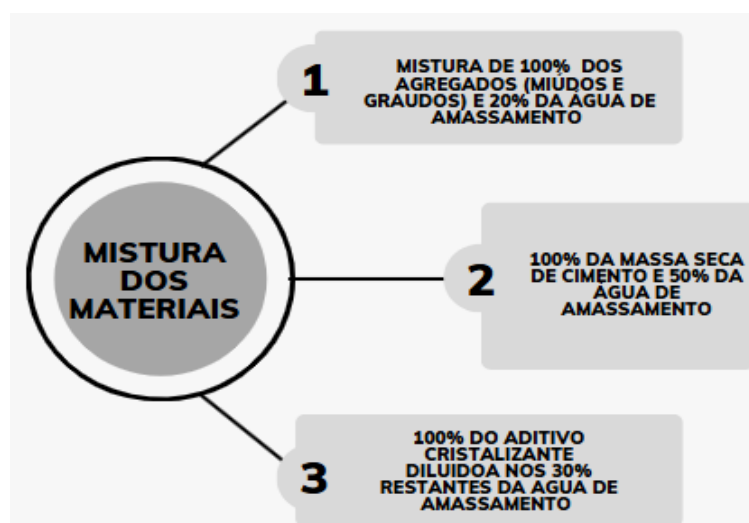
3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparo dos traços de concreto

Inicialmente, todos os materiais foram separados e mantidos em local seco, à uma temperatura ambiente, por 24 horas antes da mistura. Com o objetivo de se obter um concreto com a resistência e qualidade adequada, foram utilizados os métodos de dosagem do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT) e do American Concrete Institute (ACI). A relação água/cimento foi parametrizada conforme as indicações da ABNT NBR 6118:2014, fixando para a classe de agressividade III como menor ou igual a 0,55 para o concreto armado. Foi definido a relação água/cimento 0,50 para um fck estimado de 30 Mpa aos 28 dias, conforme definida pela ABNT NBR 12655:2021. Foram preparados materiais com diferentes proporções para a produção do concreto. Foi produzida uma amostra de referência, sem a adição de aditivo ou solução química, e dois traços com adição de cristalizante, porém com produtos diferentes (Amostra 1 e Amostra 2). A proporção de aditivo foi a recomendada pelos

fabricantes, sendo 1,5% em massa de cimento. Foram realizados traços para ensaios em duas condições, com e sem a exposição ao sulfato, totalizando 110 corpos de prova, disponibilizando 90 corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão e 20 corpos de prova para o teste de vazão no equipamento patenteado. A figura 11 representa o processo de mistura utilizado para a realização dos traços de concreto.

Figura 11: Processo da mistura de concreto



Fonte: Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007)

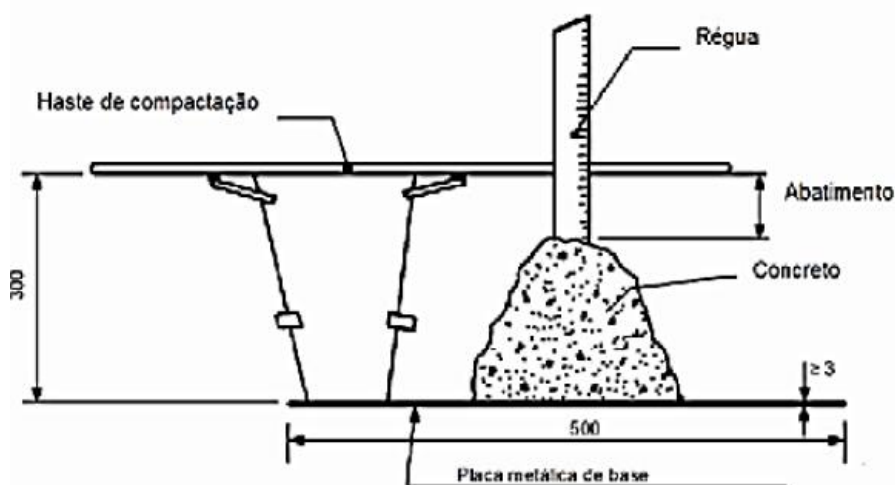
A mistura dos materiais foi realizada mecanicamente com betoneira da marca Menegotti, modelo prime 250 litros monofásico 1cv, adicionando os materiais secos: o cimento (CP III), os agregados miúdo e graúdo e homogeneizando-os por um minuto. Posteriormente, com o misturador em funcionamento, foi introduzida gradualmente a água na mistura. Para cada traço experimental, o aditivo correspondente foi adicionado, sendo dissolvido previamente em parte da água de amassamento, conforme orientação do fabricante. O tempo padronizado de mistura foi cinco minutos contados a partir do contato da água com o cimento, garantindo assim uma boa homogeneização e controle das propriedades mecânicas do concreto. Após a obtenção mistura homogênea, a trabalhabilidade do concreto fresco de cada traço foi avaliada imediatamente por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), seguindo os padrões da ABNT NBR 16889:2020, e sendo posteriormente realizado a moldagem dos corpos de prova conforme preconiza a ABNT NBR 5738:2015.

3.2.2 Ensaio de abatimento e moldagem dos corpos de prova

O ensaio de abatimento (*slump test*), foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 16889:2020 (ABNT), com o objetivo de verificar a facilidade ou dificuldade de se moldar um concreto fresco, ou seja, a consistência deste material. O molde tronco - cônico foi preenchido em três camadas com volume de concreto aproximadamente igual, sendo adensadas com 25 golpes cada camada, e em seguida cuidadosamente retirado o molde na vertical, permitindo o abatimento natural do concreto. Em seguida foi medida com régua milimetrada a diferença entre a altura original do molde e a altura final do concreto abatido, sendo assim registrada como o valor do "*slump*", cujo objetivo foi a verificação da trabalhabilidade do concreto. O ensaio foi utilizado para verificar a influência da relação água /cimento de 0,50, garantindo assim uma boa trabalhabilidade do concreto sem comprometer a resistência e a eficácia dos aditivos cristalizantes.

Após o ensaio de abatimento do tronco de cone, ou "*slump test*", a mistura foi colocada em moldes cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, em três camadas, e adensadas manualmente com haste metálica de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2015. Estes corpos de prova, foram então, armazenados em ambiente com alto teor de umidade por 24 horas e, posteriormente, transferidos para tanque de cura com temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) por um período de 28 dias. A figura 12 ilustra o teste de abatimento do tronco de cone "*slump*".

Figura 12: Ensaio de abatimento do tronco de cone – "*Slump*".



Fonte: ABNT NBR 16889:2020

3.2.3 Cura dos corpos de prova

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nas formas por 24 horas em ambiente protegido, à temperatura média de 23 ± 2 °C, conforme os parâmetros da norma ABNT NBR 5738:2015. Em seguida, foram submetidos a dois diferentes procedimentos de cura, de acordo com a finalidade do experimento, onde os corpos de prova não expostos ao meio sulfatado foram submetidos a uma cura úmida convencional, ou seja, foram imersos em tanques em solução saturada de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) e mantidos a temperatura controlada para assegurar as condições ideais de hidratação contínua e completa do cimento. Os corpos de prova designados para análise de resistência ao ataque de sulfatos foram submetidos a uma cura sob exposição química, ou seja, após o período inicial de cura foram transferidos para um tanque contendo solução aquosa de Na_2SO_4 (sulfato de sódio) na proporção de 5% em massa, simulando um ambiente agressivo. Essa solução foi periodicamente renovada para manter a concentração constante, assegurando a exposição do concreto ao agente agressivo.

Durante o período de cura, os corpos de prova foram devidamente identificados e organizados por traço, tipo de aditivo e tempo de exposição. A cura foi mantida até as idades de ensaio previstas (7, 14, 28, 56 e 90 dias), respeitando as condições específicas de cada grupo experimental. Este controle rigoroso no processo de cura foi fundamental para a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo avaliar com precisão os efeitos da autocicatrização induzida por aditivos cristalizantes, bem como o impacto da exposição ao ataque químico por sulfatos na resistência mecânica do concreto.

3.2.4 Ensaio de resistência a compressão axial

Com o objetivo de verificar o impacto da incorporação de aditivos cristalizantes sobre a resistência mecânica do concreto, foram realizados ensaios de compressão axial conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5739:2018. Os ensaios de compressão axial foram conduzidos no laboratório da UNIFOA, utilizando uma prensa hidráulica Qualit Service, modelo YIMC114-7, número de série YIMIC114-7/zh/0257, com capacidade de 1000 kN com controle automatizado da taxa de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa.

Foram produzidos 03 (três) corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro por 200 mm de altura) para as diferentes condições de exposição aos sulfatos e tempo de cura. Os ensaios foram realizados em dois grupos distintos de amostras, sendo o primeiro grupo, mantido em condições de cura convencional, sem exposição aos íons SO_4^{2-} e o segundo grupo, exposto a uma solução com 5% em massa de Na_2SO_4 , simulando um ambiente quimicamente agressivo. Os pratos de compressão do equipamento foram limpos e nivelados, e com o corpo de prova posicionado de forma centralizada foi aplicado uma carga de forma contínua até a sua ruptura, registrando a sua carga máxima suportada. A figura 13 apresenta a prensa hidráulica usada para a nos ensaios de compressão dos corpos de prova.

Figura 13: Prensa hidráulica usada para a realização dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para avaliar a resistência à fissuração dos corpos de prova de concreto, foram realizados testes de resistência à tração por compressão diametral com a finalidade de avaliar a eficiência do processo da autocatrização do concreto e fechamento espontâneo das fissuras durante a pesquisa.

Inicialmente, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos à compressão em duas linhas opostas de sua superfície lateral, promovendo um estado de tração ao longo do seu diâmetro vertical. Nesta situação, a ruptura ocorre quando a tensão de tração gerada na região central excede a capacidade do concreto, geralmente

resultando em uma fissura única, longitudinal e bem definida. A figura 14 apresenta a formação de fissuras após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral no corpo de prova. Neste trabalho foram utilizados 03 (três) corpos de prova para a realização dos ensaios para cada tempo de cura (1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 e 90 dias) em duas condições: com ou sem sulfato, totalizando 60 corpos de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Os testes foram realizados no laboratório da instituição UNIFOA, onde foi utilizado para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral a prensa hidráulica Qualit Service, modelo YIMC114-7, número de série YIMIC114-7/zh/0257, com capacidade de 1000kN. Os corpos de prova foram selecionados de acordo com de cura e composição, posicionados horizontalmente na prensa e submetidos a uma carga contínua e controlada até o início do surgimento das fissuras, e sendo os resultados registrados automaticamente no sistema digital do equipamento e monitorados visualmente com as medições periódicas durante o teste para assegurar que não ultrapassassem o limite esperado de 5mm.

Figura 14: Formação de fissuras após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral no corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.6 Teste de vazão com solução saturada com Na_2SO_4

Para analisar a eficiência do processo de autocicatrização das fissuras no concreto aditivado com cristalizante, e submetido em ambiente com ataque de íons sulfatos, houve a necessidade de desenvolver e montar um equipamento capaz de

auxiliar e permitir a realização do teste de permeabilidade da água através dos corpos de prova de concreto. A figura 15 representa a realização do ensaio de permeabilidade à água em corpos de prova de concreto utilizando o equipamento desenvolvido e patenteado

O equipamento de teste foi desenvolvido com a finalidade de simular e controlar a vazão de água que permeia o interior do concreto, transpassando o corpo de prova através das fissuras possui sistema hidráulico constituído de um reservatório de água, onde também foi adicionado a proporção de 5% em massa de Na_2SO_4 para assim analisar a eficiência da autocicatrização com a presença do agente deletério. O bombeamento, induziu a circulação da água pelo sistema e passando pelas fissuras e simulando assim o processo de percolação através das fissuras nas estruturas de concreto. O tempo total de exposição variou conforme o protocolo experimental, com monitoramentos periódicos em 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 e 90 dias de ensaio. Ao final de cada idade foi possível verificar o avanço gradual e a eficácia do processo de autocicatrização das amostras, com e sem a adição de cicatrizantes (Amostra de Referência, Amostra 1 e Amostra 2), mesmo em condições agressivas.

Durante e após o período de exposição, os corpos de prova foram submetidos a inspeções visuais com iluminação uniforme e lupa de bancada para identificação de fissuras e alterações superficiais. Foram utilizadas régua de fissurômetro com graduação mínima de 0,05 mm para registrar o surgimento e evolução das fissuras visíveis.

Figura 15: Ensaio de permeabilidade à água em corpos de prova de concreto utilizando o equipamento desenvolvido e patenteado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.7 Avaliação da autocicatrização

A avaliação da eficácia dos aditivos cristalizantes foi realizada por meio de observações visuais periódicas e registros fotográficos das microfissuras, monitoradas após 1,14,21,28,35,42,49,56 e 90 dias de ensaio. As imagens foram obtidas com o uso de uma câmera fotográfica Nikon D7000, equipada com lente macro para melhor definição dos detalhes, e também com um smartphone Galaxy S23 FE, que permitiu registros complementares em diferentes condições de iluminação e ângulo.

As informações coletadas foram organizadas cronologicamente e analisadas de forma comparativa entre os corpos de prova com adição de aditivos cristalizantes e a amostra de referência (sem cristalizante). As evidências visuais de obstrução parcial ou total das fissuras foram consideradas como indicativo qualitativo do processo de selamento autógeno, associado à possível redução da permeabilidade e à mitigação da penetração de agentes agressivos.

Os dados observacionais e fotográficos foram sistematizados em planilhas do microsoft excel para avaliar o acompanhamento da evolução das fissuras e facilitando a análise comparativa entre as diferentes condições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

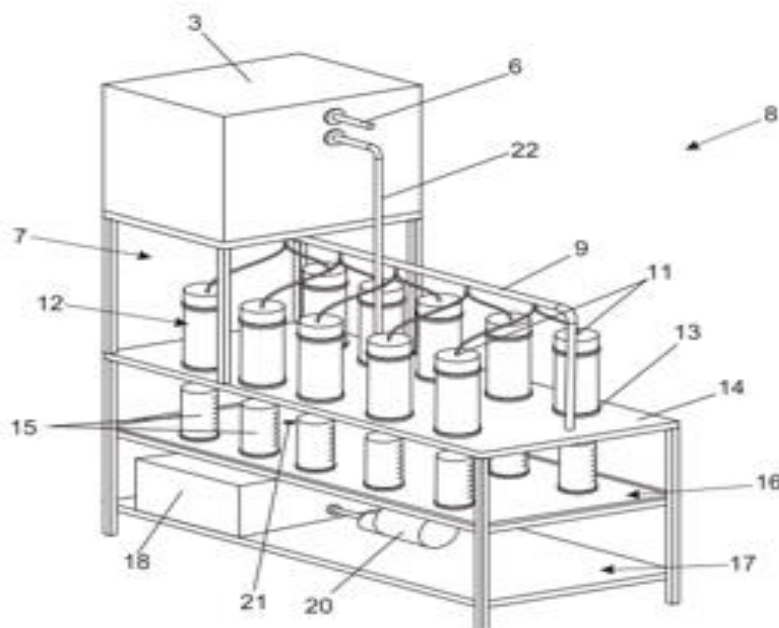
Os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa são apresentados e discutidos neste capítulo, e o estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o comportamento de concretos com aditivos cristalizantes, especialmente quanto à autocicatrização de fissuras expostas ao ataque de íons sulfato. Para isso, foram realizadas análises em diferentes etapas experimentais, conforme descrito a seguir: (i) desenvolvimento de equipamento específico para simulação da percolação e controle de fissuras; (ii) avaliação das propriedades do concreto no estado fresco, com e sem aditivo cristalizante; (iii) análise da resistência mecânica do concreto endurecido; (iv) verificação do fechamento de fissuras ao longo do tempo, em ambiente agressivo sulfatado.

4.1 EQUIPAMENTO PARA TESTE DA VAZÃO E ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO (PATENTEADO).

Com o propósito de testar o comportamento do concreto quanto à autocicatrização, especialmente sob ação de umidade e íons sulfato, foi desenvolvido um equipamento exclusivo, patenteado pelo autor sob o número INPI: BR 10 2024 092167-7. O dispositivo simula a percolação contínua de fluido por meio de fissuras no concreto, permitindo a observação controlada do fechamento dessas descontinuidades ao longo do tempo.

O equipamento foi projetado para atender às condições físicas e operacionais do laboratório, com dimensões compatíveis com a bancada de ensaio e sistema de medição de vazão precisa. O sistema permite que amostras de concreto com fissuras controladas sejam submetidas a um fluxo contínuo de solução contendo Na_2SO_4 , simulando condições reais de exposição agressiva. A figura 16 ilustra os componentes do dispositivo, incluindo reservatório, controle de vazão, suporte de amostras e sistema de coleta de percolado, possibilitando análise qualitativa e quantitativa da autocicatrização ao longo do tempo.

Figura 16 – Representação gráfica do equipamento em perspectiva isométrica



- (1) Estrutura da base do reservatório de água
- (2) base do equipamento
- (3) reservatório de água
- (4) entrada de água
- (5) boia de controle do nível de água
- (6) tubo de escoamento do excesso de água
- (7) seção intermediária do reservatório
- (8) Vista do dispositivo como um todo
- (9) tubo de distribuição hidráulica do sistema
- (10) corpos de prova envelopados por pvc
- (11) tampos de pvc com entrada de água
- (12) câmaras de pvc
- (13 e 14) base de encaixe dos corpos de prova
- (15) béqueres para medição
- (16) base com declive
- (17) base para filtro e bomba
- (18 e 19) tanque com filtro
- (20) bomba
- (21) dreno da base com declive.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 ANÁLISES DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Foram avaliadas as propriedades do concreto no estado fresco para os três traços analisados: sem aditivo (referência), com aditivo cristalizante tipo 1 (Amostra 1) e tipo 2 (Amostra 2). Os ensaios seguiram as diretrizes da ABNT NBR 7212:2012 e visaram verificar a trabalhabilidade, o abatimento (*slump*), a incorporação de ar e a massa específica, parâmetros essenciais que influenciam diretamente o desempenho no estado endurecido (Metha; Monteiro, 2014).

A análise do abatimento revelou que todas as amostras apresentaram consistência plástica adequada, com valores situados dentro da faixa de 70 a 110 mm, recomendada para concretos estruturais com consistência média. Observou-se uma discreta redução no *slump* da Amostra 2, possivelmente devido à ação do aditivo cristalizante na viscosidade da mistura, o que pode ocorrer pela formação precoce de estruturas internas de hidratação (Roig-Flores *et al.*, 2015)

No que se refere à incorporação de ar, os resultados permaneceram estáveis entre os traços, com variações inferiores a 0,5%, indicando que os aditivos não interferiram significativamente na retenção ou dispersão de ar. O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR NM 47:2002, utilizando o método do balão pressurizado, que consiste na medição do volume de ar aprisionado na mistura por meio da diferença de pressão entre câmaras internas do equipamento. Esse controle é essencial para garantir que a aeração esteja dentro dos limites recomendados, prevenindo a formação de porosidade excessiva que possa comprometer a durabilidade (Alghamri *et al.*, 2016).

A massa específica aparente também se manteve consistente entre as amostras, variando dentro de uma faixa inferior a 2% entre elas, o que sugere boa uniformidade na mistura e no processo de moldagem dos corpos de prova. Esses dados indicam que os aditivos cristalizantes, quando utilizados corretamente, não comprometeram as propriedades do concreto no estado fresco, sendo compatíveis com os requisitos de qualidade para aplicações estruturais (Snoeck *et al.*, 2014). As tabelas 3, 4 e 5 apresentam as propriedades do concreto dos 03 ensaios, e a tabela 6 apresenta a média dos 03 ensaios realizados no estado fresco do concreto.

Tabela 3: Propriedades do concreto – ensaio 1

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
Relação A/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,00
Slump (mm)	75	74	70	73,0±	2,65
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,4	2,4±	0,06
Massa Específica (kg/m ³)	79,5	80,3	80,3	80,0±	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 4: Propriedades do concreto – ensaio 2

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
Relação A/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,00
Slump (mm)	80	79	75	78,0±	2,65
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,5	2,4±	0,06
Massa Específica (kg/m ³)	79,5	80,3	80,3	80,0±	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 5: Propriedades do concreto - ensaio 3

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
Relação A/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,00
Slump (mm)	77	79	80	78,7±	1,53
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,4	2,4±	0,06
Massa Específica (kg/m ³)	79,5	80,3	80,3	80,0±	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 6: Propriedades do concreto (média)

Ensaio	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
Relação A/C	0,3	0,3	0,3	0,3	0,00
Slump (mm)	77,3	77,3	75	76,6	1,35
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,4	2,4	0,06
Massa Específica (kg/m ³)	79,5	80,3	80,3	80,0	0,46

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 TESTE DE COMPRESSÃO SEM EXPOSIÇÃO AO SULFATO

Os corpos de prova com as proporções padronizadas e conforme procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR 5739:2018, apresenta as especificações para a realização da metodologia de determinação da resistência à compressão, de concreto, em corpos de prova cilíndricos. A tabela 7 apresenta a determinação da resistência a compressão axial (MPa) dos corpos de prova sem a exposição aos sulfatos, nas idades 7,14,28,56,90 dias, que foram rompidos para a coleta dos respectivos resultados.

Tabela 7: Determinação da resistência a compressão axial (MPa) -sem sulfato

Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
7	28,2	29,0	30,1	29,1	0,95
14	29,2	30,2	31,5	30,3	1,15
28	31,1	32,2	32,2	31,8	0,64
56	31,3	34,5	35,5	33,8	2,19
90	32,5	35,2	35,7	34,4	1,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.4 TESTE DE COMPRESSÃO COM EXPOSIÇÃO AO SULFATO

Para desenvolvimento da pesquisa foram realizadas análises em corpos de prova com exposição ao ataque dos íon sulfatos, seguindo a norma ABNT NBR 5739:2018, porém com corpos de prova submersos em solução contendo 5% de Na_2SO_4 . Na tabela 8, observa-se a determinação da resistência a compressão axial, em MPa, dos corpos de prova após exposição aos íons sulfatos, nas idades 7,14,28,56,90 dias, que foram rompidos para a coleta dos respectivos resultados.

Tabela 8: Determinação da resistência a compressão axial (MPa) - com sulfato

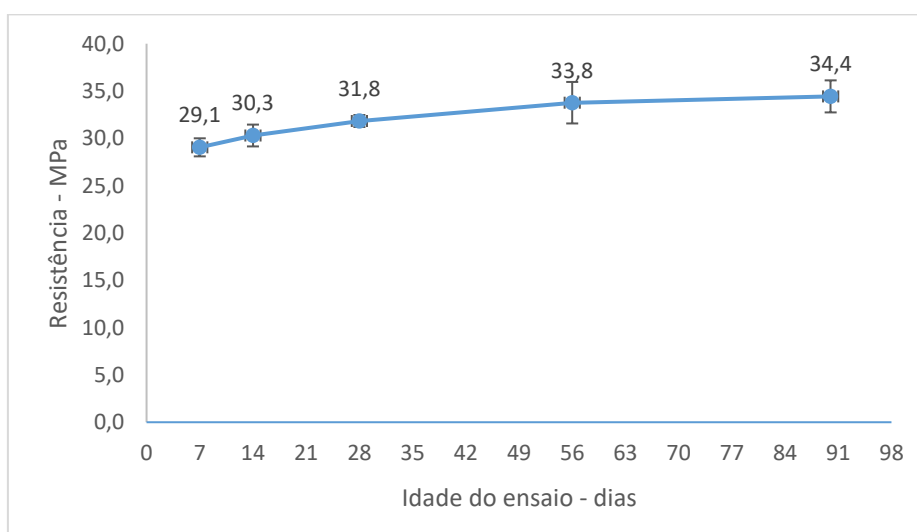
Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
7	22,0	23,8	24,2	23,3	1,16
14	28,0	29,5	30,0	29,2	1,04
28	34,5	36,2	37,0	35,9	1,30
56	36,2	38,1	38,8	37,7	1,35
90	35,0	36,5	37,45	36,3	1,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SEM E COM A EXPOSIÇÃO AO SULFATO

Os resultados dos ensaios resistência a compressão nos corpos de prova sem exposição ao sulfato, mostraram que aos 7 dias, as amostras com cristalizante incorporado tiveram um aumento de resistência maior, comparando com a amostras sem cristalizante, porém aos 28 dias, ambas tiveram a resistência esperada superior a 30Mpa. Foi observado que as amostras com aditivo cristalizante tiveram a sua resistência aumentada com o avanço do tempo, tendo a amostra de referência (sem cristalizante) apresentado pouca variação na resistência ao longo do mesmo tempo analisado. A figura 17 representa o desvio padrão dos resultados da determinação da resistência a compressão axial (MPa), dos corpos de prova sem a exposição aos íons sulfatos.

Figura 17 – Desvio padrão dos corpos de prova sem exposição aos íons sulfatos

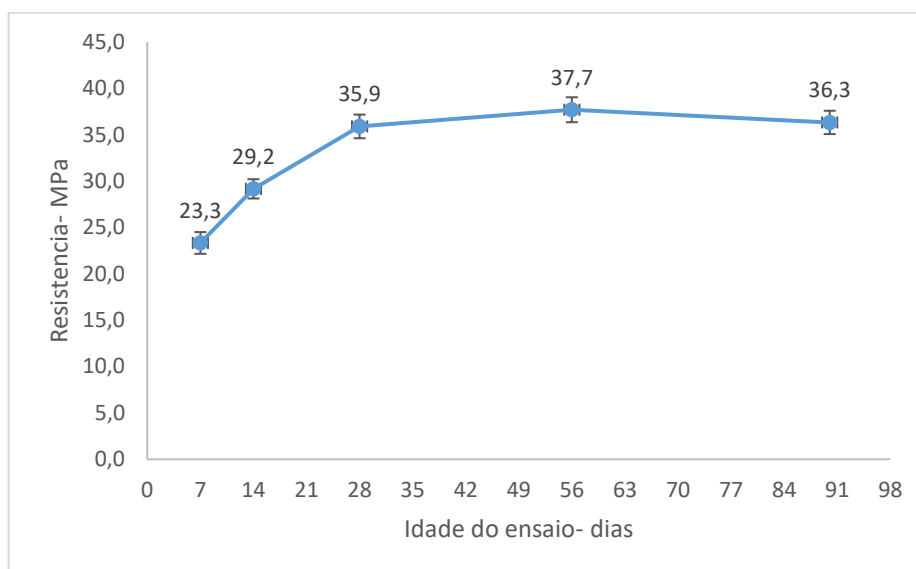


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Analisando a resistência a compressão dos corpos de prova submetidos aos íons sulfato foi comprovado que em relação aos corpos de prova sem o ataque químico, aos 7 dias apresentaram resistência a compressão reduzidas, em ambas as condições com e sem cristalizante incorporado. Aos 28 dias, ambas as condições tiveram a resistência a compressão superior, comparado com as amostras sem a presença dos íons sulfatos. Aos 56 dias foi comprovado um pico na resistência, e aos

90 dias verificou-se uma queda na resistência em todas as três condições. A figura 18 representa o desvio padrão dos resultados da determinação da resistência a compressão axial (MPa), dos corpos de prova com exposição aos íons sulfatos.

Figura 18 – Desvio padrão das amostras com exposição aos íons sulfatos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Observou-se que os concretos com aditivos cristalizantes apresentaram desempenho superior à amostra de referência em ambas as condições de exposição. A presença dos íons sulfato provocou redução na resistência à compressão aos 90 dias, evidenciando a ação degradante do meio agressivo. No entanto, as amostras com aditivos mostraram-se mais resistentes à perda de desempenho, demonstrando a eficácia desses materiais no aumento da durabilidade frente ao ataque químico.

Todas as amostras apresentaram evolução positiva da resistência ao longo do tempo, embora com comportamentos distintos. O concreto de referência (sem aditivo) apresentou crescimento esperado até 56 dias, seguido de uma leve queda aos 90 dias. Essa redução foi atribuída ao início do processo de deterioração por sulfatos, com provável formação de microfissuras internas e produtos expansivos, como etringita e gipsita, confirmando padrões descritos por Mehta e Monteiro (2014).

As amostras com aditivos cristalizantes, por sua vez, apresentaram maior estabilidade e desempenho em ambientes agressivos. A Amostra 1 proporcionou incremento médio de resistência entre 4% e 6% em relação à referência, enquanto a

Amostra 2 mostrou resultados ainda mais consistentes, com ganhos entre 5% e 7%, principalmente aos 28 e 56 dias. Esses dados sugerem que a cristalização interna contribuiu para a obstrução de poros e microcanais, reduzindo a penetração de agentes agressivos.

A ação deletéria dos sulfatos tornou-se mais evidente a partir de 56 dias, quando as amostras começaram a apresentar sinais de queda de resistência. Apesar disso, os concretos com aditivo mantiveram melhor desempenho estrutural. Destaca-se a Amostra 2, que demonstrou maior resistência residual aos 90 dias, sendo a mais eficiente no controle das reações expansivas associadas ao ataque por sulfatos. Esse resultado reforça seu potencial de aplicação em obras sujeitas a meios agressivos, como ambientes marinhos, solos contaminados ou esgotos sanitários.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS E VERIFICAÇÃO DAS FISSURAS EM EXPOSIÇÃO AOS ÍONS SULFATO

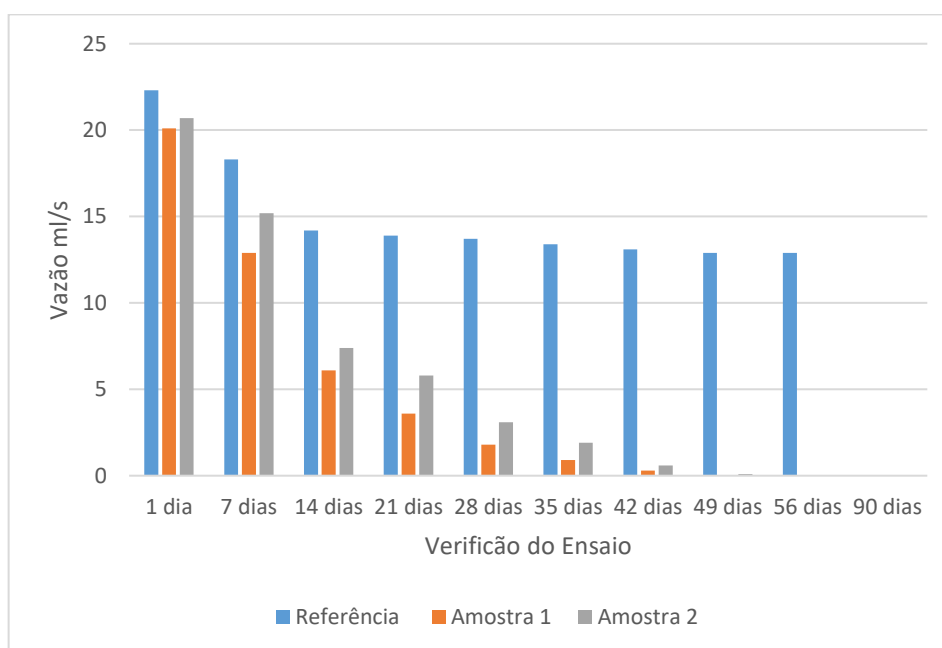
Foi constatado que os corpos de prova incorporados com aditivos cristalizantes apresentaram fechamento das fissuras e recomposição do concreto quando submetidos a percolação de água, mesmo com a presença de íons sulfatos. Os corpos de prova da Amostra 1 com aditivo cristalizante apresentou fechamento da fissura aos 49 dias de ensaio, já o corpo de prova da Amostra 2 também contendo aditivo cristalizante obteve fechamento das fissuras aos 56 dias. Os corpos de prova sem adição de cristalizantes e de forma menos acelerada também apresentaram processo de cristalização, devido a presença dos grãos e reações tardias na hidratação do cimento. Os compostos químicos reagem com os íons de cálcio provenientes do cimento Portland, formando sílica gel ou compostos similares que preenchem os poros e capilares do concreto (Wu *et al.*, 2023). A figura 19, representa a vazão volumétrica para a verificação e controle do fechamento das fissuras em exposição aos íons sulfatos.

O equipamento patenteado, foi fundamental para simular processo de percolação da água entre as fissuras do corpo de prova, permitindo assim a avaliação visual do comportamento, aliada ao controle do fechamento das microfissuras ao longo do tempo. As amostras com aditivos cristalizantes apresentaram selamento

quase completo das fissuras entre 49 e 56 dias de exposição aos íons sulfatos, enquanto as amostras sem aditivos permaneceram abertas, indicando maior suscetibilidade à penetração de agentes agressivos.

Do ponto de vista técnico, o uso dos aditivos cristalizantes mostrou-se promissor não apenas na recuperação parcial da integridade da matriz cimentícia fissurada, mas também na preservação de propriedades mecânicas mesmo após exposição prolongada à ambientes agressivos. Dessa forma, este estudo reforça a viabilidade do uso de tecnologias autocatrizantes como estratégia preventiva e corretiva para estruturas sujeitas a ataques químicos, contribuindo para o aumento da vida útil e a redução de custos com manutenção.

Figura 19 – Vazão volumétrica para a verificação e controle das fissuras em exposição aos íons sulfatos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que o objetivo de avaliar o desempenho e o processo da autocicatrização do concreto em ambientes com a presença dos ions sulfatos foi alcançado. Através dos resultados obtidos, a pesquisa comprova a efetividade das amostras com aditivo cristalizante, que demonstraram incremento significativo na resistência à compressão ao longo do tempo em comparação às amostras de referência. Com isso comprova-se que as amostras com cristalizante apresentam ganhos nas suas propriedades resistentes, resultando com isso um melhor desempenho e aumento da vida útil do concreto em ambientes agressivos,

A amostra com aditivo 2 se destacou por apresentar ganhos médios entre 5% e 7% em relação à referência, especialmente em idades mais avançadas (28 a 90 dias), evidenciando maior capacidade de impermeabilização e controle de fissuras. A amostra com aditivo 1 também apresentou resultados positivos, com ganhos médios entre 4% e 6%. A amostra de referência, por sua vez, apresentou tendência de redução de resistência após a exposição, comportamento típico da ação tardia do ataque de sulfatos, provavelmente associada à formação de produtos expansivos como etringita secundária. Em contrapartida, as amostras com aditivos cristalizantes apresentaram maior estabilidade mecânica e visual, com evidências de autocicatrização parcial das fissuras, especialmente entre 49 e 56 dias.

Diante dos dados obtidos, conclui-se que o protocolo desenvolvido é eficaz na análise do desempenho de concretos modificados em ambientes sulfatados, sendo a utilização de produtos cristalizantes uma alternativa viável e tecnicamente promissora para a mitigação da degradação química e aumento da durabilidade das estruturas de concreto. A continuidade dos estudos é recomendada para investigar o comportamento desses materiais em diferentes condições agressivas, períodos prolongados e superiores ao da pesquisa, e com variações de dosagem e outros tipos de cimento na mistura.

6 TRABALHOS FUTUROS

Avaliação do Concreto em diferentes ambientes agressivos, como cloretos, ácidos orgânicos e soluções ácidas industriais, a fim de verificar a eficiência dos aditivos cristalizantes sob diferentes mecanismos de degradação química.

Estudo com diferentes tipos de cimento para avaliar a compatibilidade entre as propriedades dos aditivos cristalizantes e as diferentes composições da matriz cimentícia.

Investigação microestrutural detalhada para caracterizar os produtos de autocicatrização formados no interior das fissuras.

Ensaio de durabilidade de longo prazo superiores a 90 dias, com o objetivo de avaliar a estabilidade da cicatrização e a durabilidade da solução proposta.

Aplicação em elementos estruturais reais visando validar o comportamento do concreto autocicatrizante em situações de campo e condições mais próximas da realidade de uso.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGHAMRI, R.; SHAFIGH, P.; MAHMOODI, F. A review on self-healing concrete for durability improvement. *Construction and Building Materials*, v. 197, p. 872–885, 2016

ALMEIDA, J. R.; COSTA, T. H.; MORAES, M. P. Compósitos com fibras naturais: uma alternativa sustentável para a construção civil. *Revista Ciência & Engenharia Sustentável*, v. 11, n. 2, p. 45–53, 2023.

ALMEIDA, L. C.; ROCHA, D. M. Mecanismos do ataque por sulfatos em estruturas de concreto e estratégias de prevenção. *Revista Concreto & Durabilidade*, v. 14, n. 2, p. 47–55, 2022.

ANDRADE, V. T. et al. Influência de aditivos cristalizantes na consistência e desempenho de concretos estruturais. *Revista Construção Civil em Debate*, v. 11, n. 1, 2023.

ANTÓN, P.; GURDIÁN, R. Influence of crystalline admixtures on strength and impermeability of concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 108361, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Tipos de cimento. São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 6118; Projeto de estruturas de concreto, procedimento; Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 16697 – Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 5738 – Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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- 17054 – Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 15900 – Água para amassamento do concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

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- 16889 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 7212 – Concreto dosado em central – Procedimento, fornecimento e controle. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM- 47 – Determinação de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

BARBOSA, L. M.; MOURA, D. S.; CAMPOS, R. L. Reações deletérias por sulfatos em materiais cimentícios: mecanismos e controle. Revista Científica da Construção Civil, v. 8, n. 2, p. 45–54, 2023.

BAZANT, Z. P.; PLANAS, J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. CRC Press, 1998.

BONIFÁCIO, D. R. et al. Análise sobre ataques por sulfatos ao concreto de fundações. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 4, 2022. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20653>.

BORGES, P. E. V.; PEDREIRO, M. R. M. Análise das principais patologias recorrentes em estruturas de concreto armado devido à ação da umidade. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 10, p. 6007–6028, 2023.

CAMARGO QUÍMICA. Conheça os tipos e como agem os aditivos no concreto. 2023. Disponível em: <https://camargoquimica.com.br/conheca-os-tipos-e-como-agem-os-aditivos-no-concreto/>.

CHANTRE, J. et al. Modificação de fibras naturais e suas aplicações em materiais poliméricos: uma revisão bibliográfica. *ConbraPA 2022*.

COSTA, A. M.; OLIVEIRA, D. J.; NASCIMENTO, R. G. Emprego da cerâmica vermelha na construção civil: propriedades e aplicações. *Revista Construção Moderna*, v. 11, n. 2, p. 55–62, 2022

COSTA, D. F. et al. Procedimentos e variáveis no ensaio de compressão: implicações na avaliação da qualidade do concreto. *Revista Científica da Construção*, v. 18, n. 3, 2022.

COSTA, J. S. Segurança em estruturas de concreto armado. *Revista Engenharia Civil*, 2022.

DIAS, F. R.; OLIVEIRA, G. S.; VASCONCELOS, C. P. Avaliação da fissuração por corrosão em estruturas de concreto armado em ambiente marinho. *Revista Matéria*, v. 29, n. 1, p. 1-15, 2024.

DOURADO, D. R. et al. Métodos de recuperação, proteção e monitoramento de estruturas de concreto armado em processo de corrosão: revisão de literatura. *RECIMA21*, v. 3, n. 9, 2022.

FERNANDES, M. P. et al. Técnicas de mitigação da lixiviação em estruturas de concreto expostas à umidade constante. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, 2023.

FERREIRA, L. S.; LIMA, R. F. Cerâmicas abrasivas: fundamentos, materiais e aplicações. *Revista de Materiais Técnicos*, v. 8, n. 1, p. 19–27, 2021.

FERREIRA, M. A.; ALMEIDA, L. C. Aditivos cristalizantes como estratégia de impermeabilização e proteção do concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 34, n. 4, p. 77–86, 2022.

FERREIRA, M. A.; ALMEIDA, L. C. Efeitos do ataque por sulfatos na integridade do concreto: mecanismos e mitigação. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 34, n. 2, p. 89–98, 2022.

GHALEHNOVI, M. et al. Assessment of sulfate resistance in concrete using crystalline waterproofing additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 7, 2021.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. Concrete Admixtures Market 2023–2033. Disponível em: <https://www.globalgrowthinsights.com/pt/market-reports/concrete-admixtures-market-111204>

GROSSMAN, J. W. Advanced technologies in structural engineering. *Journal of Structural Engineering*, v. 137, n. 1, p. 110–119, 2011.

HELENE, P. Manual de Reabilitação de Estruturas de Concreto. São Paulo: PINI, 2004.

HOHEMBERGER, L. Materiais compósitos poliméricos para utilização na construção civil. *Open Science Research XI*, 2023

HUANG, H.; YE, G.; QIAN, C. Self-healing in cementitious materials: Materials, mechanisms and performance. *Cement and Concrete Research*, v. 73, p. 141–152, 2014.

HUANG, Y. et al. Microstructure and sealing effect of self-healing concrete with crystalline admixtures under water curing. *Cement and Concrete Composites*, v. 120, p. 104030, 2021

LEE, H. X. D., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using crystalline admixtures. *Cement and Concrete Research*, 130, 105990. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres>, 2020.

LEONE, G. R.; FERRARI, M. A.; TRINDADE, P. L. Origem e comportamento geoquímico dos sulfatos em sistemas naturais. *Revista Brasileira de Geociências Ambientais*, v. 10, n. 1, p. 33–41, 2021.

LI, C. et al. Chemical and morphological characterization of crystals formed in cracks by crystalline admixtures in concrete. *Materials and Structures*, v. 54, n. 6, p. 1-15, 2021

LIMA, H. F. B. et al. Aplicações industriais dos materiais cerâmicos: uma revisão. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 3, n. 5, p. 87–96, 2021

LIMA, R. S.; TORRES, M. B.; ANDRADE, F. G. Diagnóstico e prevenção de patologias em estruturas de concreto. *Revista Materiais & Construção*, v. 19, n. 1, p. 22–30, 2022.

LOPES, M. D. F.; SOUZA, R. M.; PEREIRA, A. A. Origem e evolução de fissuras em estruturas de concreto: diagnóstico e prevenção. *Revista Concreto & Construção*, v. 15, n. 60, p. 47–56, 2022.

MACEDO, T. R.; RIBEIRO, C. P.; FONSECA, V. M. Revestimentos cerâmicos: desempenho e durabilidade. *Revista Engenharia em Foco*, v. 7, n. 1, p. 100–109, 2023.

MAPA DA OBRA. Aditivos para concreto: o que são, tipos e quando usar. 2022. Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/aditivos-concreto/>.

MARTINS, E. C.; SOUZA, R. A. Fontes antrópicas de sulfatos em ambientes urbanos e seus impactos. *Revista Engenharia & Sustentabilidade*, v. 6, n. 3, p. 88–96, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MELO, V. F. et al. Influência de aditivos cristalizantes na resistência à compressão de concretos submetidos a ambientes agressivos. *Revista de Engenharia Civil Aplicada*, v. 7, n. 2, 2023.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, D. R. de et al. Avaliação do desempenho de aditivo cristalizante em concretos permeáveis com diferentes condições de exposição. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 5, p. e14502, 2021.

PEREIRA, A. M.; DIAS, E. R.; OLIVEIRA, S. B. Compósitos estruturais: fundamentos, propriedades e aplicações. *Revista de Engenharia de Materiais e Estruturas*, v. 14, n. 1, p. 18-27, 2022.

POLESELLO, E.; DREHER, A. L. Comportamento de aditivos plastificantes de diferentes fornecedores na produção de concreto. *Revista Internacional de Ciências*, 2021.

QURESHI, T.; ZHANG, J.; YU, Q. Application of self-healing concrete in construction industry: a review. *Materials*, v. 12, n. 7, p. 1199, 2019.

ROCHA, T. V.; RAMOS, L. M.; TEIXEIRA, B. L. Concretos autocatrizantes com aditivos cristalizantes: uma revisão crítica. *Revista Ciência & Engenharia*, v. 41, n. 4, p. 71–83, 2023.

RODRIGUES, A. P.; SILVA, E. L.; MOURA, F. C. Materiais refratários e sua aplicação em processos industriais. *Caderno de Engenharia Química*, v. 25, n. 3, p. 33–41, 2021.

ROIG-FLORES, M.; SERRANO-LOPEZ, M.; ANDRES, D.; SERRA-CARES, M. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different exposure conditions. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1–11, 2015.

SANTOS, L. F. O.; FORTI, N. C. da S.; LONGO, R. M. A utilização de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra como uma alternativa sustentável para construções. *Sustentare/Wipis*, 2023.

SANTOS, R. P.; OLIVEIRA, A. C. Estratégias de proteção contra agentes químicos em estruturas de concreto armado. *Revista Engenharia e Tecnologia Construtiva*, v. 11, n. 1, p. 31–40, 2023.

SANTOS, R. P.; ROCHA, G. M. Avaliação de desempenho de concretos reforçados com fibras para controle de fissuração. *Revista Materiais e Construção*, v. 22, n. 4, p. 67-76, 2022.

SILVA, A. G.; BARROS, E. J. Influência da cura na fissuração precoce do concreto em clima tropical. *Revista Construção & Tecnologia*, v. 28, n. 2, p. 55-63, 2023.

SILVA, A. G.; PEREIRA, M. F.; SANTOS, E. J. Desempenho de produtos cristalizantes em concretos submetidos a ambientes agressivos. *Revista Materiais e Construção*, v. 19, n. 3, p. 44–52, 2023.

SILVA, M. V. V.; MOTA, J. A.; ANDRADE, D. T. M. O impacto de manifestações patológicas do concreto na durabilidade e segurança das estruturas. *Revista FT*, 2024.

SISOMPHON, K., Copuroglu, O., & Ng, C. T. Autonomous healing of microcracks in cementitious materials using crystalline additives. *Construction and Building Materials*, 287, 123000. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>, 2021.

STATERA, E. Recuperação de estruturas de concreto no Brasil: um olhar sobre normas e particularidades. 2024

SNOECK, D.; DE BELIE, N. Repeated autogenous healing in strain-hardening cementitious composites by continued hydration or calcium carbonate formation. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 282–292, 2015.

SNOECK, D.; DUSSEUX, P.; DE BELIE, N. Effect of autogenous healing on water permeability and pore structure of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 73, p. 229–237, 2015.

SOUZA, A. R.; ANDRADE, M. P. Propriedades das cerâmicas brancas e aplicações em produtos sanitários. *Revista de Tecnologia Aplicada*, v. 14, n. 2, p. 73–80, 2021.

SOUZA, R.; RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo: PINI, 1998.

TAKAGI, E. M.; ALMDEIRA, W. J.; OLIVEIRA, F. S. Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado. In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, 46, 2007, Florianópolis. *Anais...Florianópolis*, Ed. IBRACON, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; RAMOS, M. M.; MORAIS, D. R. Avaliação da degradação do concreto por ataque de sulfatos: uma revisão técnica. *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, p. 1–12, 2021.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, p. 763–770, 2011.

ZHANG, P. et al. Resistance of concrete with crystalline admixtures against combined chloride and sulfate attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 1, p. 04022384, 2023.