



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



DIONATAN AMARAL RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE
CONCRETO COM ADITIVO CRISTALIZANTE PARA REALIZAÇÃO DE TESTES
EM EQUIPAMENTO PATENTEADO PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO
DE FISSURAS**

VOLTA REDONDA

2025

DIONATAN AMARAL RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE
CONCRETO COM ADITIVO CRISTALIZANTE PARA REALIZAÇÃO DE TESTES
EM EQUIPAMENTO PATENTEADO PARA ANÁLISE DE AUTO CICATRIZAÇÃO
DE FISSURAS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

VOLTA REDONDA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

R696d Rodrigues, Dionatan Amaral

Desenvolvimento e caracterização de corpos de prova de concreto com aditivo cristalizante para realização de testes em equipamento patenteado para análise de autocatrização de fissuras. / Dionatan Amaral Rodrigues. - Volta Redonda: UniFOA, 2025. 77 p. II

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

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

1. Materiais - dissertação. 2. Concreto autocatrizante. 3. Aditivo cristalizante. 4. Concreto - durabilidade. 5. Fissuração. I. Magnago, Roberto de Oliveira. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



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



DIONATAN AMARAL RODRIGUES

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO
COM ADITIVO CRISTALIZANTE PARA REALIZAÇÃO DE TESTES EM EQUIPAMENTO
PATENTEADO PARA ANÁLISE DE AUTO CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

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:

Roberto de Oliveira Magnago

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
1º Membro da banca / Orientador/UniFOA

Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira
2º Membro da banca / UniFOA

Caio Marcello Felbinger A. Cossú

Prof. Dr. Caio Marcello Felbinger Azevedo Cossú
3º Membro da banca / UERJ

JUNHO DE 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Roselaine Amaral Rodrigues, pelo amor incondicional; ao meu padrasto Jefferson Almeida, pelo apoio constante; à minha namorada Thais Fernandes Casate Ferreira, pela parceria e paciência; ao meu filho Bernarto Casate, fonte diária de inspiração; e ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, pela orientação e incentivo ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, com profunda gratidão, às pessoas que foram essenciais ao longo desta jornada acadêmica.

À minha mãe, Roselaine Amaral Rodrigues, pelo amor incondicional e por sempre acreditar em mim, sendo meu porto seguro em todas as fases da vida.

Ao meu padrasto, Jefferson Almeida, pelo apoio firme, pelos conselhos e pelo exemplo de integridade e dedicação que carrego comigo.

À minha namorada, Thais Fernandes Casate Ferreira, pela paciência, carinho e por caminhar ao meu lado com companheirismo e leveza, mesmo nos dias mais desafiadores.

Ao meu filho, Bernardo Casate, meu maior orgulho e inspiração diária. Que este trabalho também represente, para ele, a importância de acreditar nos próprios sonhos.

E ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, pela confiança, orientação atenta e apoio constante durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento.

EPÍGRAFE

“A pesquisa é formalizada curiosidade. É escavar um buraco onde os outros não pensaram em cavar”

Albert Szent-Györgyiivamus.

RODRIGUES, D. A. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO COM ADITIVO CRISTALIZANTE PARA REALIZAÇÃO DE TESTES EM EQUIPAMENTO PATENTEADO PARA ANÁLISE DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS**, 2025. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto é frequentemente comprometida pela formação de trincas e fissuras, que funcionam como vias de entrada para agentes agressivos, acelerando processos de deterioração como corrosão das armaduras e carbonatação. Nesse contexto, os aditivos cristalizantes têm se destacado por sua capacidade de promover a autocicatrização do concreto, atuando na presença de umidade com a formação de cristais que selam poros e microfissuras, reduzindo a permeabilidade e prolongando a vida útil das estruturas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização de corpos de prova de concreto com a incorporação de um aditivo cristalizante de formulação protegida por sigilo industrial, com o objetivo de avaliar sua eficácia quanto à impermeabilidade, resistência à compressão e capacidade de selamento de fissuras. Para isso, foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, além de testes de vazão contínua de água com o uso de equipamento patenteado, projetado para mensurar o selamento progressivo das fissuras ao longo do tempo. Os resultados indicaram que a presença do aditivo contribuiu significativamente para a redução da permeabilidade e para o fechamento de microfissuras, demonstrando seu potencial de aplicação em estruturas sujeitas a ambientes agressivos. A proposta do estudo justifica-se pela relevância técnico-científica do tema e pelo potencial do aditivo em ampliar a durabilidade do concreto, reduzir custos de manutenção e reforçar a base normativa para sua utilização no contexto da engenharia nacional.

Palavras-chave: Concreto autocicatrizante; aditivo cristalizante; autocicatrização; fissuração; durabilidade do concreto; equipamento de ensaio; patente.

RODRIGUES, D. A. **DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF CONCRETE SPECIMENS WITH CRYSTALLINE ADMIXTURE FOR TESTING IN A PATENTED DEVICE FOR CRACK SELF-HEALING ANALYSIS**. 2025. Dissertation (Professional Master's in Materials) – Fundação Oswaldo Aranha, University Center of Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

ABSTRACT

The durability of concrete structures is often compromised by the formation of cracks and fissures, which serve as pathways for aggressive agents, accelerating degradation processes such as reinforcement corrosion and carbonation. In this context, crystalline admixtures have stood out for their ability to promote concrete self-healing by reacting in the presence of moisture and forming crystals that seal pores and microcracks, thereby reducing permeability and extending the service life of structures. This study presents the development and characterization of concrete specimens incorporating a crystalline admixture with a proprietary formulation protected by industrial secrecy, aiming to evaluate its effectiveness in terms of impermeability, compressive strength, and crack-sealing capacity. To this end, tests were conducted on both fresh and hardened concrete, as well as continuous water flow tests using a patented device designed to measure the progressive sealing of cracks over time. The results indicated that the presence of the admixture significantly contributes to reducing permeability and closing microcracks, demonstrating its potential for use in structures exposed to aggressive environments. The relevance of this study lies in the technical-scientific contribution it offers and in the practical potential of the admixture to enhance concrete durability, reduce maintenance costs, and support the development of technical standards for its application in the Brazilian engineering context.

Keywords: Self-healing concrete; crystalline additive; self-healing; cracking; concrete durability; testing equipment; patent.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação gráfica do equipamento patenteado: (a) Vista isométrica; (b) Vista Lateral.....442
- Figura 2.** Equipamento patenteado com os corpos de prova em teste: (a) Vista lateral; e (b) Corpos de prova em teste.43
- Figura 3.** Moldagem dos corpos de prova: (a) Corpos de provas imersos; e (b) Corpos de provas na capa de PVC49
- Figura 4.** Teste de compressão axial.....52
- Figura 5.** Teste de compressão axial com controle de fissuras.....52
- Figura 6.** Corpos de provas em teste no equipamento patenteado.....53
- Figura 7.** Teste de vazão no equipamento patenteado.**Erro! Indicador não definido.**3
- Figura 8.** Gráfico de média e desvio padrão da resistência à compressão (MPa) dos corpos de provas referência (sem aditivo cristalizante).60
- Figura 9.** Gráfico de média e desvio padrão da resistência à compressão (MPa) dos corpos de provas Amostra 1 (com aditivo cristalizante).62
- Figura 10.** Gráfico de média e desvio padrão da resistência à compressão (MPa) dos corpos de provas Amostra 1 (com aditivo cristalizante).**Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11.** Teste 1 de vazão no equipamento patenteado.66

Figura 12. Teste 2 de vazão no equipamento patenteado..54

Figura 13. Teste 3 de vazão no equipamento patenteado.55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de cimento Portland (ASTM C 150)	23
Tabela 2. Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo	24
Tabela 3. Limite da composição granulométrica do agregado graúdo.....	25
Tabela 4. Classificação dos limites de abertura de fissuras.....	32
Tabela 5. Dosagem do traço.....	50
Tabela 6. Propriedades do concreto fresco.	59
Tabela 7. Propriedades do concreto fresco.	59
Tabela 8. Propriedades do concreto fresco.	60
Tabela 9. Determinação da <i>resistência à compressão axial (MPa) – Referência (sem aditivo cristalizante)</i>	61
Tabela 10. Determinação da <i>Resistência à compressão axial (MPa) – Amostra 1 (com Aditivo Cristalizante)</i>	63
Tabela 11. Determinação da <i>Resistência à compressão axial (Mpa) – Amostra 2 (com Aditivo Cristalizante)</i>	65

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem, associada a retração ou outros índices técnicos.
°C	<i>Graus Celsius, relevante em contextos de temperatura do concreto (não diretamente mencionado, mas frequentemente usado)</i>
CP	Corpo de Prova.
CP-V RS	<i>Cimento Portland Estrutural Resistente a Sulfatos.</i>
F _c	Resistência à compressão.
F _{ck}	<i>Resistência característica do concreto</i>
F _{cm}	Resistência média à compressão dos corpos de prova.
g	<i>Gramas.</i>
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico (unidade de densidade)..
L	<i>Litro</i>
m ³	Metro cúbico.
mm	<i>Milímetro.</i>
NBR	Norma Brasileira.
NBR 5739	<i>Norma Brasileira que especifica a resistência do concreto.</i>
NBR 6118	Norma Brasileira de projeto de estruturas de concreto.
NBR 6216	Norma Brasileira para água utilizada na construção civil.
PVC	<i>Policloreto de Vinila, material usado para moldagem dos corpos de prova.</i>
s	Segundo.
→	Símbolo que indica relação ou especificação (exemplo: Brita 0 → 4,8 a 9,5 mm).

SUMÁRIO

SUMÁRIO	14
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CERÂMICA	20
2.1.1 Atributos e especificações do concreto	21
2.1.2 Componentes do concreto	22
2.1.2.1 Relação água/cimento (A/C)	22
2.1.2.2 Agredados miúdos	23
2.1.2.3 Agregados graúdos	25
2.1.2.4 Aditivos	26
2.2 POLÍMEROS	26
2.3 COMPÓSITOS	27
2.4 PATOLOGIAS NAS CONSTRUÇÕES	28
2.4.1 Fissuras	30
2.4.1.1 Fissuras por assentamento e retração plástica do concreto	30
2.4.1.2 Fissuras por retração autógena do concreto	31
2.4.1.3 Fissuras por expansão do concreto	31
2.4.1.4 Fissuras por retração de secagem	31
2.4.1.5 Fissuras por movimentação térmica	32

2.4.1.6 Limites para abertura de fissuras	32
2.5 TIPOS DE ADITIVOS PARA CONCRETO	33
2.5.1 Aditivos cristalizantes	34
2.5.1.1 Influência do aditivo cristalizante no concreto	35
2.5.1.3 Adição do aditivo cristalizante	36
2.5.1.3 Efeitos do aditivo cristalizante na redução de fissuras	37
2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARRREDURA (MEV) NA ANÁLISE DA AUTO CICATRIZAÇÃO DO CONCRETO	38
2.7 ENSAIO DE SLUMP	38
2.8 PATENTE DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.....	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA	42
3.2 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTE	43
3.2.1 Equipamentos Patentado (Deposito nº BR 10 2024 09216-7)	43
3.3 MATERIAL PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	49
3.3.1 Dosagem dos traços	49
3.3.2 Moldagens dos corpos de prova para teste no equipamento patentado	50
3.3.4 Ensaio de compressão para avaliação das resistências dos corpos de prova	53
3.3.5 Ensaio de ruptura compressão na diametral com controle de fissuras	53
3.3.6 Teste de vazão da água pelos corpos de prova, utilizando o equipamento desenvolvido pelo autor	54
3.4 DESENVOLVIMENTO E PEDIDO DE PATENTE DO EQUIPAMENTO PARA CONTROLE DE VAZÃO NOS CORPOS DE PROVA.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 DESENVOLVIMENTO E PATENTE DO EQUIPAMENTO	57

4.1.1 Resumo do pedido de patente do equipamento	57
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS	58
4.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco	58
4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	60
4.3.1 Resistência á compressão axial (Mpa)	60
3.2.1.1 Teste de resistência à compressão (mpa) em corpos de prova de referência (sem aditivo cristalizante).....	61
4.3.1.2 Teste de resistência à compressão (mpa) em corpos de prova de Amostra 1 (com aditivo cristalizante).....	62
3.3.1.3 Teste de resistência à compressão (Mpa) em corpos de prova de Amostra 2 (com aditivo cristalizante).....	65
4.4 TESTES DE VAZÃO UTILIZANDO O EQUIPAMENTO PATENTEADO PELO AUTOR.....	67
4.4.1 Resultados do teste de vazão do primeiro traço	67
4.4.2 Resultados do teste de vazão do segundo traço	68
4.4.3 Resultados do teste de vazão do terceiro traço	69
5 CONCLUSÕES	72
6 TRABALHOS FUTURO	74
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto permanece sendo um dos principais materiais da construção civil, sendo essencial na execução de elementos estruturais devido à sua capacidade de resistir à compressão, facilidade de moldagem e relativa viabilidade econômica. Apesar de suas vantagens, o concreto apresenta limitações intrínsecas, como elevada porosidade, suscetibilidade à fissuração e consequente permeabilidade a agentes agressivos, comprometendo a sua durabilidade ao passar do tempo (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, a busca por estruturas mais resistentes e duráveis, sobretudo em ambientes com elevada agressividade, impulsionou pesquisas voltadas a tecnologias capazes de mitigar processos de deterioração. Entre elas, destacam-se os aditivos cristalizantes, que favorecem a estanqueidade e estimulam a autocicatrização de microfissuras no concreto (FERRARA; HUANG; SINGH, 2022).

Esses aditivos cristalizantes têm se destacado por sua capacidade de promover a autocicatrização do concreto, atuando na presença de umidade com a formação de cristais que selam poros e microfissuras, o que diminui a permeabilidade e estende a vida útil das edificações (XYPEX, 2021; MEHTA & MONTEIRO, 2022). Essa capacidade de autorreparo, denominada autocicatrização autógena, tem sido apontada como recurso importante para a manutenção da integridade estrutural e prolongamento do ciclo de serviço de edificações (PARK & CHOI, 2021; JIANG *et al.*, 2023).

Resultados experimentais recentes evidenciam que a incorporação de aditivos cristalizantes reduz significativamente a penetração de água, limita a difusão de íons cloreto e auxilia na prevenção de manifestações patológicas como a corrosão de armaduras. Entretanto, o desempenho dessa tecnologia depende diretamente de fatores como a proporção da mistura, a relação água/cimento, as condições de cura e o tipo de exposição ambiental (OLIVEIRA *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2024).

Nesse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento e validação de uma metodologia para incorporação de aditivo cristalizante em concretos convencionais, analisando seus efeitos sobre a durabilidade, a permeabilidade e a habilidade de autocicatrização, além de investigar alterações microestruturais que possam contribuir para maior proteção das estruturas..

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo geral**

Analisar os efeitos da incorporação de aditivo cristalizante na matriz do concreto convencional, com foco na interação com os poros capilares e na verificação do desempenho quanto à resistência mecânica e à durabilidade do material, especialmente em relação à impermeabilidade e autocicatrização das fissuras.

1.2.2 **Objetivos específicos**

- I. Avaliar a redução da permeabilidade do concreto à água e a agentes agressivos por meio de ensaios realizados em equipamento patenteado pelo autor;
- II. Verificar a manutenção ou o aprimoramento da resistência à compressão axial com a adição do aditivo;
- III. Analisar a capacidade de selamento de fissuras estáticas com aberturas de até 0,5 mm, por meio da autocicatrização;
- IV. Estudar a resistência química do concreto modificado frente a ambientes potencialmente agressivos;
- V. Comparar o comportamento de corpos de prova com e sem aditivo cristalizante em ensaios de permeabilidade, verificando o desempenho quanto à autocicatrização.

1.3 JUSTIFICATIVA

Embora o concreto seja extensamente utilizado na construção civil por suas propriedades mecânicas e versatilidade, sua durabilidade pode ser severamente comprometida pela presença de poros e microfissuras que favorecem a penetração de água e agentes agressivos. Nesse contexto, o uso de aditivos cristalizantes representa uma inovação promissora, uma vez que promove a redução da permeabilidade e favorece a autocicatrização de fissuras, auxiliando na proteção e no prolongamento da durabilidade das estruturas.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos e da aplicação crescente desses aditivos, ainda há escassez de regulamentações normativas específicas no Brasil, o que reforça a necessidade de estudos sistemáticos que investiguem seu comportamento, limitações e potencial de aplicação. Soma-se a isso a crescente demanda por concretos de alto desempenho, que impõe desafios relacionados ao controle tecnológico, custo e execução.

A sugestão de estudar concretos com aditivo cristalizante, portanto, se justifica pela sua relevância técnico-científica e pelo potencial de aplicação em projetos que exigem maior durabilidade, economia de manutenção e eficiência construtiva. Este trabalho busca contribuir para o embasamento técnico e normativo do uso desse aditivo no cenário nacional, apresentando uma metodologia prática e aplicável ao ambiente profissional da engenharia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CERÂMICA

A cerâmica é um dos materiais de uso mais antigo pelo ser humano e ainda hoje ocupa papel importante na construção civil. Sua permanência deve-se à versatilidade, ao bom desempenho mecânico e ao custo relativamente acessível. Entre suas principais aplicações estão blocos estruturais e de vedação, telhas, pisos e revestimentos, tanto internos quanto externos (SOUZA *et al.*, 2021).

O avanço tecnológico das últimas décadas trouxe melhorias expressivas para a indústria cerâmica. Processos automatizados, controle da granulometria e o emprego de adições têm possibilitado ganhos de qualidade e desempenho. Diversos estudos destacam, por exemplo, o uso de resíduos industriais em massas cerâmicas, que contribui para o aumento da resistência e, ao mesmo tempo, para a redução dos impactos ambientais, favorecendo práticas mais sustentáveis (FERNANDES *et al.*, 2022).

A avaliação do desempenho dos produtos cerâmicos envolve ensaios de absorção de água, resistência à compressão, expansão por umidade e análise microestrutural. Esses procedimentos asseguram a conformidade com normas técnicas, como a ABNT NBR 15270 (blocos cerâmicos) e a ABNT NBR 13818 (revestimentos). O controle rigoroso da qualidade é essencial para evitar manifestações patológicas em edificações, como fissuras, infiltrações ou desagregações (MACHADO; CARVALHO, 2023).

Outro aspecto relevante está associado ao conforto térmico e à eficiência energética das construções. Pesquisas recentes apontam que telhas com tratamento reflexivo podem reduzir a absorção de calor e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica, em consonância com as exigências da ABNT NBR 15575, que trata do desempenho das edificações (GOMES; SILVA, 2023).

Do ponto de vista da inovação, a área vem explorando o desenvolvimento de massas cerâmicas especiais e a aplicação da impressão 3D para a fabricação de peças arquitetônicas personalizadas. Essa tendência amplia as possibilidades de

projeto e valor agregado dos produtos, reforçando o protagonismo da cerâmica no cenário da construção civil contemporânea (PEREIRA; RIBEIRO, 2024).

2.1.1 Atributos e especificações do concreto

O concreto é um compósito amplamente utilizado na engenharia civil, resultado da combinação de cimento Portland, água, agregados graúdos e miúdos, além de possíveis adições minerais e aditivos químicos. Essa mistura confere elevada resistência à compressão, boa trabalhabilidade no estado fresco e ampla versatilidade de moldagem, características que justificam seu uso em diferentes elementos estruturais, como lajes, pilares e fundações (RESENDE, 2023; TAMBARA *et al.*, 2024).

Entre as propriedades de maior relevância destacam-se: a resistência à compressão, a durabilidade frente a agentes agressivos, a retração e a fluência. A resistência à compressão, parâmetro mais empregado na classificação do material, é determinada por ensaios em corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Do ponto de vista estatístico, os resultados seguem a distribuição normal de Gauss, permitindo a determinação do valor característico (f_{ck}), utilizado como referência nos cálculos estruturais (PEREIRA; NASCIMENTO; JOFFILY, 2017).

A durabilidade, por sua vez, está diretamente relacionada à capacidade do material de resistir à ação de cloretos, sulfatos, variações térmicas e ciclos de umidade e secagem. Em ambientes de elevada agressividade, esses fatores podem acelerar a deterioração do concreto e reduzir significativamente a vida útil da estrutura. Estratégias como a redução da permeabilidade, o emprego de adições minerais e o uso de aditivos especiais têm se mostrado fundamentais para prolongar seu desempenho (FERREIRA; KNIESS, 2024).

Entre as soluções disponíveis, os aditivos cristalizantes vêm recebendo destaque, pois atuam formando cristais insolúveis no interior dos poros da matriz cimentícia. Esse processo melhora a estanqueidade e promove a cicatrização de microfissuras, mesmo após a exposição a tensões mecânicas e a meios agressivos. Pesquisas recentes confirmam que concretos com esse tipo de aditivo apresentam menor absorção por capilaridade e maior resistência à difusão de íons cloreto,

características que contribuem para aumentar a durabilidade e ampliar o tempo de serviço das estruturas (TAMBARA et al., 2022).

2.1.2 Componentes do concreto

O concreto é formado essencialmente por cimento, água e agregados, que podem corresponder a até 80% do seu volume total. Os agregados se dividem em miúdos (como areias naturais ou artificiais) e graúdos (britas de diferentes dimensões), responsáveis por conferir estabilidade dimensional, resistência mecânica e economia de materiais, ao reduzir a quantidade de cimento necessária para o traço (SILVA & PEREIRA, 2022).

A qualidade e a homogeneidade dos agregados são fatores determinantes para o desempenho da mistura. Partículas adequadas favorecem a trabalhabilidade, reduzem o consumo de água e aumentam a resistência. Já agregados com elevada porosidade podem comprometer a hidratação do cimento, exigindo pré-umedecimento ou ajustes na dosagem. Além disso, a presença de contaminantes, como argilas, sais ou matéria orgânica, pode gerar fissuração, expansão indesejada e perda de desempenho, sendo ainda mais crítica em concretos modificados com aditivos cristalizantes, que dependem de uma matriz homogênea para atuar de forma eficaz (DEGEN *et al.*, 2020; GONZÁLEZ *et al.*, 2023).

2.1.2.1 Relação água/cimento (A/C)

O cimento Portland, aglomerante primordial do concreto, ao reagir com a água inicia o processo de hidratação, formando compostos responsáveis pela coesão da pasta e pela resistência mecânica. O produto mais relevante dessa reação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o maior responsável pelo desenvolvimento da resistência, enquanto compostos secundários influenciam na durabilidade (CASTRO, 2021).

A relação entre a quantidade de água e de cimento exerce papel central no desempenho do concreto. Valores mais altos aumentam a porosidade, reduzindo a resistência e favorecendo a penetração de agentes agressivos. Já relações mais baixas geram matrizes densas e duráveis, embora possam comprometer a

trabalhabilidade da mistura. Nesses casos, o uso de aditivos plastificantes é uma alternativa para manter a moldabilidade sem elevar a quantidade de água (SANTOR *et al.*, 2023; POTDAR; ABRAHAM; KAKADE, 2023)

A tabela 1 apresenta a classificação dos principais tipos de cimento Portland, com base em sua resistência característica e nas propriedades complementares mais relevantes para aplicações na construção civil.

Tabela 1. Tipos de cimento Portland (ASTM C 150).

Tipo	Característica Predominante	Composição (%)					Resistência à Compressão (Em relação à resistência do cimento)			
		50	24	11	8	1	1	1	1	
I	Tipo de uso corrente Moderado calor de hidratação / Moderada resistência a sulfatos	42	33	5	13	0,75	0,85	0,9	1	
II	Elevada resistência inicial	60	13	9	8	1,3	1,4	2,1	1,1	
III	Baixo calor de hidratação	26	50	12	5	0,55	0,55	0,75	1	
IV	Elevada resistência a sulfato	40	40	4	11	0,65	0,75	0,85	1,1	

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

Outro ponto relevante é a qualidade da água. A recomendação usual é que seja potável, livre de óleos, sais e compostos orgânicos que prejudiquem a hidratação ou contribuam para a corrosão das armaduras. Quando se utiliza água de reuso, devem ser feitos ensaios físico-químicos para assegurar sua compatibilidade (OLIVEIRA & OLIVEIRA, 2021; COUTO, 2022).

Além disso, a água destinada à cura é fundamental para garantir a continuidade da hidratação, evitando retrações e fissuras precoces. Métodos de cura eficientes, como membranas de proteção ou agentes de cura interna, têm se mostrado eficazes para reduzir a permeabilidade e prolongar a vida útil das estruturas (BUCHHOLZ, 2023; DURABILIDADE DE CONCRETOS, 2023).

2.1.2.2 Agredados miúdos

Os agregados miúdos, representados principalmente pela areia, têm como função preencher os vazios entre os agregados mais espessos, melhorando a compacidade e baixando o consumo de cimento. A granulometria influencia diretamente no empacotamento das partículas e, conseqüentemente, na trabalhabilidade e durabilidade da mistura. Grãos arredondados, comuns em areias naturais, tendem a melhorar o adensamento, enquanto partículas angulosas, resultantes da britagem, proporcionam maior aderência, podendo exigir o uso de aditivos para manter a fluidez (ABNT NBR 7211, 2022; ARAÚJO & BERNARDES, 2023).

De acordo com a ABNT NBR 7211 (2022), agregados miúdos são partículas que atravessam peneiras com aberturas de até 4,75 mm. A norma também define faixas granulométricas adequadas, que visam garantir um empacotamento eficiente, reduzir vazios e melhorar as propriedades mecânicas do concreto (FREITAS *et al.*, 2022).

Pela NBR 7211 (ABNT, 2022) a classificação do agregados miúdos são aqueles que passam pela peneira de malha de 4,75 mm, como demonstra na tabela 02.

Tabela 2. Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

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

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90;

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20;

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia e 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2022).

2.1.2.3 Agregados graúdos

Os agregados graúdos, formados por partículas maiores que 4,75 mm, podem ser de origem natural (como cascalho) ou resultante do processo de trituração de rochas. Sua escolha influencia diretamente a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade do concreto. Misturas granulometricamente bem distribuídas aumentam a compactidade e diminuem a quantidade de vazios, o que contribui para maior desempenho estrutural (SILVA *et al.*, 2022).

Agregados com superfície angular favorecem a aderência à pasta de cimento, mas podem demandar maior consumo de água. Já materiais de baixa absorção e alta resistência são preferíveis em ambientes agressivos, pois reduzem a penetração de agentes deletérios e prolongam a durabilidade do concreto (FERNANDES *et al.*, 2021; DEGEN *et al.*, 2020).

Pela NBR 7211 (ABNT, 2022) a classificação do agregados graúdos são aqueles que são retidas pela peneira de malha de 4,75 mm, como demonstra na Tabela 03.

Tabela 3. Limite da composição granulométrica do agregado graúdo.

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

Nota 1: Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo;

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

Fonte: ABNT NBR 7211 (2022).

2.1.2.4 Aditivos

Aditivos químicos são adicionados em pequenas quantidades ao concreto para modificar suas propriedades no estado fresco ou endurecido. Podem atuar no aumento da fluidez (plastificantes e superplastificantes), no ajuste do tempo de pega (retardadores e aceleradores) ou na melhoria da durabilidade (impermeabilizantes e cristalizantes). A norma ABNT NBR 11768 (2018) estabelece os requisitos para o uso desses produtos.

A impermeabilidade, em especial, pode ser significativamente melhorada com aditivos cristalizantes, que reduzem a entrada de substâncias contendo cloreto e sulfatos, protegendo as armaduras contra corrosão. Esses aditivos também favorecem a autocicatrização de microfissuras e contribuem para a densificação da microestrutura (XYPEX, 2020; SILVA *et al.*, 2023).

Além disso, estudos mostram que o uso adequado de aditivos pode aumentar a resistência à compressão, melhorar o processo de cura e garantir concretos mais densos e duráveis (MEHTA & MONTEIRO, 2014; FERNANDES *et al.*, 2022).

Por fim, a escolha e dosagem correta dos aditivos devem ser realizadas com base nas exigências do projeto e nas condições específicas da obra, garantindo que o concreto atinja o desempenho esperado sem prejudicar a sustentabilidade e os custos do projeto.

2.2 POLÍMEROS

Os polímeros são estruturas moleculares formadas pela repetição de unidades menores denominadas monômeros, ligadas entre si por ligações covalentes. Nos últimos anos, sua aplicação na construção civil tem crescido consideravelmente em função da elevada resistência química, da baixa densidade,

da flexibilidade e da durabilidade, além da capacidade de modificar propriedades de compósitos cimentícios (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024; SINGH *et al.*, 2024).

Esses materiais podem ser agrupados em dois grandes tipos: termoplásticos e termofixos. Os primeiros, como o polietileno (PE) e o policloreto de vinila (PVC), podem ser aquecidos e remodelados diversas vezes sem alterar suas características principais. Já os termofixos, como resinas epóxi e poliuretânicas, formam uma estrutura tridimensional rígida após a cura, adquirindo elevada resistência mecânica e estabilidade térmica (MOHAMED *et al.*, 2024).

Na engenharia civil, os polímeros vêm sendo utilizados como agentes impermeabilizantes, aditivos para concretos, reforços em matrizes cimentícias, selantes e sistemas de proteção de estruturas. Sua incorporação no concreto pode resultar em ganhos de resistência, maior impermeabilidade, controle da retração e aumento da durabilidade em ambientes agressivos (WU *et al.*, 2024).

Além disso, pesquisas recentes exploram o uso de polímeros em processos de autocicatrização. Materiais encapsulados ou modificados quimicamente liberam substâncias capazes de preencher microfissuras ou reagem com a umidade presente, restaurando a integridade do concreto. Esse mecanismo pode aumentar significativamente a vida útil de estruturas e reduzir custos de manutenção (SHAIKH *et al.*, 2024).

Outra vertente em expansão é o desenvolvimento de polímeros sustentáveis e biodegradáveis para aplicação em concretos e demais materiais de construção. Essa abordagem contribui para práticas construtivas ambientalmente responsáveis, reduzindo impactos ecológicos sem comprometer o desempenho das obras (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

Dessa forma, o emprego de polímeros na construção civil representa uma estratégia inovadora para o prolongamento da vida útil e da eficiência das edificações, reforçando a tendência de utilização de materiais de maior desempenho e alinhados à sustentabilidade.

2.3 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos vêm se destacando na engenharia civil devido à sua elevada resistência específica, leveza e versatilidade de aplicação. Um compósito, por definição, é constituído pela combinação de dois ou mais materiais com propriedades distintas, que juntos resultam em um material com desempenho superior ao dos componentes individuais. Na construção civil, os compósitos mais comuns são aqueles à base de fibras, podendo ser de vidro, carbono ou aramida, e matriz polimérica, cimentícia ou metálica (MORAES *et al.*, 2022).

O uso de compósitos reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymers*) tem crescido especialmente em aplicações de reforço estrutural, recuperação de estruturas degradadas e construção de elementos pré-fabricados. Sua elevada resistência à tração e à corrosão, combinada com baixo peso, torna esses materiais ideais para intervenções em estruturas de concreto armado, alvenaria ou madeira, sem acréscimo significativo de carga (SANTOS; ALMEIDA, 2021).

Além dos compósitos poliméricos, os compósitos cimentícios vêm ganhando espaço, principalmente em elementos estruturais e de fachada. O acréscimo de fibras (de vidro, aço, polipropileno, entre outras) a matrizes cimentícias melhora a resistência à fissuração e à tenacidade do concreto, contribuindo para a durabilidade das estruturas. Compósitos cimentícios avançados, como os ECCs (*Engineered Cementitious Composites*), apresentam capacidade de deformação superior ao concreto convencional e são objeto de diversas pesquisas recentes (FERNANDES *et al.*, 2023).

A incorporação de fibras naturais como sisal, juta e bambu também tem sido explorada, com foco na sustentabilidade e no uso de materiais renováveis. Estudos mostram que esses compósitos naturais apresentam desempenho promissor em termos de resistência e durabilidade, além de contribuírem para a redução da pegada de carbono da construção (COSTA; LIMA, 2021).

2.4 PATOLOGIAS NAS CONSTRUÇÕES

As patologias nas construções representam manifestações anômalas que comprometem o desempenho, a durabilidade e a estética das edificações. Essas

manifestações podem se apresentar de diversas formas, como fissuras, trincas, infiltrações, desagregações, eflorescências, corrosão de armaduras, entre outras (NASCIMENTO *et al.*, 2024).

As principais causas das patologias construtivas podem ser agrupadas em quatro categorias:

- I. **Projetuais:** erros de concepção ou dimensionamento inadequado de elementos estruturais e de vedação;
- II. **Execução:** falhas durante o processo construtivo, como mistura inadequada de materiais, cura insuficiente do concreto ou aplicação incorreta de revestimentos;
- III. **Materiais:** utilização de insumos de baixa qualidade, inadequados para as condições de exposição;
- IV. **Uso e manutenção:** ausência de inspeções periódicas, sobrecarga de estruturas ou intervenções sem critérios técnicos (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

A presença de patologias, mesmo em fases iniciais, pode comprometer a segurança estrutural, reduzir a durabilidade das edificações e gerar elevados custos de manutenção corretiva. Além disso, impacta diretamente a sustentabilidade do setor, uma vez que deteriorações prematuras demandam maior consumo de materiais e recursos naturais para reparo e reabilitação (SHAIKH *et al.*, 2024).

O diagnóstico precoce e a correta identificação da origem das patologias são fundamentais para a escolha do método de reparo mais adequado. Técnicas como inspeções visuais sistemáticas, ensaios não destrutivos, mapeamento de fissuras e monitoramento por sensores vêm sendo amplamente aplicadas na engenharia moderna para mitigar os efeitos das anomalias construtivas (WU *et al.*, 2024).

Com a crescente demanda por obras mais duráveis e eficientes, a prevenção das patologias por meio de projetos bem elaborados, seleção criteriosa de materiais e controle rigoroso de qualidade na execução tornam-se estratégias essenciais para a engenharia contemporânea.

2.4.1 Fissuras

A fissuração em estruturas de concreto pode variar desde manifestações superficiais de caráter estético até fissuras estruturais significativas, capazes de comprometer a durabilidade e a segurança da edificação. Embora nem toda fissura represente, de imediato, risco estrutural, sua presença é um indicativo de possíveis anomalias e pode ser o ponto de partida para desencadear patologias mais graves (SANTOS *et al.*, 2023).

As fissuras resultam de múltiplos fatores, incluindo variações volumétricas associadas a mudanças de temperatura e umidade, condições de carregamento e envelhecimento da estrutura. Esses fatores podem potencializar processos químicos e físicos de degradação, caso não sejam devidamente controlados (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

De maneira geral, as fissuras podem ser classificadas em quatro tipos principais:

- I. Fissuras plásticas;
- II. Fissuras térmicas em idades iniciais;
- III. Fissuras por retração de secagem;
- IV. Fissuras por sobrecarga (WU *et al.*, 2024).

Além dessas, existem fissuras não estruturais relacionadas a fenômenos como reação álcali-agregado e corrosão das armaduras. A gravidade de uma fissura depende de sua extensão, abertura e profundidade, pois aumentam a permeabilidade do concreto e favorecem a entrada de agentes agressivos. Assim, a prevenção, o controle e o reparo adequado da fissuração são fundamentais para garantir a durabilidade das estruturas (SINGH *et al.*, 2024).

2.4.1.1 Fissuras por assentamento e retração plástica do concreto

Nas primeiras horas após a concretagem, ocorrem o assentamento e a exsudação dos materiais componentes do concreto. A obstrução desse movimento

por armaduras ou agregados graúdos gera tensões internas, resultando em fissuração por assentamento plástico (SHAIKH *et al.*, 2024).

Concretos muito fluídos, sujeitos à elevada exsudação, apresentam maior risco de fissuração. A utilização de aditivos incorporadores de ar e o aumento do cobrimento das armaduras superiores são práticas recomendadas para minimizar este tipo de fissura (WU *et al.*, 2024).

A retração plástica ocorre pela evaporação rápida da água superficial, especialmente em condições de alta temperatura e baixa umidade relativa. Essas fissuras são normalmente rasas e paralelas, espaçadas entre 0,3 m e 1,0 m, e podem ser mitigadas por técnicas de cura adequada, como proteção física da superfície exposta (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

2.4.1.2 Fissuras por retração autógena do concreto

A retração autógena é causada pela perda de água dos poros capilares do concreto durante a hidratação, sem variação externa de carga ou temperatura. Esse fenômeno é mais pronunciado em concretos de alto desempenho, caracterizados por baixa relação água/cimento e utilização de adições minerais (SANTOS *et al.*, 2023).

2.4.1.3 Fissuras por expansão do concreto

Em situações onde há absorção excessiva de água durante a hidratação, o concreto pode apresentar expansão. Esse fenômeno, embora geralmente muito menor que a retração, pode se tornar relevante em concretos mais leves (WU *et al.*, 2024).

Expansões químicas associadas à presença de óxidos livres (CaO e MgO) no clínquer do cimento, ou à reação álcali-carbonato, também podem induzir fissuração por expansão ao longo do tempo (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

2.4.1.4 Fissuras por retração de secagem

A retração de secagem resulta da evaporação da água livre dos poros do concreto, gerando tensões internas que, se superarem a resistência do material, provocam fissuras (SINGH *et al.*, 2024).

Fatores como temperatura ambiente elevada, baixa umidade relativa e geometrias desfavoráveis da estrutura aumentam a suscetibilidade à retração de secagem. O uso de aditivos redutores de retração e uma cura eficaz são estratégias recomendadas para mitigar esse tipo de fissuração (SHAIKH *et al.*, 2024).

2.4.1.5 Fissuras por movimentação térmica

As fissuras térmicas ocorrem devido à expansão e contração dos materiais constituintes do concreto em resposta às variações de temperatura. Nas primeiras idades, o calor de hidratação do cimento provoca gradientes térmicos internos que podem gerar tensões de tração suficientes para induzir fissura (WU *et al.*, 2024).

Esses efeitos são mais críticos em grandes volumes de concreto e podem ser controlados por ações como o uso de cimentos de baixo calor de hidratação, controle da temperatura do concreto lançado e previsão de juntas de dilatação adequadas (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

2.4.1.6 Limites para abertura de fissuras

O controle da abertura das fissuras é essencial para assegurar a durabilidade das estruturas de concreto armado. De acordo com a NBR 6118:2023, os limites máximos de abertura variam conforme a classe de agressividade ambiental, sendo:

Tabela 4. Classificação dos limites de abertura de fissuras.

Classe de Agressividade	Abertura Máxima da Fissura (mm)
I (Fraca)	0,4 mm
II (Moderada)	0,3 mm

Classe de Agressividade	Abertura Máxima da Fissura (mm)
III (Forte)	0,2 mm
IV (Muito Forte)	0,2 mm

Fonte: ABNT NBR 6118 (2023).

A limitação da abertura de fissuras visa reduzir a entrada de agentes agressivos, protegendo as armaduras e aumentando a vida útil da estrutura (ABNT, 2023).

2.5 TIPOS DE ADITIVOS PARA CONCRETO

Existem diversos tipos de aditivos empregados na produção de concreto, cada um com funções específicas. Abaixo estão os principais tipos de aditivos utilizados na engenharia civil:

- I. **Aditivos Plástificantes e Superplástificantes:** Servem para aumentar a trabalhabilidade do concreto sem precisar acrescentar mais água. Os superplástificantes, em particular, são empregados quando se deseja aumentar a fluidez do concreto em misturas com baixa relação água/cimento, resultando em concretos com maior resistência (COUTO *et al.*, 2013);
- II. **Aditivos Retardadores de Pega:** São utilizados para prolongar o tempo de pega do concreto, especialmente em condições de altas temperaturas ou quando se deseja maior controle sobre o processo de cura. Eles são essenciais em obras de grande porte ou com grandes volumes de concreto, como no caso de fundações e lajes (PIMENTA, 2022);
- III. **Aditivos Aceleradores de Pega:** Ao contrário dos retardadores, os aceleradores de pega reduzem o tempo do processo de enrijecimento. São especialmente úteis em condições de baixas temperaturas ou

quando há a necessidade de agilizar a execução da obra, permitindo que as formas sejam removidas mais rapidamente (COUTINHO, 2002);

- IV. **Aditivos Incorporadores de Ar:** Aditivos que introduzem pequenas bolhas de ar no concreto, aumentando sua resistência ao congelamento e descongelamento. São usados em concreto exposto a climas severos, onde a resistência à ciclagem térmica é fundamental (NEVILLE, 2016);
- V. **Aditivos Cristalizantes:** Esses aditivos reagem com os poros do concreto, formando cristais insolúveis que bloqueiam a passagem de água, tornando o concreto impermeável. São particularmente eficazes em obras onde a impermeabilidade e a durabilidade são essenciais, como em estruturas subterrâneas e fundações (XYPEX, 2020);
- VI. **Aditivos de Cura:** São usados para melhorar a cura do concreto, evitando a perda excessiva de água da mistura durante a fase inicial de cura, o que pode comprometer o desenvolvimento da resistência. Uma cura bem conduzida é fundamental para assegurar que o concreto alcance as propriedades mecânicas projetadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014);
- VII. **Aditivos de Impermeabilização:** Aditivos químicos que tornam o concreto mais resistente à água, protegendo-o contra infiltrações e corrosões. Esse tipo de aditivo é fundamental em locais onde a estrutura será exposta a ambientes agressivos, como áreas costeiras ou subterrâneas (SOARES, 2014).

2.5.1 Aditivos cristalizantes

Os aditivos cristalizantes são compostos químicos adicionados ao concreto no momento de sua produção, com o objetivo principal de reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, aumentar a vida útil das edificações. Eles são classificados como aditivos impermeabilizantes por cristalização integral, atuando diretamente nos poros e fissuras internas do concreto (WU *et al.*, 2024; NASCIMENTO *et al.*, 2024).

Normalmente, a dosagem dos aditivos cristalizantes varia entre 0,8% e 2,5% em relação à massa do cimento, conforme orientação dos fabricantes. Sua composição típica inclui cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreadores químicos. Os compostos presentes reagem com a água disponível no concreto, formando cristais insolúveis que obstruem os poros capilares e microfissuras, reduzindo a absorção capilar e a penetração de água (SNOECK et al., 2023).

O processo de cristalização depende da presença de umidade: os cristais se formam e crescem no interior dos poros somente na presença de água, o que garante um sistema dinâmico de proteção, ativando-se sempre que a estrutura estiver exposta a ambientes úmidos (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2024). Em condições de secura, os compostos cristalizantes permanecem inertes, reiniciando sua atuação com o retorno da umidade.

De acordo com alguns estudos, os aditivos cristalizantes tem sua classificação como PRAH (*Permeability-Reducing Admixtures for Hydrostatic conditions*), sendo indicados não apenas para reduzir a permeabilidade, mas também para promover a autocicatrização de microfissuras em estruturas de concreto expostas a pressões hidrostáticas (SHAIKH et al., 2024).

A eficiência do processo depende de fatores como a porosidade original do concreto, o consumo de cimento, a compactação da mistura e a continuidade da cura úmida, que favorecem a formação dos cristais dentro da matriz cimentícia (WU et al., 2024).

2.5.1.1 Influência do aditivo cristalizante no concreto

O mecanismo de ação dos aditivos cristalizantes no concreto baseia-se na formação de silicato de cálcio hidratado e precipitados bloqueadores, que selam capilares e microfissuras, elevando tanto a impermeabilidade quanto as propriedades mecânicas e de durabilidade do material (DE BELIE et al., 2024).

Concretos com aditivos cristalizantes mostram redução significativa da permeabilidade e selamento progressivo de microfissuras, com ganhos apresentando resistência à compressão de 7 % a 10 % em condições de cura adequadas (SHAIKH et al., 2024; SINGH et al., 2024).

Esses aditivos também diminuem a difusão de cloretos, protegendo as armaduras contra corrosão, especialmente em ambientes com ciclos de molhagem e secagem, nos quais a taxa de autocicatrização e a manutenção da impermeabilidade se acentuam (SNOECK *et al.*, 2023).

A cristalização se ativa eficazmente em fissuras de até 0,5 mm, em contato intermitente com água quando os aditivos reagem com hidróxido de cálcio e óxidos metálicos da matriz, promovendo o crescimento de cristais selantes (SNOECK *et al.*, 2023).

Novas formulações combinam aditivos cristalizantes com polímeros superabsorventes (PSA) e compostos pozolânicos para ampliar o selamento e a resistência química em meios agressivos. Contudo, ainda são necessários estudos para padronizar métodos de ensaio e quantificar o grau de cura autônoma em diferentes condições (DE BELIE *et al.*, 2024).

2.5.1.3 Adição do aditivo cristalizante

Os aditivos cristalizantes funcionam estimulando a formação de cristais insolúveis que ocupam capilares e microfissuras na matriz cimentícia, aumentando a impermeabilidade e a durabilidade do concreto. O mecanismo decorre de reações químicas entre os constituintes do aditivo e os produtos da hidratação do cimento, resultando em estruturas cristalinas estáveis que dificultam a penetração de água e de íons agressivos. (ZHAO *et al.*, 2021; KIM & PARK, 2022).

Além da barreira física, esses aditivos apresentam efeito autocicatrizante: em presença de umidade, reagem para preencher trincas finas, mantendo a integridade da matriz concreta e retardando processos patológicos (LI *et al.*, 2023). Esse mecanismo é especialmente útil em regiões críticas, como fundações submersas e túneis.

Estudos recentes demonstram redução significativa da permeabilidade a cloretos e sulfatos em concretos com aditivos cristalizantes, comparados a traços convencionais. Testes de penetração de íons revelam diminuição de até 60 % na ingressão de cloretos, retardando a corrosão das armaduras (GARCÍA-NIETO & PÉREZ-FERNÁNDEZ, 2022; WANG *et al.*, 2024).

Para maximizar os benefícios, a dosagem e o método de incorporação devem ser ajustados ao tipo de cimento, agregados e condições ambientais. Ensaios de compatibilidade garantem que o aditivo não interfira na trabalhabilidade ou no tempo de pega, evitando fragilidades no concreto (Fernandes et al., 2021; Oliveira & Souza, 2023).

2.5.1.3 Efeitos do aditivo cristalizante na redução de fissuras

A fissuração do concreto é um dos principais fatores que comprometem a durabilidade e a vida útil das estruturas. Ela permite a entrada de agentes agressivos, como cloretos, dióxido de carbono e sulfatos, acelerando processos de degradação, como a corrosão das armaduras e a carbonatação. Assim, o uso de aditivos cristalizantes aparece como uma tecnologia eficaz para a redução da fissuração e a melhoria da durabilidade do concreto (EL-ANSARY *et al.*, 2024).

Os aditivos cristalizantes são compostos químicos que, quando incorporados à matriz do concreto, reagem com os compostos da hidratação do cimento e a umidade presente nos poros e microfissuras, formando cristais insolúveis que bloqueiam os caminhos da água e de outros agentes agressivos. Essa reação resulta na diminuição da permeabilidade e na redução do tamanho e da quantidade de fissuras ativas, contribuindo para a autosselagem do concreto (SILVA FILHO, 2011; GALLI, 2023).

Diversos estudos recentes demonstram que a incorporação de aditivos cristalizantes pode melhorar expressivamente a capacidade de o concreto se autocicatrizar. Essa capacidade é especialmente importante para estruturas expostas a ambientes agressivos, como fundações, túneis, reservatórios de água e obras marítimas. A formação contínua de cristais no interior do concreto permite a restauração parcial da estanqueidade do material mesmo após o aparecimento de microfissuras (WU *et al.*, 2024).

Além disso, os aditivos cristalizantes apresentam benefícios adicionais, como a redução da absorção capilar, o aumento da resistência química e a diminuição da necessidade de manutenções corretivas ao longo do ciclo de vida da estrutura (SINGH *et al.*, 2024).

Dessa forma, o uso de adições cristalizantes representa uma estratégia eficiente para aumentar a durabilidade, a sustentabilidade e o desempenho global das estruturas de concreto, alinhando-se às demandas atuais da construção civil por soluções mais duráveis e de menor impacto ambiental.

2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARRREDURA (MEV) NA ANÁLISE DA AUTO CICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de alta resolução utilizada para a caracterização morfológica e microestrutural de materiais, permitindo observar a superfície de amostras com aumento muito superior ao da microscopia óptica convencional. Na análise de autocicatrização do concreto, a MEV é empregada para visualizar diretamente a formação de produtos de preenchimento nas fissuras, como cristais de carbonato de cálcio ou estruturas derivadas de aditivos cristalizantes (WU *et al.*, 2024)

Por meio da MEV, é possível avaliar qualitativamente a extensão da cicatrização, observando se os poros e fissuras foram efetivamente preenchidos, bem como analisar a natureza dos produtos de autocicatrização formados. Essa análise permite uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos na recuperação das propriedades do concreto (GONZÁLEZ-GARCÍA *et al.*, 2024).

A preparação das amostras para análise em MEV geralmente inclui a secagem controlada e o recobrimento com uma fina camada de ouro ou carbono, a fim de tornar a superfície condutiva e evitar o acúmulo de cargas elétricas durante o exame. Dessa forma, a MEV se apresenta como uma ferramenta essencial para confirmar, em nível microestrutural, a eficácia dos aditivos cristalizantes na autocicatrização do concreto, complementando os ensaios macroscópicos de permeabilidade e resistência.

2.7 ENSAIO DE SLUMP

O chamado slump test, ensaio de abatimento do tronco de cone, é um método muito utilizado para determinar a consistência do concreto fresco, configurando-se como uma das formas mais simples e práticas de verificação da trabalhabilidade em canteiro de obras. Regulamentado pela ABNT NBR NM 67, o procedimento consiste no preenchimento de um molde cônico com o concreto fresco em três camadas sucessivas, cada uma adensada com auxílio de uma haste metálica. Após a retirada vertical do molde, determina-se o abatimento, isto é, a diferença entre a altura original do molde e a altura final da amostra moldada (SILVA *et al.*, 2022).

O resultado do ensaio permite classificar o concreto quanto ao seu grau de fluidez. Abatimentos reduzidos (entre 10 e 40 mm) caracterizam concretos secos e pouco plásticos, enquanto valores elevados (superiores a 160 mm) indicam concretos bastante fluidos. Esse parâmetro é essencial para garantir a adequação do material às condições de lançamento e adensamento, sobretudo em peças com armaduras densas ou formas de geometria complexa (OLIVEIRA; NASCIMENTO; LIMA, 2023).

Entretanto, o *slump test* apresenta limitações, uma vez que não fornece informações completas sobre a trabalhabilidade. Aspectos como a composição do cimento, a granulometria dos agregados, a quantidade de água e o uso de aditivos podem alterar o abatimento sem refletir, necessariamente, o comportamento do concreto em serviço. Dessa forma, para concretos com aditivos superplastificantes ou que exijam elevada fluidez, recomenda-se a realização de ensaios complementares, como o de espalhamento em mesa de fluxo (*flow table*), cada vez mais difundido em pesquisas recentes (RODRIGUES; TEIXEIRA; COSTA, 2021).

2.8 PATENTE DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

O desenvolvimento de equipamentos voltados para o ensaio de materiais de construção tem assumido papel cada vez mais relevante no cenário da inovação tecnológica e no avanço das normas técnicas. As patentes associadas a esses dispositivos asseguram não apenas a proteção intelectual de seus inventores, mas também contribuem para a melhoria da qualidade e da confiabilidade dos ensaios,

aspectos fundamentais para garantir a segurança e a durabilidade das edificações (SILVA *et al.*, 2022).

Com a modernização das exigências normativas, como a atualização da ABNT NBR 6118:2023 destinadas a estruturas de concreto armado, cresce a demanda por instrumentos de medição mais precisos, automatizados e capazes de fornecer análises detalhadas do comportamento dos materiais. Nesse contexto, a pesquisa e o registro de patentes envolvendo dispositivos de caracterização da resistência à compressão, à tração, além da avaliação de propriedades térmicas e acústicas, tornam-se essenciais para o progresso da construção civil (RODRIGUES; ALMEIDA, 2023).

As patentes também desempenham papel estratégico ao fomentar a competitividade industrial, possibilitando que universidades, centros de pesquisa e empresas privadas se destaquem no mercado nacional e internacional. De acordo com Martins e Costa (2021), o número de pedidos de patentes relacionados a equipamentos de ensaio de materiais de construção cresceu cerca de 18% no Brasil entre 2020 e 2022, reflexo do amadurecimento do setor e do aumento dos investimentos em inovação tecnológica.

A proteção intelectual exige que o equipamento seja inédito, apresente aplicação industrial e envolva atividade inventiva, conforme os critérios da Lei da Propriedade Industrial (Lei nº 9.279/1996). Estudos recentes apontam que tecnologias emergentes, como sensores embutidos, monitoramento remoto e sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT), figuram entre as principais áreas de depósito de patentes no campo dos ensaios de materiais de construção (GONÇALVES *et al.*, 2022).

A relevância estratégica das patentes também se manifesta na transferência de tecnologia e na cooperação universidade-empresa. Projetos conjuntos têm possibilitado a criação de novos equipamentos, como máquinas de ensaio multiaxial voltadas para concretos de alta resistência, que já se encontram patenteadas e em fase de comercialização (FERREIRA; LIMA; SANTOS, 2024).

Assim, a busca por inovação nos ensaios de materiais, aliada à proteção por patentes, consolida-se como um dos pilares do avanço tecnológico da construção civil contemporânea.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a realização dos estudos de autocicatrização dos corpos de prova de concreto e a influência do uso de aditivos cristalizantes. Foram analisadas as propriedades do concreto nos estados fresco e no estado endurecido nos períodos de 7, 14 e 28 dias, além de ensaios complementares aos 56 e 90 dias de cura.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para a condução dos estudos, a pesquisa foi dividida em quatro etapas. Na primeira etapa, foram selecionados os aditivos cristalizantes e os agregados utilizados na composição do concreto. Na segunda etapa, definiram-se os métodos de ensaio e realizou-se a identificação e criação de um equipamento específico para os estudos, considerando que os aditivos cristalizantes atuam em presença de água. Na terceira etapa, foram realizadas as análises do concreto nos estados fresco e endurecido. Por fim, na quarta e última etapa, foram conduzidos os ensaios de autocicatrização dos corpos de prova no equipamento patenteado, durante um período contínuo de 30 dias. Cada uma dessas etapas será detalhada ao longo deste trabalho.

Neste estudo, foram consideradas as seguintes variáveis experimentais:

- I. **Aglomerante:** Cimento Portland Composto do tipo CPIII, 350 kg/m³;
- II. **Aditivos cristalizantes:** dois tipos distintos, ambos adicionados na proporção de 1% em relação ao volume total do concreto;
- III. **Idade de indução das fissuras:** aos 7, 14, 28, 56 e 60 dias;
- IV. **Condição de cura:** cura submersa;
- V. **Tempo de exposição no equipamento com fornecimento contínuo de água:** 30 dias;
- VI. **Quantidade de traços:** foram realizados três traços de referência, três traços para a Amostra 1 e três traços para a Amostra 2, totalizando

nove traços ao todo. Cada conjunto foi moldado em datas distintas: 26/02/2024, 10/05/2024 e 04/09/2024;

- VII. **Quantidade de corpos de prova:** para cada traço, foram moldados 20 corpos de prova, totalizando 180 corpos de prova. O equipamento patenteado comporta até 12 corpos de prova por ciclo. Para cada ensaio de auto cicatrização, foram ensaiados quatro corpos de prova de Referência, quatro da Amostra 1 e quatro da Amostra 2, permitindo uma comparação simultânea e equilibrada entre os três tipos de concreto.

3.2 EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

Os ensaios demandaram equipamentos específicos, selecionados conforme requisitos das normas técnicas aplicáveis. A seguir, são apresentados os principais dispositivos utilizados e suas respectivas funções nos testes.

3.2.1 Equipamentos Patenteado (Deposito nº BR 10 2024 09216-7)

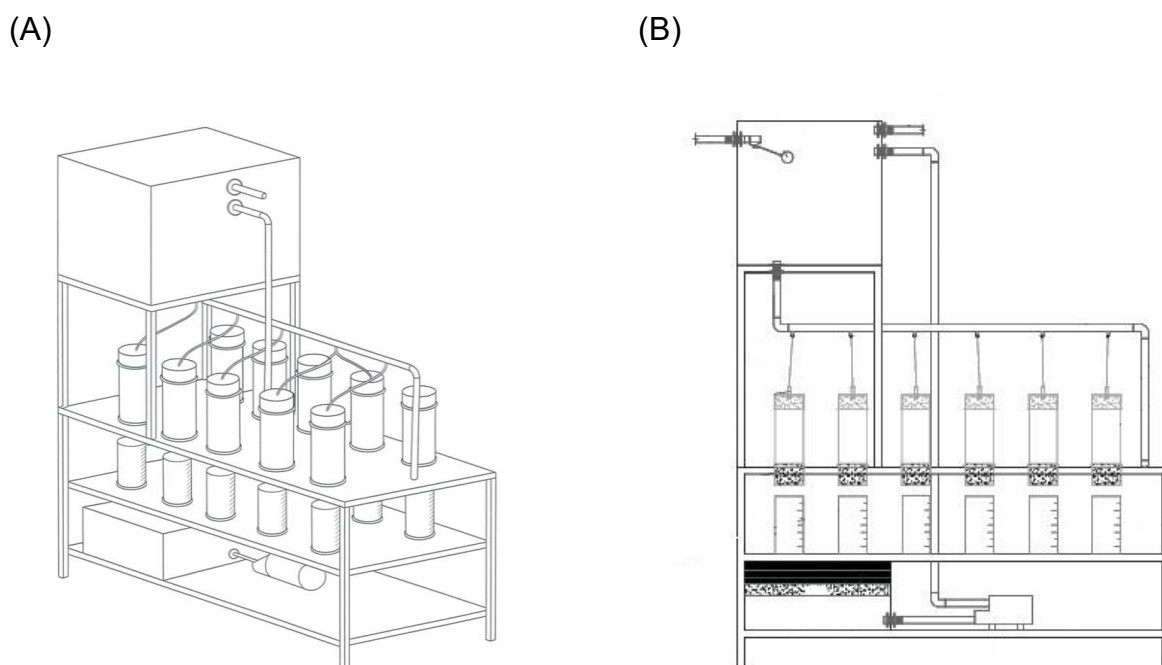
Com o objetivo de avaliar a capacidade de auto cicatrização do concreto, foi desenvolvido um equipamento específico, projetado e patenteado pelo autor, capaz de mensurar a vazão de água por gravidade através de corpos de prova previamente fissurados. O dispositivo permite a quantificação da redução da permeabilidade ao longo do período de 30 dias, com base em metodologia adaptada a partir de princípios estabelecidos em ensaios de estanqueidade. A estrutura da máquina foi concebida para garantir repetibilidade dos ensaios, com capacidade de 12 corpos de prova, controle preciso do fluxo e facilidade de operação em ambiente laboratorial.

Antes do depósito do pedido de patente, foi conduzido um estudo técnico por uma empresa especializada, contratada para verificar a viabilidade da proteção intelectual do equipamento e averiguar a existência de tecnologias similares já disponíveis no mercado. A análise concluiu que o dispositivo apresentava caráter inédito e aplicação industrial, validando os critérios para patenteabilidade. Com base

nesse parecer, foi protocolado o pedido de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o número de depósito BR 10 2024 09216-7.

As Figuras 1-A e 1-B apresentam a representação gráfica (vista lateral e isométrica) do equipamento desenvolvido e patenteado para a realização dos ensaios de autocicatrização.

Figura 1. Representação gráfica do equipamento patenteado: (a) Vista isométrica; (b) Vista Lateral.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2024).

O equipamento desenvolvido foi projetado para avaliar a eficiência da autocicatrização de fissuras em corpos de prova de concreto com aditivo cristalizante. As amostras, previamente fissuradas, foram posicionadas nas câmaras do equipamento, permanecendo em contato contínuo com água. O objetivo foi simular a exposição à umidade e acompanhar a possível redução na passagem de água ao longo do tempo, resultado da ação selante promovida pelos cristais formados na parte interna das fissuras.

Durante o ensaio, foram realizadas coletas periódicas dos volumes de água escoados, permitindo uma análise comparativa entre os corpos de prova com e sem aditivo. As condições ambientais foram controladas para garantir uniformidade. A redução da passagem de água indicou a eficácia do aditivo na obstrução progressiva das fissuras. O equipamento possibilitou um método prático e contínuo de avaliação do processo de auto cicatrização.

Já as Figuras 2-A e 2-B mostram o equipamento montado no laboratório do UniFOA - Centro Universitário de Volta Redonda, com os corpos de prova posicionados para ensaio.

Figura 2. Equipamento patenteado com os corpos de prova em teste: (a) Vista lateral; e (b) Corpos de prova em teste.

(A)



(B)



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2024).

3.2.2 Equipamentos para Mistura do Concreto

Além do dispositivo patenteado desenvolvidos para este estudo, foram utilizados equipamentos convencionais dos laboratórios de construção civil para a execução dos ensaios de caracterização do concreto, em conformidade com as normas da ABNT. Entre os principais equipamentos empregados, destacam-se:

Betoneira: Para a homogeneização dos materiais constituintes do concreto, foi utilizada uma betoneira do tipo basculante, modelo Betoneira 400 Litros Max Pro 2CV Monofásica 220V, fabricada pela empresa CSM. Este equipamento possui

capacidade nominal do tambor de 400 litros, com rendimento efetivo de mistura de aproximadamente 280 litros por ciclo. Seu motor elétrico de 2 CV opera com alimentação monofásica em 220V, frequência de 60 Hz e tambor completa cerca de 28 voltas por minuto durante a operação de mistura, promovendo um desempenho eficiente e contínuo no processo de mistura.

Estufa para Secagem: A estufa foi empregada para a secagem controlada das amostras destinadas às análises microestruturais, com ênfase em observações por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O processo de secagem é uma etapa fundamental para a obtenção de resultados confiáveis nesse tipo de análise, uma vez que a presença de umidade residual pode interferir na qualidade das imagens e na interpretação das características estruturais do material.

O equipamento operou sob temperatura constante de 105 ± 5 °C, valor comumente adotado em procedimentos laboratoriais para a remoção da água livre, conforme práticas estabelecidas por normas técnicas e protocolos de preparo de amostras. Essa faixa de temperatura garante a eliminação eficaz da umidade sem promover alterações físico-químicas significativas na estrutura do material analisado.

Balança de precisão: As operações de pesagem dos componentes do concreto, bem como a determinação das massas dos corpos de prova ao longo das diferentes fases dos ensaios, foram realizadas com o uso de balança eletrônica do tipo bancada, modelo BCW 30 LCD. O equipamento apresenta capacidade máxima de 30 kg, carga mínima de 200 g, e divisão mínima de 10 g, o que permite leituras com resolução adequada para o controle das massas envolvidas nos procedimentos experimentais.

Peneiras de Granulometria: A caracterização dos agregados miúdos e graúdos foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR NM 248:2003, Agregados - Determinação da composição granulométrica, a qual define a metodologia para análise da distribuição das partículas por meio de peneiramento mecânico. Essa verificação é fundamental para garantir a qualidade e a uniformidade dos materiais utilizados na dosagem do concreto.

De acordo com a norma, a amostra de agregado deve ser submetida a um processo de peneiramento utilizando peneiras com aberturas normalizadas, dispostas em sequência decrescente. Para este ensaio, foi utilizado um conjunto de

peneiras com as seguintes malhas: 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, montadas em coluna sobre um agitador mecânico. Este sistema permitiu a separação eficaz das frações granulométricas, assegurando a reprodutibilidade dos resultados.

O estudo da granulometria possibilitou a determinação da distribuição dimensional dos grãos, possibilitando a verificação da conformidade dos agregados com os requisitos técnicos exigidos e contribuindo para o controle de qualidade na formulação do preparo do concreto.

Fissurometro: O equipamento utilizado foi o modelo DT-076, fabricado pela Indústria Fênix, confeccionado em material plástico resistente e dotado de escala graduada de alta legibilidade. O fissurometro permitiu a identificação de fissuras com abertura mínima da ordem de 0,50 mm, com precisão suficiente para a comparação entre amostras tratadas e não tratadas com o aditivo cristalizante, contribuindo para a análise do desempenho do sistema de impermeabilização interna promovido pelo aditivo.

Além disso, a utilização do fissurômetro possibilitou a padronização das medições, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos. Esse controle metrológico é fundamental em ensaios comparativos, pois assegura que as diferenças observadas entre os corpos de prova estejam diretamente relacionadas ao efeito do aditivo cristalizante e não a variações no processo de leitura. Dessa forma, a análise das fissuras se torna mais consistente e embasada tecnicamente, reforçando a qualidade da análise do sistema de impermeabilização.

Pressão Hidráulica: Os testes de compressão foram executados utilizando uma prensa hidráulica da marca QUALITY SERVICE, modelo YIMC114-7, número de série YIMC114-7/ZH/0257. Este equipamento é projetado especificamente para testes de compressão de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de argamassa e concreto.

A máquina possui capacidade nominal de até 1000 kN (100 toneladas), com sistema de controle automático de carga, garantindo aplicação contínua e uniforme de força, conforme os parâmetros da norma ABNT NBR 5739:2018.

Além disso, a utilização do fissurômetro possibilitou a padronização das medições, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos. Esse controle metrológico é fundamental em ensaios comparativos, pois assegura que as diferenças observadas entre os corpos de prova estejam diretamente relacionadas à ação do aditivo cristalizante e não a variações no processo de leitura. Dessa forma, a análise das fissuras se torna mais consistente e embasada tecnicamente, reforçando a qualidade da avaliação do sistema de impermeabilização.

A velocidade de carregamento foi mantida constante a $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, conforme exigido pela norma, e os resultados foram registrados automaticamente no sistema digital do equipamento. Os corpos de prova foram posicionados de maneira centralizada, com os pratos de compressão previamente limpos e nivelados.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Para análise microestrutural das amostras, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura de alta resolução. As amostras foram preparadas com metalização em ouro, quando necessário, e analisadas sob diferentes ampliações, variando de 100x a 10.000x. As imagens obtidas permitiram a avaliação qualitativa da formação de produtos de hidratação e possíveis microfissuras.

Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test): Para a determinação da consistência do concreto fresco, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR NM 67:1998.

O ensaio foi conduzido utilizando os seguintes equipamentos:

- I. Moldes cônicos metálicos: com dimensões padronizadas de 300 mm de altura, 200 mm de diâmetro na base e 100 mm de diâmetro no topo;
- II. Base metálica plana: utilizada para posicionamento do molde;
- III. Haste de compactação de aço: com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm;
- IV. Régua de aço inoxidável: para medição do abatimento.

O concreto fresco foi depositado no molde em três camadas de volumes aproximadamente iguais, cada uma adensada com 25 golpes da haste metálica.

Após o preenchimento, o molde foi retirado verticalmente, permitindo o escoamento do concreto. O abatimento foi medido imediatamente, por meio da diferença entre a altura original do molde e a altura do ponto mais alto da amostra.

Os ensaios foram realizados em laboratório, com temperatura ambiente controlada de aproximadamente 25 °C.

3.3 MATERIAL PARA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A preparação dos corpos de prova de concreto é fundamental para avaliar a eficácia dos aditivos cristalizantes na redução da permeabilidade e na promoção da cicatrização do material. Os procedimentos adotados para a dosagem e preparação dos corpos de prova estão detalhados a seguir.

3.3.1 Dosagem dos traços

Para a realização dos ensaios, foram moldadas amostras cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A moldagem foi realizada no laboratório do UniFOA, utilizando formas revestidas com capas de PVC, com o objetivo de controlar a formação de trincas de até 5 mm e facilitar a colocação dos corpos de prova no equipamento de ensaio patenteado. Realizamos três traços de referência, três traços para a Amostra 1 e três traços para a Amostra 2, totalizando nove traços experimentais.

Foram utilizadas duas marcas distintas de aditivos cristalizantes com base química reativa, compostos predominantemente por silicatos especiais que interagem com os produtos de hidratação do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, favorecendo a geração de cristais insolúveis nos poros capilares do concreto. Essa ação contribui para o aumento da impermeabilidade e para a eficiência de autocicatrização do material.

Por motivos de confidencialidade comercial e proteção ao sigilo industrial, os nomes e marcas dos aditivos utilizados não serão divulgados nesta dissertação. Para garantir a rastreabilidade e a padronização durante os ensaios, os aditivos

foram codificados da seguinte forma: o aditivo 1 foi designado como Amostra 1, e o aditivo 2 foi designado como Amostra 2.

A tabela 05 apresenta as dosagens experimentais dos traços de concreto utilizados, incluindo as variações com diferentes aditivos cristalizantes.

Tabela 5. Dosagem do traço.

COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS: MATERIAIS			
	Referência (sem edição)	Amostra 1	Amostra 2
Cimento CIII (kg/m³)	350	350	350
Água (litros)	175	175	175
Agregados Miúdos (kg/m³)	700	700	700
Agregados Graúdos (kg/m³)	1200	1200	1200
Aditivo Cristalizante (%)		1%	1%

Fonte: AUTOR (2025).

3.3.2 Moldagens dos corpos de prova para teste no equipamento patenteado

Para cada traço, foram moldadas 20 amostras envolvidas em uma capa PVC, totalizando 180 corpos de prova. O equipamento patenteado tem capacidade para 12 corpos de provas por ciclo de testagem, sendo 04 corpos de prova referência (sem aditivo cristalizante), 04 corpos de provas nomeado Amostra 1 (com aditivo cristalizante) e 04 corpos de prova nomeado Amostra 2 (com aditivo cristalizante). Esse arranjo permitiu uma comparação simultânea e equilibrada entre os três tipos de concreto, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. Para cada traço foram moldados 20 corpos de prova, os quais foram envolvidos em capa de PVC, totalizando 180 unidades. O equipamento patenteado possui capacidade para 12 corpos de prova por ciclo de ensaio, distribuídos da seguinte forma: 04 corpos de prova de Referência (sem aditivo cristalizante), 04 corpos de prova da Amostra 1 (com aditivo cristalizante) e 04 corpos de prova da Amostra 2 (com aditivo cristalizante).

Cada ciclo foi conduzido ao longo de 30 dias, período no qual realizou-se a aferição da vazão de todos os corpos de prova, possibilitando a observação contínua do desempenho das amostras. Esse arranjo experimental permitiu uma comparação simultânea, equilibrada e sistemática entre os três tipos de concreto, assegurando a confiabilidade e a consistência dos resultados obtidos.

Figura 3. Moldagem dos corpos de prova: (a) Corpos de provas imersos; e (b) Corpos de provas na capa de PVC.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2024).

3.3.3 Cura dos corpos de prova

A cura adequada dos corpos de prova é essencial para garantir o desenvolvimento das propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. Neste estudo, os corpos de prova foram submetidos a um regime de cura controlada e foram retirados em intervalos específicos para avaliação da eficácia do aditivo cristalizante.

Durante o tempo de cura inicial, os corpos de prova foram mantidos imersos em água potável a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ por 28 dias, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Esse método assegura um ambiente ideal para a hidratação do cimento, minimizando a perda de umidade e promovendo o desenvolvimento das propriedades do concreto.

As retiradas dos corpos de prova ocorreram em cinco intervalos distintos: 7, 14, 28, 56 e 90 dias. Esses períodos foram escolhidos para permitir uma análise

progressiva e detalhada do desenvolvimento das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, comparando amostras tratadas com aditivo cristalizante e amostras de referência (sem aditivo). As etapas foram conduzidas da seguinte forma:

I. Retirada aos 7 Dias: Neste estágio inicial, foram realizados ensaios de resistência axial à compressão e capacidade de permeação para uma avaliação preliminar da ação do aditivo cristalizante durante as fases iniciais de hidratação;

II. Retirada aos 14 Dias: Novas amostras foram ensaiadas para monitorar o avanço da resistência à compressão e da permeabilidade. Essa etapa permitiu observar o progresso da formação de produtos cristalinos no interior da matriz de cimento e o início da cicatrização de microfissuras, quando presentes;

III. Retirada aos 28 Dias: Considerado o tempo padrão para a maioria das avaliações mecânicas, os corpos de prova foram submetidos à verificação da resistência à compressão, resistência à fissuração e índice de permeabilidade. Nesta etapa, buscou-se uma avaliação mais completa do desempenho do aditivo;

IV. Retirada aos 56 Dias: Ensaio adicionais foram conduzidos para verificar o comportamento prolongado do concreto, especialmente em relação à evolução da resistência mecânica e à redução da permeabilidade. Este ponto intermediário é útil para observar se os efeitos do aditivo cristalizante continuam se desenvolvendo além do período usual de cura;

V. Retirada aos 90 Dias: Na etapa final, os corpos de prova foram analisados com foco em durabilidade, resistência à compressão tardia e cicatrização de fissuras. A comparação com os resultados anteriores visou avaliar a eficácia sustentada do aditivo ao longo do tempo, considerando que produtos cristalinos continuam a se formar em presença de umidade, conforme descrito em diversos estudos sobre autocicatrização.

Os resultados de cada intervalo de coleta foram registrados e analisados para comparar o desempenho dos corpos de prova tratados com aditivo cristalizante em relação aos não tratados. Esta análise incluiu a avaliação da resistência à compressão, resistência à fissuração e permeabilidade, contribuindo para uma

compreensão abrangente da eficácia do aditivo no processo de cicatrização do concreto.

3.3.4 Ensaio de compressão para avaliação das resistências dos corpos de prova

O ensaio de compressão foi conduzido conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 5739:2018, que especifica o método para a determinação da resistência à compressão em cilindros de concreto. Os corpos de prova utilizados foram moldados e curados de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR 5738:2015, garantindo a conformidade com as práticas recomendadas para obtenção de resultados confiáveis.

3.3.5 Ensaio de ruptura compressão na diametral com controle de fissuras

O ensaio de compressão diametral, foi conduzido conforme a norma ABNT NBR 7222 (2011), que define o procedimento para determinar a resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de concreto e argamassa. Este ensaio é fundamental para avaliar a resistência à tração indireta do concreto, especialmente em estudos que envolvem a eficácia de aditivos cristalizantes.

Para facilitar o manuseio e garantir a integridade dos corpos de prova durante os ensaios, os mesmos foram envolvidos em capas de PVC. Essa abordagem permitiu uma aplicação uniforme da carga e minimizou possíveis danos superficiais que poderiam interferir nos resultados.

Durante o ensaio, o controle e o monitoramento das fissuras foram realizados por meio de um fissurômetro, instrumento utilizado para mensurar com precisão a largura de fissuras, trincas e rachaduras. O equipamento apresenta escalas milimétricas, geralmente entre 0,50 mm e 1,00 mm, possibilitando avaliar a severidade das aberturas e acompanhar sua evolução ao longo do tempo. Essa prática permitiu uma análise detalhada do comportamento do concreto sob tensão, viabilizando a identificação da formação e da propagação das fissuras ao longo do carregamento.

Os resultados obtidos foram comparados entre os corpos de prova com e sem aditivos cristalizantes, proporcionando uma análise abrangente do desempenho do material em relação à resistência à tração e ao controle de fissuras.

Nas Figuras 4 e 5 mostrar o teste de compressão axial com controle das fissuras para colocação no equipamento patenteado.

Figura 4. Teste de compressão axial.



Fonte: AUTOR (2025).

Figura 5. Teste de compressão axial com controle de fissuras.



Fonte: AUTOR (2025).

3.3.6 Teste de vazão da água pelos corpos de prova, utilizando o equipamento desenvolvido pelo autor

Com o objetivo de avaliar a capacidade de auto cicatrização do concreto, foram realizados ensaios de vazão de água em corpos de prova cilíndricos, utilizando um equipamento desenvolvido e patenteado pelo autor. Este equipamento foi projetado para permitir a passagem de água por gravidade através das amostras, simulando condições reais de infiltração.

Foram testadas três amostras distintas, cada uma contendo diferentes tipos de aditivos cristalizantes fornecidos por fabricantes distintos. A comparação entre as amostras permitiu avaliar a eficácia relativa de cada aditivo na promoção da autocicatrização das fissuras. Os resultados indicaram que as amostras com aditivos cristalizantes apresentaram uma redução significativa na taxa de vazão de água ao

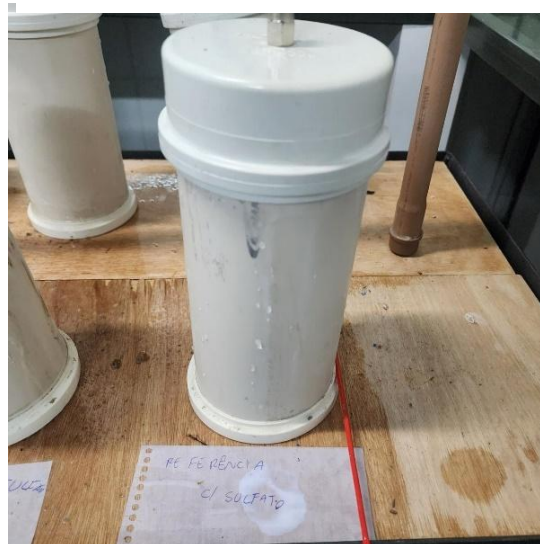
longo do tempo, evidenciando a formação de produtos de hidratação que obstruíram as fissuras e poros do concreto. Como podemos ver nas Figuras 6 e 7 abaixo:

Figura 6. Corpos de provas em teste no equipamento patenteado.



Fonte: AUTOR (2025).

Figura 7. Teste de vazão no equipamento patenteado.



Fonte: AUTOR (2025).

3.4 DESENVOLVIMENTO E PEDIDO DE PATENTE DO EQUIPAMENTO PARA CONTROLE DE VAZÃO NOS CORPOS DE PROVA

Para este estudo, foi desenvolvido um equipamento específico com o objetivo de mensurar a vazão de água em corpos de prova de concreto fissurados, permitindo avaliar com precisão a eficácia de aditivos cristalizantes no processo de autocicatrização. O sistema baseia-se em um conceito de fluxo gravitacional, operando em circuito fechado. Um reservatório elevado armazena a água e a conduz por gravidade sobre os corpos de prova, posicionados em compartimentos individuais e envoltos por capas de PVC com 100 mm de diâmetro, direcionando o fluxo diretamente às fissuras induzidas por ensaio de ruptura diametral.

O equipamento comporta até 12 corpos de prova simultaneamente, viabilizando análises paralelas em diferentes amostras. Sob cada compartimento, béqueres coletam diariamente a água percolada, permitindo a medição da vazão ao longo do tempo.

Para garantir a confiabilidade dos dados, cada compartimento é isolado, evitando interferências entre os ensaios, e um cronômetro digital sincronizado registra com exatidão o tempo de coleta. Visando conter transbordamentos, uma bandeja inferior de captação foi integrada ao sistema, conduzindo o excesso de água a um sistema de filtragem, responsável por remover impurezas antes de armazenar a água em um reservatório inferior.

Em seguida, uma bomba recircula a água de volta ao reservatório superior, permitindo a continuidade dos testes em regime fechado. Esse aparato experimental permitiu não apenas monitorar a evolução da permeabilidade ao longo do tempo, mas também forneceu subsídios técnicos sólidos para avaliar a capacidade de autocicatrização promovida pelos aditivos cristalizantes no concreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DESENVOLVIMENTO E PATENTE DO EQUIPAMENTO

Durante a realização dos ensaios experimentais, identificou-se a necessidade de um equipamento capaz de quantificar com precisão a vazão de água que atravessa fissuras induzidas em amostras de concreto. Essa medição era essencial para a avaliação do desempenho dos aditivos cristalizantes quanto à sua capacidade de promover a autocicatrização das fissuras. Diante da ausência de dispositivos comerciais que atendessem de forma satisfatória aos critérios de sensibilidade e reprodutibilidade necessários, foi desenvolvido um equipamento específico para esse fim.

O dispositivo possibilita o monitoramento da passagem de água ao longo do tempo, permitindo mensurar, de forma confiável, a eficiência dos mecanismos de autocicatrização induzidos pelos aditivos testados. Considerando sua inovação e potencial de aplicação em estudos de durabilidade e patologia das construções, foi solicitado o registro de patente do equipamento junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o número de depósito BR 10 2024 09216-7, demonstrando seu ineditismo e potencial de aplicação em contextos acadêmicos e industriais (BRASIL, 2024), garantindo os direitos sobre a propriedade intelectual do invento.

4.1.1 Resumo do pedido de patente do equipamento

O dispositivo desenvolvido tem como principal objetivo quantificar a vazão de água através de fissuras induzidas em corpos de prova de concreto, com foco na avaliação da eficácia de aditivos cristalizantes no processo de auto cicatrização. A estrutura foi projetada para oferecer testes padronizados e reprodutíveis, com controle rigoroso das condições de ensaio. A modularidade do equipamento permite adaptações conforme o número e o tamanho dos corpos de prova, além de viabilizar diferentes configurações hidráulicas.

O sistema é composto por três módulos principais: alimentação hidráulica, medição e descarte ou recirculação. O módulo de alimentação garante um fornecimento contínuo e controlado de água, o módulo de medição hospeda os corpos de prova e direciona o escoamento sobre as fissuras, e o módulo de descarte ou recirculação otimiza o uso da água, promovendo sustentabilidade. A estrutura foi construída com materiais de baixo custo e alta resistência, priorizando durabilidade e facilidade de transporte.

A portabilidade do equipamento, a modularidade e a facilidade de montagem e desmontagem o tornam adequado para utilização em diversos ambientes, como laboratórios acadêmicos, canteiros de obras e espaços de extensão tecnológica. O sistema foi projetado com ênfase na segurança, evitando contato direto do operador com partes pressurizadas ou zonas de escoamento.

Além do desempenho técnico, a utilização do sistema trouxe benefícios operacionais significativos, tais como: redução no tempo de montagem dos experimentos, facilidade de higienização e manutenção, aumento da segurança do operador e versatilidade para uso em diferentes escalas e contextos. A possibilidade de desmontagem e transporte da estrutura também se mostrou vantajosa, especialmente para aplicações didáticas e projetos de extensão tecnológica em ambientes acadêmicos.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios foram conduzidos utilizando as dosagens dos traços apresentadas na Tabela 5.

4.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco

A análise das propriedades do concreto no estado fresco é fundamental para avaliar sua trabalhabilidade, consistência e comportamento durante a moldagem. Esses parâmetros influenciam diretamente a qualidade da compactação, a homogeneidade da mistura e a durabilidade da estrutura final. Neste item, são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os diferentes traços de

concreto, permitindo a comparação entre os impactos dos aditivos cristalizantes e da composição dos materiais.

Os dados apresentados na Tabela 6 foram obtidos a partir dos corpos de prova moldados em 15/02/2024. Esses parâmetros foram utilizados como referência para a avaliação da resistência à compressão dos concretos, permitindo a comparação direta entre os diferentes traços analisados.

Tabela 6. Propriedades do concreto fresco.

	Referência (sem edição)	Amostra 1	Amostra 2
Relação A/C	0,30	0,30	0,30
Slump (mm)	75	74	70
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,4
Massa Específica (kg/m³)	79,5	80,30	80,3

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2025).

Os dados apresentados na Tabela 7 foram obtidos a partir dos corpos de prova moldados em 10/05/2024. Esses parâmetros serviram de base para a avaliação da resistência à compressão dos concretos, permitindo a comparação direta entre os diferentes traços analisados.

Tabela 7. Propriedades do concreto fresco.

	Referência (sem edição)	Amostra 1	Amostra 2
Relação A/C	0,30	0,30	0,30
Slump (mm)	80	79	75
Ar incorporado (%)	2,4	2,5	2,5
Massa Específica (kg/m³)	79,5	80,3	80,3

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2025).

Os dados apresentados na Tabela 8 foram obtidos a partir dos corpos de prova moldados em 04/09/2024. A quantidade de materiais utilizados para cada traço seguiu as proporções estabelecidas na Tabela 5, garantindo a padronização do procedimento experimental. Esses parâmetros serviram de base para a avaliação da resistência à compressão dos concretos, permitindo a comparação direta entre os diferentes traços analisados.

Tabela 8. Propriedades do concreto fresco.

	Referência (sem edição)	Amostra 1	Amostra 2
Relação A/C	0,30	0,30	0,30
Slump (mm)	77	79	80
Ar incorporado (%)	2,5	2,4	2,6
Massa Específica (kg/m³)	79,5	80,3	80,3

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2025).

4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido é essencial para verificar o desempenho mecânico e a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. Os ensaios realizados neste estágio permitem analisar a resistência à compressão, absorção de água, porosidade e outros parâmetros relevantes para a qualidade final do material. Nesta etapa, foram comparados os efeitos dos aditivos cristalizantes sobre o comportamento do concreto após o período de cura.

4.3.1 Resistência á compressão axial (Mpa)

Os ensaios de resistência à compressão, foram realizados conforme os procedimentos normativos, os resultados apresentados indicam que não houve variações significativas entre os traços com aditivos cristalizantes e o traço de referência. Isso demonstra que a incorporação dos aditivos não comprometeu o

desempenho mecânico do concreto, mantendo-se os níveis de resistência compatíveis com os requisitos estabelecidos.

3.2.1.1 Teste de resistência à compressão (mpa) em corpos de prova de referência (sem aditivo cristalizante)

Os Foram utilizados corpos de prova de referência para cada traço e período de moldagem. Esses parâmetros serviram para avaliar a resistência à compressão dos concretos, possibilitando a comparação direta entre os diferentes traços analisados.

Ressalta-se que os corpos de prova avaliados na Tabela 9 correspondem aos traços de referência, ou seja, produzidos sem a adição de aditivos. Esses resultados foram utilizados como base para verificar se a incorporação de aditivos cristalizantes influencia na resistência à compressão dos concretos.

Neste caso, os ensaios de compressão dos corpos de prova foram realizados sem o uso das capas de PVC, uma vez que o objetivo era analisar a carga máxima suportada por cada corpo de prova.

Tabela 9. Determinação da resistência à compressão axial (MPa) –
Referência (sem aditivo cristalizante).

	Tabela 6 (Média)	Tabela 7 (Média)	Tabela 8 (Média)	Média	Desvio padrão
07 dias	28,3	28,2	28,0	28,2	0,15
14 dias	29,4	29,4	29,4	29,4	0,00
28 dias	31,9	31,4	31,2	31,5	0,36
56 dias	32,5	32,0	32,5	32,3	0,29
90 dias	32,5	32,5	32,5	32,5	0,00

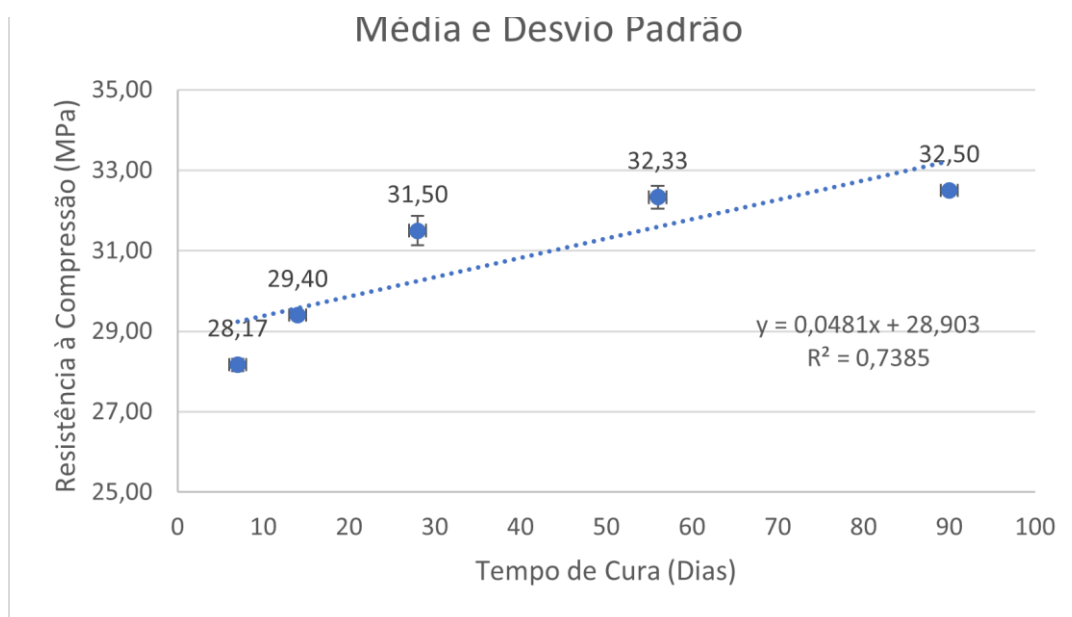
Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 8 apresenta a evolução da resistência à compressão média em função do tempo de cura, com indicação dos respectivos desvios padrão para cada ponto avaliado. Os dados representados referem-se aos corpos de prova de

referência, moldados sem adição de aditivos, conforme discutido anteriormente. Observa-se um aumento gradual na resistência com o avanço da cura, partindo de 28,17 MPa aos 7 dias, atingindo 32,50 MPa aos 90 dias.

A tendência de crescimento é representada por uma linha de regressão linear, com equação $y = 0,0481x + 28,903$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,7385$, indicando uma correlação moderada entre o tempo de cura e a resistência à compressão. Os desvios padrão apresentados em cada ponto evidenciam a variação natural entre os corpos de prova, sendo importantes para avaliar a confiabilidade dos resultados.

Figura 8. Gráfico da média e desvio padrão da resistência à compressão (Mpa) dos corpos de provas referência (sem aditivo cristalizante)



Fonte: AUTOR (2025).

Esses valores médios e suas dispersões servirão como base comparativa para a análise dos traços contendo aditivos cristalizantes, permitindo avaliar a influência desses aditivos no ganho de resistência ao longo do tempo.

4.3.1.2 Teste de resistência à compressão (mpa) em corpos de prova de Amostra 1 (com aditivo cristalizante)

A partir da Tabela 10, os resultados obtidos para a Amostra 1, contendo aditivo cristalizante, foram comparados aos traços de referência (sem aditivo), com o objetivo de avaliar a influência da adição do aditivo na resistência à compressão do concreto. As condições de moldagem e cura seguiram os mesmos parâmetros adotados nos ensaios de referência, garantindo a consistência metodológica e a validade da comparação.

Ao analisar os valores médios e os respectivos desvios padrão da Amostra 1 ao longo do tempo de cura, é possível observar que não temos uma diferença significativa na resistência à compressão em relação aos traços de referência. Essa análise é fundamental para verificar se a presença do aditivo cristalizante contribui efetivamente para o desempenho mecânico do concreto ou se seus efeitos são mais significativos em outras propriedades, como durabilidade ou impermeabilidade.

Ressalta-se que, por razões de sigilo industrial, a marca comercial do aditivo cristalizante utilizado na Amostra 1 não será divulgada. Essa restrição, contudo, não compromete a análise técnica, uma vez que o estudo tem como foco a avaliação do comportamento mecânico do concreto frente à adição de aditivos com propriedades equivalentes.

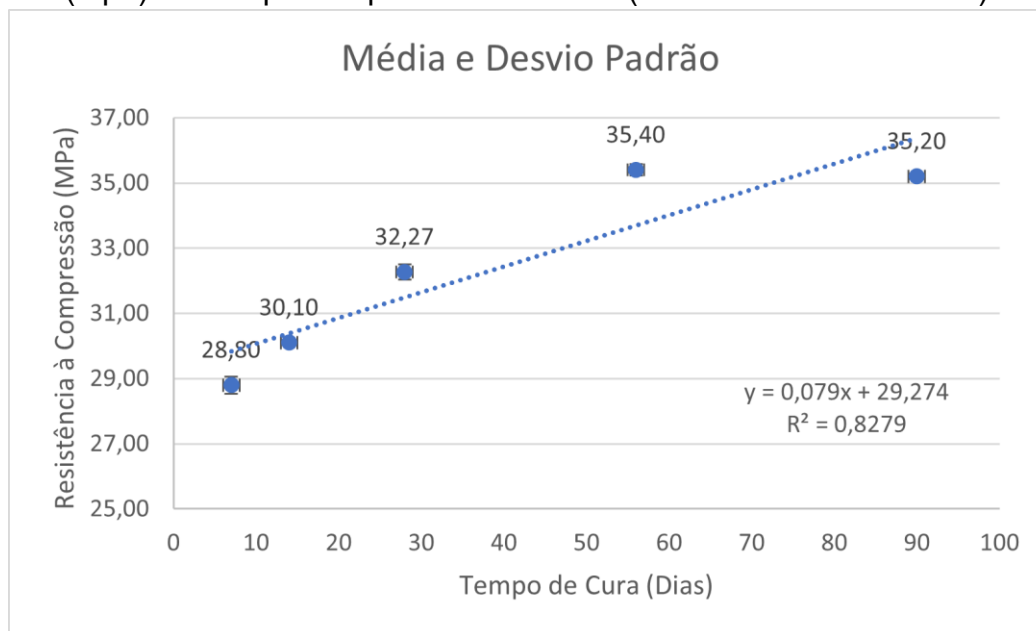
Tabela 9. Determinação da resistência à compressão axial (Mpa) – Amostra 1 (com aditivo cristalizante)

	Tabela 6 (Média)	Tabela 7 (Média)	Tabela 8 (Média)	Média	Desvio padrão
07 dias	28,5	29,0	28,9	28,80	0,26
14 dias	30,1	30,1	30,1	30,10	0,00
28 dias	32,4	32,0	32,4	32,27	0,23
56 dias	35,2	35,5	35,5	35,40	0,17
90 dias	35,2	35,2	35,2	35,20	0,00

Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 9 apresenta a evolução da resistência à compressão média da Amostra 1, com a inclusão de aditivo cristalizante, em função do tempo de cura. O gráfico também exibe os desvios padrão para cada idade de ensaio, fornecendo uma indicação da variabilidade dos resultados.

Figura 9. Gráfico da média e desvio padrão da resistência à compressão (Mpa) dos corpos de provas Amostra 1 (com aditivo cristalizante).



Fonte: AUTOR (2025).

Observa-se um crescimento progressivo da resistência à compressão ao longo do tempo, iniciando com 28,73 MPa aos 7 dias e atingindo 34,30 MPa aos 90 dias de cura. A tendência de aumento da resistência é representada por uma linha de regressão linear com equação $y = 0,0679x + 29,251$, cujo coeficiente de determinação $R^2 = 0,8048$ indica uma correlação forte entre o tempo de cura e o ganho de resistência. Esse coeficiente é superior ao obtido para os traços de referência (sem aditivo), sugerindo uma resposta mais consistente ao longo do tempo.

Comparativamente à Tabela 9 (traços de referência), os valores médios de resistência da Amostra 1 são superiores em todas as idades analisadas, o que indica um potencial efeito positivo da adição do aditivo cristalizante no desenvolvimento da resistência à compressão. No entanto, destaca-se que os desvios padrão, especialmente aos 56 e 90 dias, são mais acentuados, indicando uma maior dispersão nos resultados e, possivelmente, uma menor uniformidade nas amostras testadas.

Esses resultados iniciais indicam que o uso de aditivos cristalizantes pode contribuir para o aumento da resistência mecânica do concreto, especialmente em

idades avançadas de cura, embora a variabilidade dos dados deva ser considerada na análise final de desempenho.

3.3.1.3 Teste de resistência à compressão (Mpa) em corpos de prova de Amostra 2 (com aditivo cristalizante).

A partir da Tabela 11, os resultados obtidos para a Amostra 2, contendo aditivo cristalizante, foram comparados aos traços de referência (sem aditivo), com o objetivo de avaliar a influência da adição do aditivo na resistência à compressão do concreto. As condições de moldagem e cura seguiram os mesmos parâmetros adotados nos ensaios de referência, garantindo a consistência metodológica e a validade da comparação.

Ao analisar os valores médios e os respectivos desvios padrão da Amostra 2 ao longo do tempo de cura, é possível observar que não temos uma diferença significativa na resistência à compressão em relação aos traços de referência. Essa análise é fundamental para verificar se a presença do aditivo cristalizante contribui efetivamente para o desempenho mecânico do concreto ou se seus efeitos são mais significativos em outras propriedades, como durabilidade ou impermeabilidade.

Ressalta-se que, por razões de sigilo industrial, a marca comercial do aditivo cristalizante utilizado na Amostra 2 não será divulgada. Essa restrição, contudo, não compromete a análise técnica, uma vez que o estudo tem como foco a avaliação do comportamento mecânico do concreto frente à adição de aditivos com propriedades equivalentes.

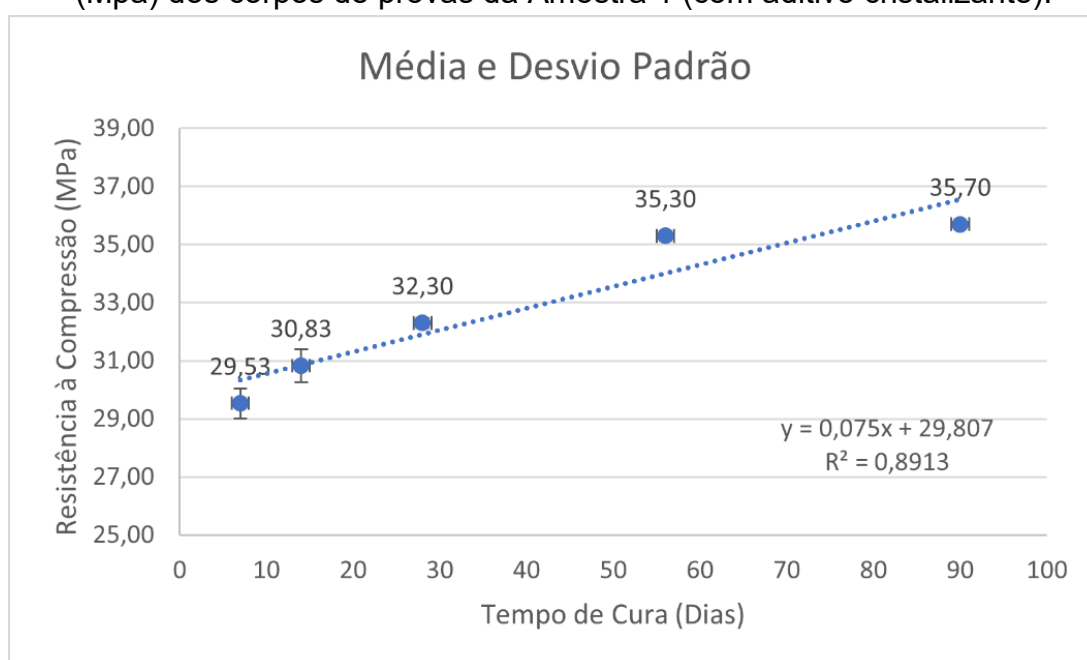
Tabela 10. Determinação da Resistência à compressão axial (Mpa) – Amostra 2 (com Aditivo Cristalizante).

	Tabela 6 (Média)	Tabela 7 (Média)	Tabela 8 (Média)	Média	Desvio padrão
07 dias	29,4	29,1	30,1	29,53	0,51
14 dias	30,5	30,5	31,5	30,83	0,58
28 dias	32,2	32,5	32,2	32,30	0,17
56 dias	35,5	35,2	35,2	35,30	0,17
90 dias	35,7	35,7	35,7	35,70	0,00

Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 16 apresenta os resultados da resistência à compressão da Amostra 02, contendo aditivo cristalizante, ao longo do tempo de cura. Os dados médios e respectivos desvios padrão foram obtidos a partir da média de seis corpos de prova para cada idade. Observa-se um crescimento consistente da resistência à compressão, partindo de 29,53 MPa aos 7 dias e alcançando 35,70 MPa aos 90 dias de cura.

Figura 10. Gráfico da média e desvio padrão da resistência à compressão (Mpa) dos corpos de provas da Amostra 1 (com aditivo cristalizante).



Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 16 apresenta os resultados da resistência à compressão da Amostra 2, contendo aditivo cristalizante, ao longo do tempo de cura. Os dados médios e respectivos desvios padrão foram obtidos a partir da média de seis corpos de prova para cada idade. Observa-se um crescimento consistente da resistência à compressão, partindo de 29,53 MPa aos 7 dias e alcançando 35,70 MPa aos 90 dias de cura.

A tendência de evolução da resistência é descrita por uma equação de regressão linear $y = 0,075x + 29,807$, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,8913$, indicando uma correlação forte entre o tempo de cura e o aumento da

resistência. Este coeficiente é superior aos observados para a amostra de referência e para a Amostra 1, sugerindo um comportamento ainda mais estável e previsível ao longo do tempo.

Em comparação com os traços de referência (tabela 9), a Amostra 2 apresentou um desempenho superior em todas as idades avaliadas. O aditivo cristalizante demonstrou, portanto, um efeito positivo na resistência à compressão, com ganhos significativos especialmente a partir dos 28 dias.

4.4 TESTES DE VAZÃO UTILIZANDO O EQUIPAMENTO PATENTEADO PELO AUTOR

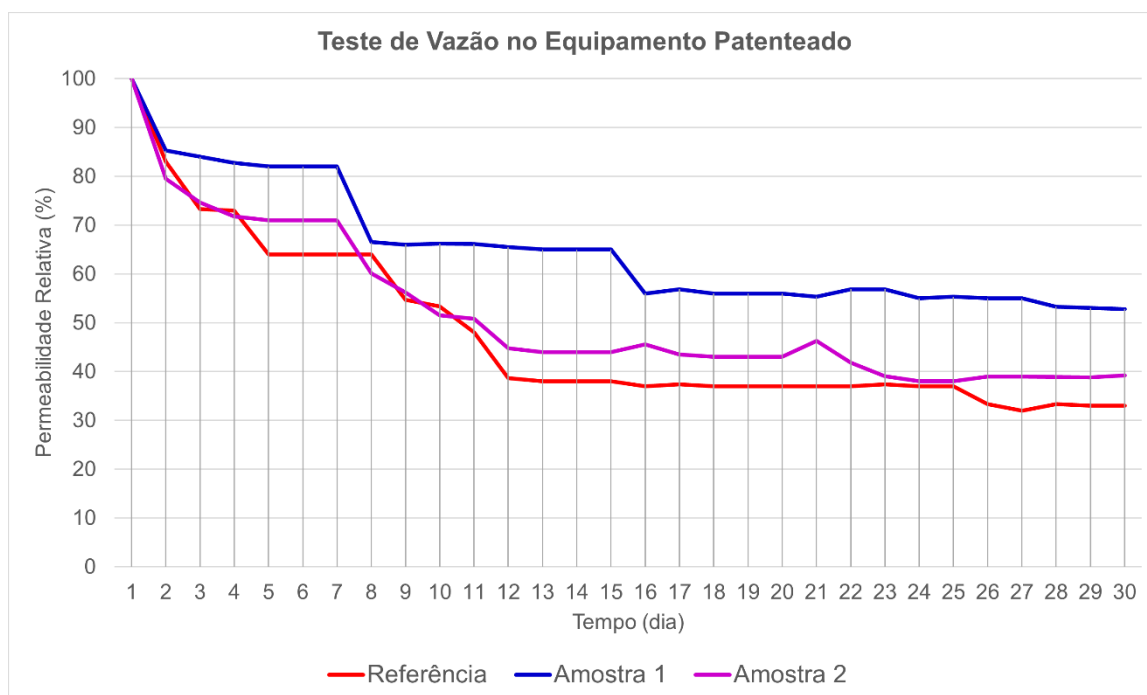
4.4.1 Resultados do teste de vazão do primeiro traço

Entre os dias 26 de fevereiro e 26 de março de 2024, foi realizado um acompanhamento diário de vazão com o objetivo de avaliar a permeabilidade relativa (%) de três diferentes amostras: Referência, Amostra 1 e Amostra 2. Os dados foram obtidos a partir das leituras de vazão (g/min) no equipamento patenteado, permitindo comparar o desempenho dos materiais ao longo de 30 dias.

O gráfico apresenta a evolução da permeabilidade relativa das amostras no período analisado. Observa-se que todas apresentaram tendência de redução gradual, ainda que em diferentes intensidades.

A Referência (linha vermelha) apresentou a maior redução de permeabilidade, atingindo os menores valores ao final do ensaio, o que indica menor capacidade de manter fluxo ao longo do tempo. A Amostra 1 (linha azul), por sua vez, manteve os maiores índices de permeabilidade durante praticamente todo o acompanhamento, mostrando desempenho superior em relação às demais. Já a Amostra 2 (linha rosa) apresentou comportamento intermediário, superior ao da Referência, mas inferior ao da Amostra 1.

Esses resultados sugerem que a Amostra 1 possui maior resistência à perda de permeabilidade e maior estabilidade ao longo do tempo, configurando-se como a alternativa mais promissora para situações em que a manutenção do fluxo é fator crítico de desempenho.

Figura 11. Teste de Vazão no Equipamento Patentado

Fonte: AUTOR (2025).

4.4.2 Resultados do teste de vazão do segundo traço

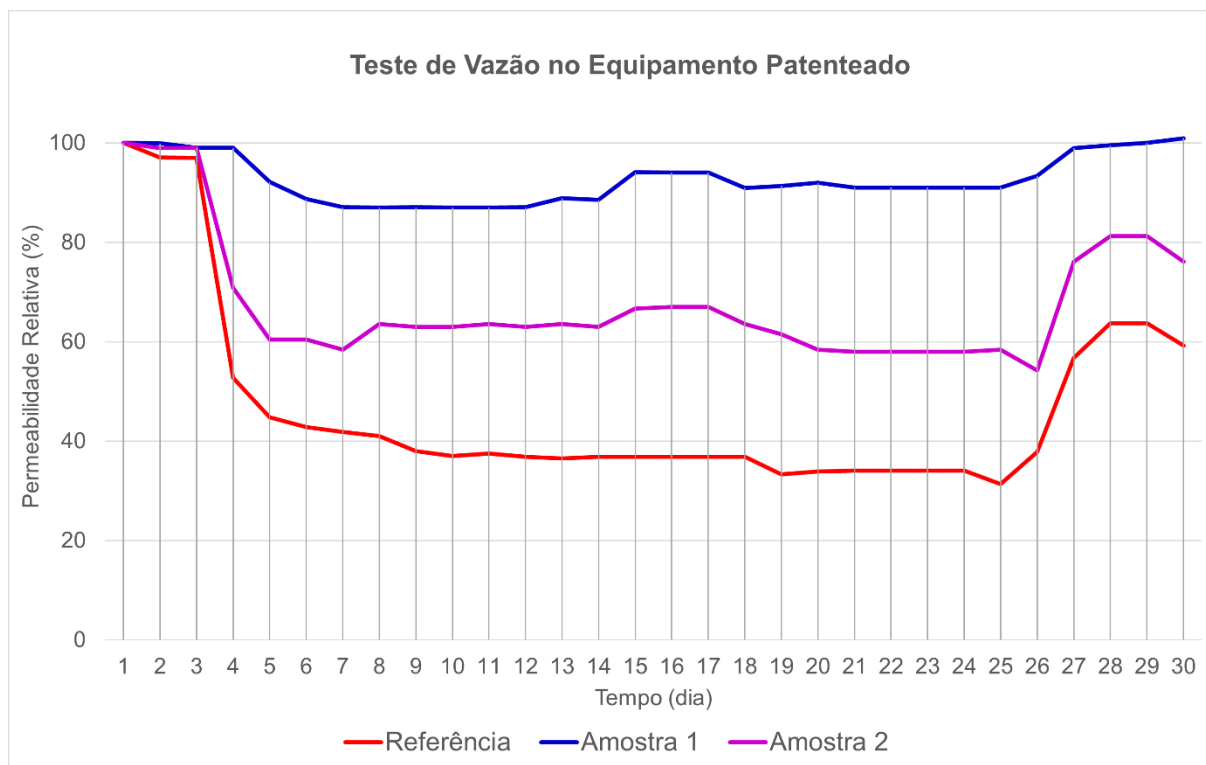
Entre os dias 10 de maio e 08 de junho de 2024, foi realizado um acompanhamento diário de vazão com o objetivo de avaliar a permeabilidade relativa (%) de três diferentes amostras: Referência, Amostra 1 e Amostra 2. Os dados foram coletados com base na leitura da vazão (g/min), permitindo a comparação do desempenho entre os materiais ao longo do tempo.

A Amostra 01 apresentou os melhores resultados durante todo o período avaliado. Mesmo após interrupções, a recuperação de permeabilidade foi rápida, com valores frequentemente superiores a 90% e atingindo novamente a condição inicial nos últimos dias. Essa estabilidade demonstra a eficiência da amostra em manter a vazão e resistir à perda de desempenho, sendo a mais indicada para aplicações prolongadas e exigentes.

A Amostra 2 mostrou desempenho intermediário, com valores de permeabilidade variando entre 50% e 70% na maior parte do tempo. Nos últimos dias do teste, houve um aumento progressivo, alcançando níveis superiores a 80%, o que indica uma boa recuperação, embora não tão consistente quanto a da

Amostra 01. A amostra se mostrou estável, mas com desempenho ligeiramente inferior à líder do teste.

Figura 12. Teste de Vazão no Equipamento Patentado



Fonte: AUTOR (2025).

Por outro lado, a Referência apresentou os menores índices de permeabilidade relativa durante o experimento. Seus valores oscilaram majoritariamente entre 30% e 45%, com leve recuperação apenas nos dias finais. Esses resultados sugerem menor resistência à perda de vazão e um desempenho significativamente inferior em comparação às demais amostras. Assim, conclui-se que o uso da Amostra 1 representa a melhor opção para manter a eficiência do sistema ao longo do tempo.

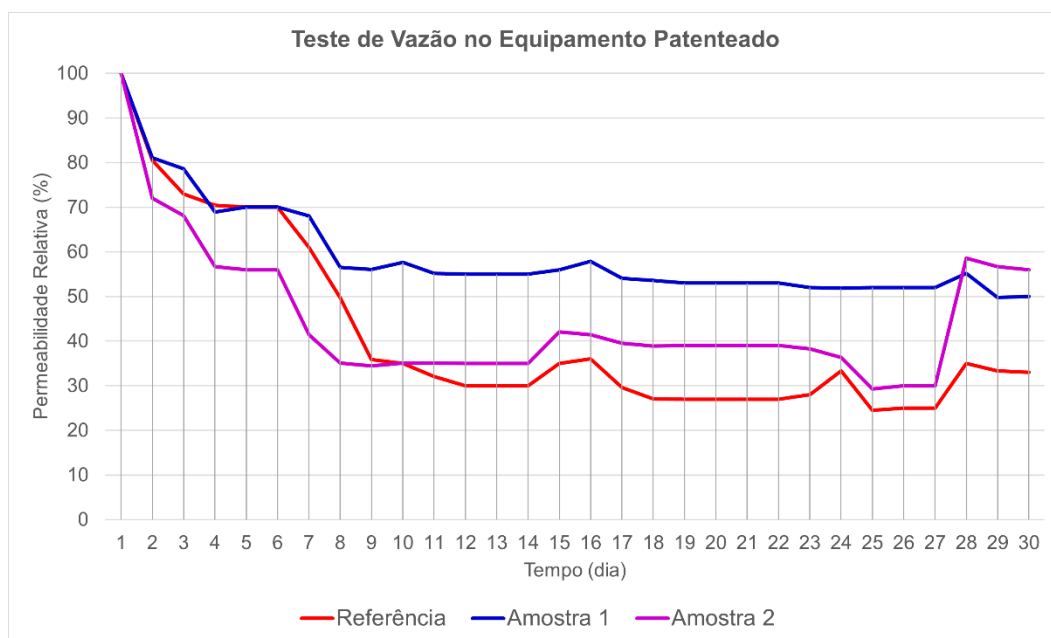
4.4.3 Resultados do teste de vazão do terceiro traço

Entre os dias 4 de setembro e 3 de outubro de 2024, foi realizado um monitoramento de vazão para avaliar o desempenho de três diferentes amostras quanto à sua permeabilidade relativa (%): Referência, Amostra 1 e Amostra 2. As

leituras diárias de vazão (em g/min) permitiram analisar a durabilidade e eficiência dos materiais ao longo do tempo, em condições reais de uso.

O gráfico abaixo evidencia a variação da permeabilidade relativa das três amostras no decorrer dos 30 dias de teste. Nota-se um comportamento oscilante, com quedas significativas de desempenho seguidas por recuperações pontuais. Essas variações indicam que os materiais passaram por ciclos de saturação e possível regeneração parcial. Os períodos em que os valores caem para 0% refletem dias sem coleta de dados, e não necessariamente falhas nos materiais.

Figura 13. Teste de Vazão no Equipamento Patentado



Fonte: AUTOR (2025).

A Amostra 1 (linha azul) apresentou a melhor estabilidade e desempenho entre todas, com níveis de permeabilidade relativamente elevados mesmo após diversas quedas. A Amostra 2 (linha rosa) teve comportamento semelhante, porém com leve inferioridade em alguns momentos. Já a referência (linha vermelha) demonstrou uma perda de desempenho mais acentuada e constante, sugerindo menor resistência à obstrução progressiva.

Essas observações reforçam a superioridade da Amostra 1 frente às demais, especialmente em cenários que exigem manutenção de fluxo e permeabilidade ao longo do tempo. A análise também mostra que, embora a Amostra 2 seja uma

alternativa viável, seu desempenho ainda não supera o da Amostra 1. A referência, por sua vez, se mostrou menos eficiente, servindo como base comparativa para a validação dos avanços nos materiais testados.

5 CONCLUSÕES

A durabilidade do concreto está diretamente relacionada à sua resistência à penetração de agentes agressivos, como água, íons cloreto, dióxido de carbono e sulfatos. Esses compostos aceleram processos de corrosão e degradação das estruturas. Os aditivos cristalizantes mostraram-se eficazes ao reduzir a permeabilidade do concreto, dificultando a entrada desses agentes e contribuindo para o aumento da vida útil das estruturas.

Um dos resultados mais relevantes desta pesquisa foi a capacidade de selamento de fissuras com aberturas de até 5 mm, observada nas amostras contendo aditivo cristalizante. Esse comportamento comprova o potencial de autossalabilidade proporcionado pela formação de cristais insolúveis, que preenchem progressivamente as fissuras ao longo do tempo de cura, mesmo sob presença contínua de água. Tal característica é particularmente vantajosa em estruturas sujeitas a microtrincas e exposição a ambientes agressivos, por reforçar a estanqueidade e a durabilidade do concreto.

O maior diferencial, entretanto, foi identificado nos ensaios de vazão de água, que demonstraram uma redução progressiva da permeabilidade nas amostras com aditivo ao longo de 30 dias de monitoramento. Esse desempenho evidencia que o aditivo cristalizante foi eficaz no preenchimento de poros e microfissuras, promovendo maior estanqueidade ao material. A capacidade de autocicatrização foi confirmada pela obstrução parcial ou total das fissuras induzidas, validando a eficiência do aditivo mesmo sob fluxo contínuo de água.

O presente trabalho teve como objetivo analisar os efeitos da incorporação de aditivo cristalizante em concretos convencionais, com ênfase na resistência mecânica, na durabilidade e na capacidade de autocicatrização de fissuras. Com base nos ensaios realizados, constatou-se que a presença do aditivo não comprometeu a resistência à compressão dos corpos de prova. Ao contrário, os traços modificados apresentaram desempenho equivalente ou superior ao concreto de referência, confirmando sua viabilidade para aplicações estruturais sem prejuízo às propriedades mecânicas.

Destaca-se ainda, neste estudo, o desenvolvimento de um equipamento inédito, idealizado e patenteado pelo autor (Depósito BR 10 2024 09216-7), projetado especificamente para mensurar a vazão de água através de fissuras em corpos de prova de concreto. Esse dispositivo permitiu avaliar a autossalabilidade em condições controladas de laboratório, com medições repetíveis e confiáveis. A criação e patente deste equipamento representam uma relevante contribuição para a pesquisa e para a prática profissional, oferecendo uma ferramenta inovadora na análise do comportamento de concretos autocatrizantes.

No estado fresco, os concretos com aditivo apresentaram estabilidade em parâmetros essenciais como o abatimento do tronco de cone, o teor de ar incorporado e a massa específica, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas. Esses resultados confirmam a compatibilidade do aditivo cristalizante com os métodos convencionais de produção, lançamento e adensamento do concreto.

Conclui-se, portanto, que a utilização de aditivos cristalizantes é uma alternativa técnica promissora para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto, sobretudo em ambientes agressivos. Aliada à inovação metodológica representada pelo equipamento patenteado, esta pesquisa contribui de forma significativa para o avanço do conhecimento técnico-científico na área de materiais cimentícios e construção civil.

6 TRABALHOS FUTURO

A proposta de pesquisa para os próximos anos visa expandir a aplicabilidade e aprimorar a eficiência do dispositivo, abordando os seguintes pontos:

1. **Avaliação do Impacto de Diferentes Aditivos Cristalizantes:** Realizar estudos aprofundados sobre a eficácia de diferentes tipos de aditivos cristalizantes, comparando seu desempenho no processo de autocicatrização e resistência à infiltração de água;
2. **Aprimoramento dos Métodos de Medição de Vazão:** Investigar métodos alternativos e mais precisos para a quantificação da vazão, utilizando sensores de medição mais avançados ou sistemas automatizados para aumentar a acuracidade dos resultados;
3. **Testes em Concreto de Diferentes Composições e Idades:** Expandir a pesquisa para testar corpos de prova com diferentes composições de concreto (como concretos de alta performance ou com adições minerais) e com diferentes idades de cura, para analisar a interação das fissuras com os aditivos ao longo do tempo;
4. **Integração com Análise de Microestrutura:** Desenvolver uma abordagem integrada que combine os resultados de vazão com a análise da microestrutura do concreto, utilizando técnicas como microscopia eletrônica ou espectroscopia para entender melhor os mecanismos de autocicatrização;
5. **Aplicação em Cenários Reais de Construção:** Realizar testes em canteiros de obras para validar a eficácia dos aditivos cristalizantes em condições ambientais e estruturais reais, incluindo exposições a diferentes tipos de cargas e variações climáticas;

Esses estudos contribuirão para o aprimoramento contínuo do dispositivo e para a promoção de soluções mais eficazes e sustentáveis no campo da engenharia civil, com foco na durabilidade e manutenção de estruturas de concreto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:2023 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ANBT). **NBR 9833:2008 - Concreto - Determinação da massa específica do concreto fresco**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 47:2002 - Concreto - Determinação do teor de ar por pressão**. Rio de Janeiro, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:2022 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13818:2021 - Revestimentos cerâmicos - Determinação de características**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270:2022 - Blocos cerâmicos para alvenaria - Especificação**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:2021 - Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2021.

GERALDINO, P. H. T. **Desenvolvimento de metodologia de ensaio de autocicatrização para concretos com adições cristalizantes e patente do equipamento. 2025**. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

NASCIMENTO FILHO, S. I. **Estudo do comportamento não linear de concretos com diferentes relações água/cimento. 2022**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022

RESENDE, A. S. **Desempenho de concretos com aditivo cristalizante expostos a sulfatos**. 2023. 88 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

TÂMBARA, R. F. **Aplicação de aditivos cristalizantes em estruturas de concreto: desempenho e durabilidade**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2022.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. 2020. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2022.

ALMUSALLAM, A. A. et al. **Durability of concrete reinforced with different types of recycled plastic waste**. *Materials*, v. 13, n. 22, p. 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13225275>.

AL-SHWAITER, A. et al. **Development of self-healing concrete using shape memory alloy and modified bacterial spores**. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, p. e01602, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01602>.

AMORIM, A. S. C. et al. **Evaluation of autogenous healing in concrete with crystalline admixture using ultrasonic pulse velocity**. *Construction and Building Materials*, v. 381, p. 131029, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131029>.

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; PENTALERI, E. **Self-healing performance of concrete containing crystalline admixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 293, p. 123457, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123457>.

ANDRADE, J. J. O. et al. **Avaliação da durabilidade de concretos com aditivo cristalizante submetidos à ação de agentes agressivos**. *Revista ALCONPAT*, v. 11, n. 3, p. 308–320, 2021. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.530>.

FERREIRA, R. M. L. et al. **Aditivos cristalizantes e sua influência na durabilidade do concreto: revisão sistemática**. *Revista Matéria*, v. 28, n. 1, p. e-12687, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620230001.1452>.

GHANBARI, A.; ZANGANEH, H. **Application of crystalline waterproofing admixtures in concrete: A comprehensive review**. *Construction and Building Materials*, v. 267, p. 121088, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121088>.

GUPTA, P.; KUMAR, V. **Performance of self-healing concrete using crystalline admixture and bacterial culture.** *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 119067, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119067>.

MALEKI, A.; ZIAEI-NIA, A. **Self-healing of cracks in concrete using crystalline admixtures.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, p. e01541, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01541>.

MOURA, A. C. C. et al. **Avaliação da durabilidade de concretos com adição de aditivo cristalizante frente à penetração de íons cloreto.** *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 4, p. e14413, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400013>.

MUSSO, S. et al. **Effect of a crystalline admixture on the self-healing capacity of concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 212, p. 171–181, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.321>.

RIBEIRO, D. V.; BERTOLDO, M. A. **Avaliação da influência de um aditivo impermeabilizante de ação cristalizante na durabilidade do concreto.** *Revista Matéria*, v. 21, n. 3, p. 737–749, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0077>.

SANTOS, A. F. et al. **Comportamento do concreto com aditivo cristalizante submetido à carbonatação acelerada.** *Revista Matéria*, v. 27, n. 2, p. e12310, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1385>.

ZHANG, W. et al. **Investigation on self-healing behavior of concrete with crystalline admixture using microscopic and ultrasonic techniques.** *Construction and Building Materials*, v. 246, p. 118533, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118533>.