



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



**PEDRO HENRIQUE TAVARES GERALDINO**

**DESENVOLVIMENTO E PATENTE DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE  
VAZÃO DE ÁGUA EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA E VALIDAÇÃO POR  
MEIO DE METODOLOGIA DE ENSAIO**

**VOLTA REDONDA**

**2025**

**PEDRO HENRIQUE TAVARES GERALDINO**

**DESENVOLVIMENTO E PATENTE DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE  
VAZÃO DE ÁGUA EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA E VALIDAÇÃO POR  
MEIO DE METODOLOGIA DE ENSAIO**

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

Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cirlene Fourquet Bandeira

VOLTA REDONDA

2025

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

A large empty rectangular box with a thin black border, occupying the central portion of the page. It is currently blank, serving as a placeholder for a catalog entry or an image.



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



**PEDRO HENRIQUE TAVARES GERALDINO**

DESENVOLVIMENTO E PATENTE DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE  
VAZÃO DE ÁGUA EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA E VALIDAÇÃO POR  
MEIO DE METODOLOGIA DE ENSAIO.

**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**

**Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

---

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

---

**Prof. Dra. Shimeni Baptista Ribero Daer**  
2º Membro da banca / UniFOA

---

**Dr. Caio Marcello Felbinger Azevedo Cossu**  
3º Membro da banca / Estácio de Sá

JUNHO DE 2025

GERALDINO, P. H. T. **DESENVOLVIMENTO E PATENTE DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA EM CORPOS DE PROVA COM FISSURA E VALIDAÇÃO POR MEIO DE METODOLOGIA DE ENSAIO**. 2025. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2025.

## RESUMO

A crescente demanda por soluções duráveis e sustentáveis na engenharia civil tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à mitigação de patologias recorrentes do concreto, como a fissuração e a alta permeabilidade. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo aprimorar uma metodologia de ensaio já existente para avaliação da autocicatrização em concretos com adições cristalizantes, por meio da aplicação de um equipamento inédito, projetado e desenvolvido durante a pesquisa, para medição precisa da vazão de água em corpos de prova com fissuras. O dispositivo, patenteado sob o número BR 10 2024 009216-7, proporcionou ganhos significativos em precisão, reprodutibilidade e segurança na execução dos ensaios, demonstrando-se uma solução tecnológica viável tanto para fins acadêmicos quanto para aplicações em controle de qualidade. Os corpos de prova foram moldados, fissurados e submetidos a testes mecânicos e de vazão, permitindo a observação da redução progressiva do fluxo de água como indicativo da capacidade de autocicatrização promovida pelo aditivo cristalizante. Os resultados confirmam a eficácia da técnica utilizada e reforçam a importância da inovação proposta como ferramenta de apoio à avaliação da durabilidade de materiais cimentícios, contribuindo para avanços científicos e práticos no setor da construção civil.

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

GERALDINO, P. H. T. **DEVELOPMENT AND PATENT OF EQUIPMENT FOR MEASURING WATER FLOW IN CRACKED SPECIMENS AND VALIDATION THROUGH TESTING METHODOLOGY.** 2025. Dissertation (Professional Master's in Materials) – Fundação Oswaldo Aranha, University Center of Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

## **ABSTRACT**

The growing demand for durable and sustainable solutions in civil engineering has driven the development of technologies aimed at mitigating common concrete pathologies, such as cracking and high permeability. In this context, this study aimed to enhance an existing test methodology for evaluating self-healing in concretes with crystalline additives by incorporating an innovative device, designed and developed during the research, to accurately measure water flow through cracked concrete specimens. The device, patented under number BR 10 2024 009216-7, significantly improved the precision, reproducibility, and safety of the test procedures, proving to be a viable technological solution for both academic and quality control applications. Specimens were molded, cracked, and subjected to mechanical and water flow tests, enabling the observation of a progressive reduction in water passage as an indicator of the self-healing capacity promoted by the crystalline additive. The results confirmed the effectiveness of the adopted technique and highlighted the relevance of the proposed innovation as a supportive tool for evaluating the durability of cementitious materials, contributing to both scientific advancement and practical improvements in the construction industry.

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

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Classificação dos tipos de cimento Portland com base na resistência à compressão e principais características.....	20
<b>Figura 2.</b> Representação do funcionamento do autocatrizante.....	23
<b>Figura 3.</b> Agregados miúdos e agregados graúdos separados.....	29
<b>Figura 4.</b> Traços de concreto separados e traços de concreto na betoneira.....	30
<b>Figura 5.</b> Corpos de prova moldados em PVC.....	31
<b>Figura 6.</b> Corpos de prova em moldes de PVC.....	32
<b>Figura 7.</b> Corpos de prova submersos em água.....	33
<b>Figura 8.</b> Prensa hidráulica e rompimento na diametral.....	35
<b>Figura 9.</b> Demonstração da fissura.....	36
<b>Figura 10.</b> Equipamento patenteado, mostrando o fluxo da água.....	37
<b>Figura 11.</b> Representação esquemática do equipamento patenteado.....	40
<b>Figura 12.</b> Representação esquemática do equipamento patenteado.....	41
<b>Figura 13.</b> Teste 01 dos corpos de prova.....	43
<b>Figura 14.</b> Teste 02 dos corpos de prova.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem, associada a retração ou outros índices técnicos.
°C	Graus Celsius, relevante em contextos de temperatura do concreto (não diretamente mencionado, mas frequentemente usado)
CP	Corpo de Prova.
CP-V RS	Cimento Portland Estrutural Resistente a Sulfatos.
F <sub>c</sub>	Resistência à compressão.
F <sub>ck</sub>	Resistência característica do concreto
F <sub>cm</sub>	Resistência média à compressão dos corpos de prova.
g	Gramas.
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico (unidade de densidade).
L	Litro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico.
mm	Milímetro.
NBR	Norma Brasileira.
NBR 11768	Norma Brasileira que especifica a utilização de aditivos em concreto.
NBR 12655	Norma Brasileira que especifica o preparo do concreto.
NBR 5739	Norma Brasileira que especifica a resistência do concreto.
NBR 6118	Norma Brasileira de projeto de estruturas de concreto.
NBR 15900	Norma Brasileira para água utilizada na construção civil.
PVC	Policloreto de Vinila
s	Segundo.
→	Símbolo que indica relação ou especificação (exemplo: Brita 0 → 4,8 a 9,5 mm).

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 Objetivos .....	13
1.2 Justificativa .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1 Cerâmica .....	14
2.1.1 Compósito cerâmico .....	18
2.1.2 Composição do concreto .....	18
2.1.2.1 Cimento Portland .....	18
2.1.2.3 Agregado Miúdo .....	19
2.1.2.4 Agregado Graúdo .....	20
2.1.2.5 Água .....	20
2.1.2.6 Aditivos .....	20
2.2 Características e propriedades do concreto .....	22
2.3 Polímeros .....	23
2.4 Adições cristalizantes e seus efeitos na redução da fissuração .....	23
2.5 Metodologias de ensaio para a autocicatrização do concreto .....	24
2.6 Patente de equipamentos para ensaios em materiais de construção .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
3.1 Seleção do aditivo cristalizante a ser estudado .....	26
3.2 Dosagem e preparação dos corpos de prova de concreto .....	26
3.3 Curas dos corpos de prova .....	29
3.4 Testes de compressão para avaliar a resistência do concreto .....	31
3.5 Testes de ruptura na diametral para avaliar a fissuração .....	32
3.6 Testes de vazão de água para avaliar a autocicatrização do concreto .....	34
3.7 Equipamentos necessários para a realização dos testes .....	36
3.8 Desenvolvimentos do equipamento para medição da vazão da água .....	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	38
4.1 Patente do equipamento .....	38
4.2 Metodologia .....	41
4.2.1 Teste 1 .....	41
4.2.2 Teste 2 .....	42
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	44

<b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>45</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O controle da qualidade do concreto na construção civil é de extrema importância para garantir a segurança e durabilidade das estruturas. O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e possui características específicas que devem ser respeitadas em seu processo de produção e aplicação. A falta de controle da qualidade do concreto pode resultar em diversas falhas, sendo uma das mais comuns a fissuração, o que pode comprometer a resistência e a durabilidade da estrutura. Portanto, é fundamental desenvolver métodos para controlar a qualidade do concreto e garantir que ele atenda às normas e especificações técnicas exigidas para sua utilização na construção civil (KAEFER, 1998; GAMBALE; POSSAN; HASPARYK, 2023).

O desempenho do concreto é fundamental para assegurar a segurança, a durabilidade e a sustentabilidade das estruturas na construção civil. A busca por concretos com propriedades superiores tem levado ao desenvolvimento de misturas de concreto de alto desempenho, que incorporam altos volumes de materiais cimentícios suplementares. O uso de materiais cimentícios suplementares permite não apenas a melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto, mas também a redução do impacto ambiental associado à produção de cimento Portland, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil. A substituição parcial do cimento por esses materiais promove a obtenção de concretos com elevada resistência à compressão, baixa permeabilidade e maior vida útil (EL-ANSARY *et al.*, 2024).

A fissuração é um dos principais problemas que afetam a qualidade e a durabilidade do concreto utilizado na construção civil. Essas fissuras podem surgir por diversas razões, como a contração do concreto durante a cura, a ação de cargas externas, variações de temperatura e outros fatores que podem afetar a integridade do material. Além de comprometer a estética do concreto, a fissuração pode afetar negativamente sua resistência mecânica e durabilidade, permitindo a entrada de umidade e agentes agressivos, que podem acelerar sua degradação (GAMBALE; POSSAN; HASPARYK, 2023).

Atualmente algumas técnicas são aplicadas para solucionar os efeitos causados pelas fissuras dentro da construção civil, que em sua grande maioria não trazem soluções definitivas e nem duradouras, como exemplo injeção de resinas, preenchimento com argamassa, tratamento superficial com cimento, selagem e vedação (DIONÍSIO; QUARESMA; FLORIAN, 2023)

O uso de aditivos cristalizantes é uma das técnicas mais eficazes para melhorar a qualidade do concreto e reduzir a fissuração. Esses aditivos são capazes de penetrar nas fissuras existentes e formar cristais que preenchem os espaços vazios, melhorando a resistência do material e evitando a penetração de agentes agressivos. São geralmente compostos por sais inorgânicos, como o silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), podendo ser adicionados ao concreto durante a mistura ou aplicados na superfície do concreto já endurecido. A sua eficácia depende da dosagem, da qualidade do concreto e das condições ambientais (KAEFER, 1998; GAMBALE; POSSAN; HASPARYK, 2023).

Além de melhorar a resistência e a durabilidade do concreto, os aditivos cristalizantes também podem reduzir os custos de manutenção a longo prazo, uma vez que diminuem a necessidade de reparos e substituições de estruturas. A pesquisa sobre o uso de aditivos cristalizantes no concreto tem sido amplamente explorada, com vários estudos demonstrando sua eficácia na redução da fissuração e na melhoria da resistência e durabilidade do concreto (GAMBALE; POSSAN; HASPARYK, 2023).

A autocicatrização é uma propriedade fundamental do concreto que permite o reparo natural de fissuras, sem necessidade de intervenção externa. Essa propriedade ajuda a manter a integridade estrutural e a reduzir a penetração de agentes agressivos, como água e dióxido de carbono. A autocicatrização ocorre quando o concreto apresenta a capacidade de formar cristais ao entrar em contato com a água, preenchendo as fissuras e restaurando a continuidade da estrutura. A adição de cristais cristalizantes contribui significativamente para a sustentabilidade, pois reduz a necessidade de manutenção e os custos associados (KAEFER, 1998; GAMBALE; POSSAN; HASPARYK, 2023).

Este trabalho teve início a partir de uma necessidade identificada por uma empresa de grande porte, especializada em tecnologia e patologia do concreto, que

buscava um equipamento capaz de medir com precisão a passagem de água por corpos de prova de concreto fissurados. Essa demanda surgiu no contexto de avaliações técnicas voltadas à durabilidade e à impermeabilidade do concreto, especialmente em estruturas expostas a condições agressivas. Apesar da importância desse tipo de ensaio, constatou-se a inexistência, no mercado nacional, de dispositivos que atendessem a critérios de precisão, reprodutibilidade e segurança operacional para esse fim. A partir desse cenário, foi possível estabelecer uma ponte entre a pesquisa acadêmica e as demandas do setor da construção civil, resultando no desenvolvimento e patente de um equipamento inédito, associado ao aprimoramento de uma metodologia de ensaio já existente. Essa iniciativa reforça o papel da universidade na proposição de soluções tecnológicas aplicáveis, alinhadas às exigências concretas do mercado.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo Geral**

Desenvolver um equipamento de medição da vazão de água que circula pelas fissuras em corpos de prova de concreto, avaliando a propriedade de autocicatrização de concretos com adições cristalizantes, visando melhorar sua durabilidade e a redução do fenômeno de fissuração.

### **Objetivos Específicos**

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre características do concreto, aditivos cristalizantes, propriedades de autocicatrização e metodologias de ensaio.
2. Selecionar o aditivo cristalizante a ser estudado conforme a norma ABNT NBR 11768;
3. Dosar e preparar os corpos de prova de concreto conforme a norma ABNT NBR 12655;
4. Realizar ensaios de compressão e de ruptura por compressão na diametral para avaliar a resistência mecânica e a ocorrência de fissuras;

5. Aplicar testes de vazão de água para avaliar a capacidade de autocicatrização;
6. Pesquisar patentes relacionadas a equipamentos para ensaio de materiais de construção.

## **1.2 Justificativa**

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente relacionada à sua resistência contra agentes agressivos e preservação da sua integridade ao longo do tempo. Assim, o desenvolvimento de técnicas que promovam a autocicatrização do concreto representa um avanço significativo para a engenharia civil, minimizando os efeitos causados pela fissuração.

O uso de aditivos cristalizantes como ferramenta para potencializar a autocicatrização é uma alternativa promissora para promover o aumento da vida útil das estruturas, redução de custos com manutenção e contribuições sustentáveis. Dessa forma, torna-se essencial dispor de métodos confiáveis para avaliar a propriedade de autocicatrização do concreto, a fim de consolidar o uso de aditivos cristalizantes na prática da construção civil. Além disso, o aperfeiçoamento desses métodos contribui para o avanço tecnológico do setor e fomenta novas linhas de pesquisa. Durante a revisão da literatura e análise de equipamentos disponíveis, verificou-se a ausência de dispositivos específicos e acessíveis que permitissem mensurar, de forma precisa e reprodutível, a vazão de água através de fissuras em corpos de prova de concreto. Diante dessa lacuna, este trabalho propôs o desenvolvimento de um equipamento inédito, aliado ao aperfeiçoamento de uma metodologia já existente, de forma a viabilizar a realização dos ensaios com maior rigor técnico e aplicabilidade prática.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Cerâmica**

A cerâmica tem se consolidado como um dos materiais mais relevantes em aplicações estruturais e funcionais de alta exigência, devido à combinação singular

de propriedades físicas e químicas. Materiais cerâmicos são, em essência, compostos inorgânicos, não metálicos, que resultam do processamento térmico de matérias-primas naturais ou sintéticas. Suas características mais notáveis incluem elevada dureza, excelente resistência ao desgaste, estabilidade térmica em altas temperaturas, resistência à corrosão química e baixa densidade. Essas propriedades os tornam altamente atrativos para uso em setores como o aeroespacial, biomédico, eletrônico, energético, automobilístico e também na construção civil (Nascimento *et al.*, 2024; Zhang, W., 2023).

Na indústria aeroespacial, por exemplo, as cerâmicas são empregadas em revestimentos térmicos de motores e escudos de proteção térmica, devido à sua capacidade de suportar variações bruscas de temperatura. No setor biomédico, encontram aplicações como próteses ósseas e odontológicas, aproveitando-se de sua biocompatibilidade e resistência ao desgaste. Já na indústria automobilística, são utilizadas em pastilhas de freio, sensores e velas de ignição, onde a estabilidade térmica e a resistência à abrasão são fundamentais (Kumar, Singh & Hashmi, 2020; Zhang, W., 2023)

Na construção civil, os materiais cerâmicos têm um papel de destaque histórico e contemporâneo. São amplamente empregados na fabricação de tijolos, blocos, telhas, pisos e revestimentos, devido à sua durabilidade, resistência mecânica e estabilidade dimensional. Além disso, cerâmicas técnicas têm sido aplicadas em elementos estruturais e de acabamento, como fachadas ventiladas, isolantes térmicos e elétricos, e cerâmicas porosas para controle da umidade. Sua resistência à abrasão e à ação de agentes químicos também favorece sua utilização em ambientes industriais e laboratoriais. O desenvolvimento de cerâmicas com propriedades específicas, como autolimpantes, antibacterianas ou com elevado desempenho térmico, tem ampliado o uso desses materiais em construções sustentáveis e de alto desempenho técnico (Wachtman, Cannon & Matthewson, 2009; Zhang, W., 2023)

Entretanto, apesar dessas qualidades superiores, a cerâmica apresenta uma limitação crítica: sua fragilidade. Essa fragilidade decorre de sua estrutura atômica predominantemente iônica e covalente, que confere ao material elevada rigidez, mas baixa capacidade de deformação plástica. Como consequência, materiais cerâmicos apresentam elevada resistência à compressão, mas baixa tenacidade à fratura, ou

seja, são suscetíveis à propagação rápida de trincas e fraturas catastróficas quando submetidos a tensões de tração ou impactos localizados (Wachtman, Cannon & Matthewson, 2009; Zhang, W., 2023)

Diante desse desafio, avanços significativos têm sido alcançados por meio do desenvolvimento de compósitos cerâmicos, nos quais a matriz cerâmica é reforçada com fases adicionais metálicas, poliméricas ou outras cerâmicas com o intuito de melhorar sua resistência mecânica e tenacidade. Esses compósitos permitem a personalização das propriedades finais do material, tornando-o mais adequado para ambientes severos. A adição de fibras de reforço (como fibras de carbono, óxidos ou carbetos) e partículas dispersas contribui para mecanismos de aumento de tenacidade, como deflexão e bifurcação de trincas, ponteamto de trincas e mecanismos de dissipação de energia durante a propagação das falhas (Chawla, 2012; Nascimento *et al.* 2024).

Adicionalmente, em consonância com a busca por soluções sustentáveis na construção civil, a utilização de resíduos cerâmicos como matéria-prima alternativa para a produção de concretos vem ganhando destaque. O aproveitamento de resíduos cerâmicos provenientes da indústria de construção, como telhas e tijolos moídos, permite não apenas a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado desses materiais, mas também a melhoria de propriedades do concreto, como sua resistência mecânica e durabilidade. A incorporação de resíduos cerâmicos pode atuar como adição pozolânica ou como substituição parcial de agregados, resultando em concretos com menor porosidade e maior resistência à ação de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos, favorecendo a longevidade das estruturas construída (Kumar, Singh & Hashmi, 2020; Nascimento *et al.* 2024).

Além disso, o uso de nanomateriais, como nanotubos de carbono e grafeno, tem ampliado ainda mais as fronteiras dos compósitos cerâmicos. Esses aditivos em escala nanométrica promovem o reforço da matriz com ganho significativo em propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, abrindo novas possibilidades para aplicações multifuncionais (Zhang, W., 2023)

Portanto, os materiais cerâmicos e seus compósitos continuam sendo alvo de intensa pesquisa e desenvolvimento, visando superar suas limitações intrínsecas e expandir sua aplicabilidade em setores estratégicos da ciência e da engenharia. O

domínio de suas propriedades e dos mecanismos de falha é essencial para o avanço de tecnologias de ponta baseadas em materiais avançados, incluindo soluções inovadoras para o setor da construção civil (Zhang, W., 2023)

### 2.1.1 Compósito Cerâmico

Compósitos cerâmicos representam uma classe avançada de materiais desenvolvidos para superar as limitações típicas das cerâmicas monolíticas, especialmente no que diz respeito à sua baixa tenacidade à fratura e fragilidade intrínseca. Ao combinar fases cerâmicas com outros materiais como cerâmicas de outra natureza, metais ou fibras é possível alcançar propriedades otimizadas que não seriam possíveis com materiais puros (Kumar, Singh & Hashmi, 2020; Rashid *et al.*, 2024).

A estrutura de um compósito cerâmico é composta por uma matriz cerâmica contínua, que confere resistência à compressão, estabilidade térmica e resistência química, e por reforços dispersos (como partículas, fibras curtas ou longas), que atuam como mecanismos de reforço, promovendo melhorias significativas na tenacidade, resistência ao desgaste e resistência à fratura (Rashid *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023).

Entre os tipos mais comuns de compósitos cerâmicos destacam-se os compósitos cerâmica-cerâmica (como SiC/SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>), utilizados em turbinas aeronáuticas e aplicações refratárias; os cermets, que combinam fases metálicas e cerâmicas como WC-Co, usado em ferramentas de corte; e os compósitos cerâmica-polímero, aplicados em dispositivos biomédicos e sensores, por reunirem leveza, flexibilidade e resistência química (Kumar, Singh & Hashmi, 2020; Chawla, 2012).

Os mecanismos de reforço mais relevantes incluem deflexão de trinca, *pull-out* de fibras, *debonding* interfacial e pontes de trinca, todos atuando para impedir a propagação rápida das falhas estruturais, aumentando consideravelmente a resistência à fratura (Liu *et al.*, 2023; Rashid *et al.*, 2024).

Além das propriedades mecânicas aprimoradas, os compósitos cerâmicos também apresentam excelente estabilidade térmica, resistência à corrosão e inércia química, o que os torna altamente desejáveis para aplicações em setores como o

aeroespacial, automotivo, biomédico, refratário e eletrônico (Wang et al., 2023; Rashid et al., 2024).

Por fim, com o avanço de técnicas como sinterização assistida por campo elétrico (SPS), processamento sol-gel, impressão 3D cerâmica e infiltração reativa, é possível desenvolver compósitos cerâmicos com microestruturas controladas, adaptando o desempenho às exigências específicas de cada aplicação (Zhang et al., 2020; Rashid et al., 2024).

### **2.1.2 Composição do concreto**

O concreto é composto basicamente por quatro materiais principais: cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo. Nesse conjunto, o cimento atua como a matriz, preenchendo os espaços entre os agregados e conferindo coesão ao sistema, além de ajudar a distribuir as forças aplicadas. Por sua vez, os agregados, que normalmente são a maior parte do volume do concreto, desempenham o papel de reforço, contribuindo para a resistência às cargas e para a redução dos custos (ANDOLFATO, 2002; BANDEIRA, 2011; PIMENTA, 2022).

#### **2.1.2.1 Cimento Portland**

O cimento Portland, também conhecido como cimento hidráulico, é composto por uma mistura de silicatos de cálcio (clínquer) e sulfato de cálcio (gesso), cuja proporção determina a resistência final do material (ANDOLFATO, 2002; PIMENTA, 2022).

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM C 150), ele é classificado em cinco tipos distintos, como mostrado na figura 1, que destaca as principais características e resistências à compressão de cada tipo (ANDOLFATO, 2002; PIMENTA, 2022).

**Figura 1.** Classificação dos tipos de cimento Portland com base na resistência à compressão e principais características

**Tabela 1 - Tipos de cimento portland (ASTM C 150).**

TIPO	CARACTERÍSTICA PREDOMINANTE	COMPOSIÇÃO (%)				RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA DO CIMENTO TIPO I)			
		1	2	3	4	1 DIA	7 DIAS	28 DIAS	3 MESES
I	Tipo de uso corrente	50	24	11	8	1	1	1	1
II	Moderado calor de hidratação / Moderada resistência a sulfatos	42	33	5	13	0,75	0,85	0,90	1
III	Elevada resistência inicial	60	13	9	8	1,90	1,20	1,10	1
IV	Baixo calor de hidratação	26	50	5	12	0,55	0,55	0,75	1
V	Elevada resistência a sulfato	40	40	4	9	0,65	0,75	0,85	1

1 -  $(CaO)_3(SiO_2)$  Silicato tricálcio; 2 -  $(CaO)_2(SiO_2)$  Silicato dicálcio;  
3 -  $(CaO)_3(Al_2O_3)$  Aluminato tricálcio; 4 -  $(CaO)_4(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$

Fonte: PIMENTA, 2022

### 2.1.2.2 Agregado Miúdo

Os agregados finos preenchem os espaços entre os agregados grossos e reforçam a resistência do concreto. Geralmente, esses agregados, provenientes de rochas sedimentares, são encontrados em leitos de rios e classificados conforme sua granulometria, podendo ser divididos em areias grossa, média, fina e muito fina. Essa classificação é determinada por meio do módulo de finura, que consiste em um índice numérico obtido a partir da soma acumulada dos percentuais retidos em uma série de peneiras padronizadas, dividida por 100. Quanto maior o módulo de finura, mais grossa é a areia; valores menores indicam materiais mais finos, influenciando diretamente na trabalhabilidade, resistência e coesão do concreto. (COSTA, 2016; NBR 7211, 2005; ANDOLFATO, 2002; PIMENTA, 2022).

- a) Areia grossa – módulo de finura entre 3,35 e 4,05;
- b) Areia média – módulo de finura entre 2,40 e 3,35;
- c) Areia fina – módulo de finura entre 1,97 e 2,40;
- d) Areia muito fina – módulo de finura menor que 1,97.

### **2.1.2.3 Agregado Graúdo**

Os agregados grossos, ou brita, são oriundos da fragmentação de rochas e têm como principal função conferir resistência mecânica ao concreto, suportando parte das cargas aplicadas. A resistência aumenta conforme o diâmetro dos agregados, que são classificados por tamanhos, variando de 0 a 5, onde o número indica o diâmetro (ANDOLFATO, 2002; PIMENTA, 2022).

- a) Brita 0 → 4,8 a 9,5 mm;
- b) Brita 1 → 9,5 a 19 mm;
- c) Brita 2 → 19 a 25 mm;
- d) Brita 3 → 25 a 50 mm;
- e) Brita 4 → 50 a 76 mm;
- f) Brita 5 → 76 a 100 mm;

### **2.1.2.4 Água**

A água é essencial para iniciar o processo de hidratação dos componentes do concreto, contribuindo para a trabalhabilidade e para o preenchimento adequado dos corpos de prova. No entanto, é fundamental que a água esteja livre de resíduos industriais e substâncias orgânicas, pois a presença de sais minerais e outros elementos pode comprometer a resistência e a durabilidade do concreto (ANDOLFATO, 2002; PIMENTA, 2022).

### **2.1.2.5 Aditivos**

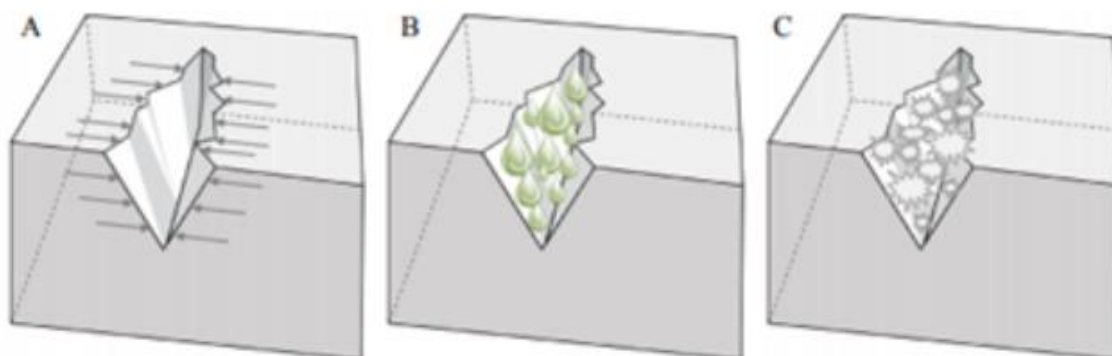
Os aditivos são substâncias adicionadas à mistura para modificar propriedades específicas, como reduzir o calor de hidratação, ajustar a resistência, controlar o tempo de endurecimento ou aumentar a plasticidade (COSTA, 2016; PENÃ, *et al.*, 2022).

A utilização de aditivos no concreto tem se mostrado uma estratégia fundamental para aprimorar suas propriedades mecânicas, durabilidade e

desempenho funcional. Entre as inovações mais recentes, destaca-se o uso de nanomateriais, como a nanocelulose, a nanosílica e o nanoclay, que vêm sendo estudados como adições parciais ao cimento tradicional. Esses nanomateriais atuam não apenas como preenchimentos físicos de vazios microscópicos na matriz cimentícia, mas também promovem reações químicas que potencializam a formação de produtos de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado, principal responsável pela resistência do concreto (MOHAMED *et al.*, 2024).

A nanosílica, por exemplo, possui alta reatividade pozolânica e grande área superficial, favorecendo o preenchimento de poros e a densificação da microestrutura do concreto, resultando em ganhos significativos de resistência à compressão e redução da permeabilidade. Já a nanocelulose contribui para o aumento da resistência à tração e ao controle da fissuração, atuando como um agente de reforço interno que melhora a tenacidade do material. O nanoclay, por sua vez, aumenta a resistência química e térmica do concreto, promovendo maior impermeabilidade e proteção contra ataques de agentes agressivos. No entanto, a eficácia desses aditivos está diretamente relacionada à correta dispersão e à dosagem adequada dos nanomateriais na matriz, sendo fundamental o controle rigoroso dos parâmetros de produção para maximizar seus benefícios sem comprometer a trabalhabilidade do concreto (MOHAMED *et al.*, 2024).

**Figura 2.** Representação do funcionamento do autocicatrizante.



Fonte: Ficha técnica do produto

## 2.2 Características e propriedades do concreto

O concreto é um material compósito amplamente utilizado na Engenharia Civil, composto principalmente por cimento, água e agregados (finos e grossos). Esse material é valorizado por sua facilidade de moldagem, o que permite a construção de estruturas em diferentes formas, além de sua resistência à compressão (COUTO et al., 2013; PIMENTA, 2022).

Materiais compósitos resultam da combinação de, no mínimo, dois materiais distintos em escala macroscópica. Neles, a matriz – que pode ser cerâmica, polimérica ou metálica – protege o reforço, que é responsável por suportar as cargas aplicadas, criando um novo material com propriedades superiores às dos seus componentes individuais. Essas características dependem de uma boa ancoragem entre a matriz e o reforço (BANDEIRA, 2011; COSTA, 2016).

Assim, o concreto, quando curado, apresenta características superiores ao cimento isolado, especialmente na resistência à compressão. Essa resistência é geralmente representada por curvas estatísticas de Gauss, que permitem a análise de parâmetros cruciais, como a média aritmética dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova. Esse dado é fundamental para a determinação da resistência característica de cada material, conforme indicado pela norma NBR 8953 (LIBÂNIO; CASSIANE; SANDRO, 2004; PIMENTA, 2022).

A resistência do concreto também está associada às deformações que ele sofre, as quais podem ser influenciadas por fatores ambientais, como a umidade e variações de temperatura, causando retração, mudanças de volume e deformações de tipos diversos, como imediatas, progressivas (fluência) e recuperáveis de forma lenta (DE ALMEIDA, 2002; BASTOS, 2019).

É importante observar que, devido à ancoragem irregular entre o agregado graúdo e o cimento, o concreto tende a desenvolver microfissuras ao longo do tempo, o que impede um comportamento linear sob tensões. Além disso, seu coeficiente de dilatação térmica para concreto armado é de  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}^{-1}$  (DE ARAÚJO, 2000; NBR 6118).

### 2.3 Polímeros

Os polímeros são macromoléculas amplamente empregados na engenharia civil devido à sua resistência, flexibilidade e durabilidade. Podem ser de origem natural, como a celulose, ou sintética, como o poliuretano, sendo classificados em termoplásticos e termofixos conforme seu comportamento térmico. Na indústria da construção civil, os polímeros são aplicados como aditivos para concreto, revestimentos impermeáveis e reforços estruturais, contribuindo para o aumento da resistência e a redução da permeabilidade das estruturas. Contudo, é importante considerar que, quando expostos a condições ambientais severas, como umidade elevada e variações de temperatura, os polímeros podem sofrer processos de degradação que afetam suas propriedades mecânicas, como resistência à tração e módulo de elasticidade. Nesse sentido, pesquisas têm sido conduzidas para aprimorar o desempenho de polímeros no concreto, especialmente no desenvolvimento de métodos para otimizar sua capacidade de autocicatrização. Com o avanço tecnológico, polímeros biodegradáveis surgem como alternativas sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais e promovendo construções mais duráveis (PENÃ *et al.*, 2022; ARICI, 2007).

### 2.4 Adições cristalizantes e seus efeitos na redução da fissuração

A fissuração é um problema comum em concretos, principalmente quando expostos a ambientes agressivos ou quando submetidos a variações de temperatura e umidade. A utilização de aditivos cristalizantes é uma das soluções para melhorar a qualidade do concreto e reduzir a fissuração (MOHAMED *et al.*, 2024; PENÃ *et al.*, 2022)

Os aditivos cristalizantes são compostos químicos que, quando adicionados ao concreto, formam cristais dentro dos poros do material, preenchendo as fissuras e imperfeições. Esses cristais aumentam a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, além de reduzir a permeabilidade e aumentar a aderência do material (SILVA FILHO, 2011; PENÃ *et al.*, 2022; GALLI, 2023).

Dentre os aditivos cristalizantes mais utilizados estão o cloreto de cálcio, o silicato de sódio e o silicato de potássio. Esses aditivos também podem ser utilizados em conjunto com outros aditivos, como os superplastificantes, para

melhorar ainda mais as propriedades do concreto (SILVA FILHO, 2011; PENÃ *et al.*, 2022).

Além disso, a utilização de aditivos cristalizantes pode reduzir o uso de outros aditivos, como os impermeabilizantes, resultando em uma economia financeira para a construção civil. Por isso, é importante estudar a eficácia desses aditivos em diferentes tipos de concreto e condições de exposição (SILVA FILHO, 2011; PENÃ *et al.*, 2022; GALLI, 2023).

O aditivo que foi escolhido para a realização dos testes é um aditivo integral por cristalização especialmente formulado para interagir com a estrutura dos poros capilares do concreto, promovendo um sistema de impermeabilização que permanece como parte da matriz de concreto e ele pode ser usado em aplicações em concreto de estruturas elevadas ou enterradas. (Ficha técnica do produto, 2020)

## **2.5 Metodologias de ensaio para a autocicatrização do concreto**

A avaliação da capacidade de autocicatrização do concreto pode ser feita por meio de diferentes técnicas de ensaio. As metodologias mais comuns incluem a utilização de testes de vazão de água, testes de absorção capilar, testes de flexão, entre outros (GALLI, 2023; MOHAMED *et al.*, 2024).

O teste de vazão de água, também conhecido como teste de “autogerminação”, consiste em criar uma trinca em um corpo de prova de concreto e, posteriormente, submergi-lo em água. Se houver uma autoregeneração da trinca, pode-se afirmar que o concreto possui capacidade de autocicatrização (GALLI, 2023; MOHAMED *et al.*, 2024).

Outra técnica utilizada é o teste de absorção capilar, que mede a capacidade do concreto em absorver água por capilaridade. Em geral, corpos de prova com trincas são submetidos ao teste e, em seguida, a quantidade de água absorvida é medida. Se houver uma diminuição da absorção de água ao longo do tempo, pode-se concluir que há autocicatrização do concreto (GALLI, 2023; PENÃ, *et al.*, 2022).

Já o teste de flexão é utilizado para avaliar a capacidade do concreto em resistir a cargas e deformações. Em geral, é realizado em corpos de prova com

trincas e, posteriormente, é avaliado se há recuperação das deformações após a aplicação da carga (GALLI, 2023).

Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens, e a escolha da metodologia mais adequada dependerá dos objetivos específicos da pesquisa e das características do concreto estudado. Nesta pesquisa, optou-se pelo teste de vazão de água para avaliar a capacidade de autocicatrização do concreto com adições cristalizantes (GALLI, 2023).

## **2.6 Patente de equipamento para ensaios em materiais de construção**

A patente de equipamentos para ensaios em materiais de construção é um tema relevante no âmbito da construção civil, já que a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias podem proporcionar avanços significativos na área. A patente é uma forma de proteger a propriedade intelectual de um novo equipamento, processo ou tecnologia, garantindo exclusividade ao seu inventor por um determinado período de tempo.

No contexto dos ensaios em materiais de construção, a patente de equipamentos pode abranger diversos aspectos, como máquinas de ensaio, dispositivos de medição e equipamentos de análise de dados. É importante ressaltar que, para se obter uma patente, o equipamento deve ser considerado inovador e apresentar um diferencial em relação aos equipamentos já existentes no mercado.

No caso da metodologia de ensaio de autocicatrização para concretos com adições cristalizantes, a patente de um equipamento específico pode ser importante para garantir a exclusividade da tecnologia desenvolvida, além de possibilitar sua comercialização. Nesse sentido, é fundamental que a metodologia de ensaio seja acompanhada por um processo de desenvolvimento de equipamentos específicos que permitam a realização dos testes com precisão e eficiência.

Portanto, a patente de equipamentos para ensaios em materiais de construção é um aspecto importante a ser considerado na pesquisa de novas metodologias de ensaio, especialmente quando se busca a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias que possam contribuir para a melhoria da qualidade e durabilidade do concreto e outros materiais de construção.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Seleção do aditivo cristalizante a ser estudado**

O aditivo cristalizante utilizado neste estudo é formulado à base de sílica ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), sendo classificado como aditivo integral de impermeabilização por cristalização. O processo de escolha foi embasado na norma ABNT NBR 11768, que trata dos requisitos para aditivos químicos usados em concretos, garantindo critérios técnicos adequados quanto à compatibilidade, desempenho e segurança da aplicação. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura sobre os dois principais tipos de aditivos cristalizantes disponíveis no mercado: os à base de sílica, que promovem a formação de cristais insolúveis nos poros capilares do concreto por reação com a cal livre, e os à base de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), que também induzem processos de cristalização, mas apresentam maior risco de reatividade química e corrosividade. Testes preliminares em laboratório indicaram desempenho superior do aditivo à base de sílica na redução da permeabilidade e na promoção da autocicatrização. A seleção final considerou critérios técnicos e econômicos, com foco na obtenção de um produto de alta eficácia, compatível com o traço do concreto utilizado, e com viabilidade prática para aplicação em ambientes agressivos.

#### **3.2 Dosagem e preparação dos corpos de prova de concreto**

A preparação dos corpos de prova de concreto é um passo fundamental para a realização dos testes que avaliam a eficácia dos aditivos cristalizantes em promover a cicatrização e a redução da permeabilidade do material. Os procedimentos realizados para a dosagem e preparação dos corpos de prova estão detalhados a seguir.

**Figura 3.** Agregados miúdos e graúdos separados.



Os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova incluem:

**Cimento:** utilizou-se cimento Portland CP III, conforme especificações da norma NBR 16697, garantindo uma matriz homogênea e adequada para a realização dos ensaios.

**Agregados:** foram empregados agregados miúdos e graúdos de acordo com a norma NBR 7211, com diâmetros máximos de 19 mm para o agregado graúdo e a graduação adequada do agregado miúdo.

**Água:** a água utilizada para a mistura foi potável, em conformidade com a norma NBR 15900.

**Aditivo Cristalizante:** O aditivo foi adicionado à mistura em porcentagens previamente determinadas com base nas informações dadas pelos fabricantes.

A dosagem do concreto foi realizada seguindo a metodologia de traço, buscando obter uma resistência característica de  $f_{c28}$  (28~32Mpa)(Pascal  $\times 10^6$ ) aos 28 dias, conforme especificado na norma NBR 5739. As proporções utilizadas foram

**Cimento Portland CP III:** 350 kg/m<sup>3</sup>

**Agregado miúdo:** 700 kg/m<sup>3</sup>

**Agregado graúdo:** 1.050 kg/m<sup>3</sup>

**Água:** 175 L/m<sup>3</sup>

**Aditivo cristalizante:** 1,5% em relação à massa do cimento

Segundo a norma NBR 5739 os corpos de prova devem ter moldes em proporções de 1:2 mas para o trabalho optamos por utilizar moldes de PVC, com diâmetro de 100 mm e altura de 250 mm, para facilitar o rompimento na forma diametral. O processo de preparação incluiu as seguintes etapas:

**Secagem dos materiais:** Foi realizada a secagem do cimento, agregados e o aditivo cristalizante, por meio de estufa de secagem (SL-100/1080) seguindo a NBR 6467.

**Mistura:** Os materiais secos (cimento, agregados e aditivo cristalizante) foram misturados em uma betoneira, marca CSM modelo 400L 1 Traço Max Mono 220V, seguindo uma ordem específica de acordo com a NBR 12655, primeiro entrando os agregados miúdos e agregados graúdos, após serem misturados por 1 min, entramos com o cimento e o aditivo e assim foram misturados por um período de 5 minutos. A água foi adicionada gradualmente, garantindo a homogeneização da mistura.

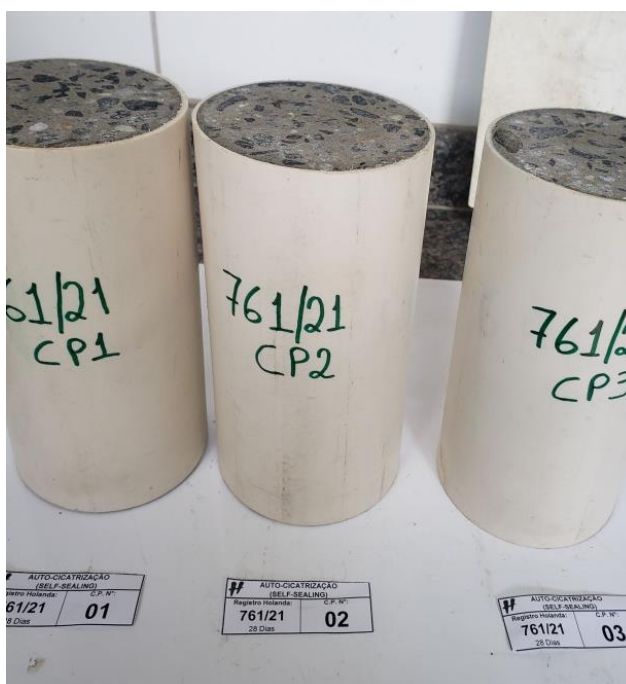
**Figura 4.** Traços do concreto separados e na betoneira.



**Moldagem:** O concreto foi despejado nos tubos de PVC, utilizou-se um vibrador de imersão para assegurar a eliminação de bolhas de ar e garantir a máxima densificação do concreto.



**Figura 6.** Corpos de prova em moldes de PVC.



Os corpos de prova foram retirados em três intervalos distintos: 7, 15 e 28 dias. Esses períodos foram escolhidos para permitir uma análise do desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo, fazendo ensaios de compressão nos corpos de prova para averiguar se eles estavam dentro do desenvolvimento esperado pela NBR 7680, além de facilitar a comparação entre as amostras tratadas com e sem o aditivo cristalizante.

Nos dois primeiros estágios, foram coletados dois corpos de prova para avaliação inicial da resistência à compressão e da permeabilidade. Os dados obtidos permitiram uma análise preliminar da eficácia do cristalizante na fase inicial de cura.

No estágio final, foram coletados os corpos de prova para a avaliação completa da resistência à compressão, resistência à fissuração e permeabilidade. Esses dados foram cruciais para determinar a eficácia geral do aditivo cristalizante na recuperação da integridade do concreto.

**Figura 7.** Corpos de prova submersos em água.



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.

### **3.4 Testes de compressão para avaliar a resistência do concreto**

Os testes de compressão foram realizados para avaliar a resistência dos corpos de prova de concreto em diferentes idades, de acordo com as retiradas deles nos intervalos de 7, 15 e 28 dias, tanto para aqueles com o aditivo cristalizante quanto para os corpos de prova sem o aditivo cristalizante. Este ensaio é fundamental para determinar a capacidade do concreto de suportar cargas compressivas, o que é essencial para a sua aplicação em estruturas de concreto.

Os corpos de prova, moldados em tubos de PVC, foram retirados das câmaras de cura e limpos para remover resíduos interferem nos resultados dos testes. Cada corpo de prova foi identificado de forma a garantir que as informações sobre a composição e o tempo de cura fossem registradas corretamente.

Os testes de compressão foram realizados utilizando uma máquina de ensaio de compressão, marca SOLOTEST modelo 200f - 220V-60Hz 930kg, calibrada e em conformidade com a ABNT NBR 5739. A máquina foi equipada com sensores para monitoramento preciso da carga aplicada e do comportamento dos corpos de prova durante o teste.

O procedimento para a realização dos testes de compressão seguiu as etapas abaixo:

**Colocação dos corpos de prova:** os corpos de prova foram posicionados na máquina de compressão de maneira que a carga fosse aplicada uniformemente sobre a face plana do corpo de prova.

**Aplicação da carga:** A carga foi aplicada gradualmente até a ruptura do corpo de prova e até atingirmos uma fissura de no máximo 5mm. Durante o ensaio, foram registrados os valores de carga máxima suportada antes da falha, que variaram de acordo com cada corpo de prova.

**Análise dos Resultados:** os dados obtidos foram utilizados para calcular a resistência à compressão, expressa em MPa, sendo feito da seguinte forma:

Os testes foram realizados em três intervalos de tempo: 7, 15 e 28 dias, para avaliar a evolução da resistência do concreto ao longo do tempo e para comparar os efeitos do aditivo cristalizante e para avaliar a eficácia do aditivo em melhorar a resistência do concreto e sua capacidade de suportar tensões aplicadas.

### **3.5 Testes de ruptura por compressão diametral para avaliar a fissuração**

Os testes de ruptura na diametral foram realizados para avaliar a resistência à fissuração dos corpos de prova de concreto, tanto os tratados com o aditivo cristalizante quanto os não tratados. Este ensaio é fundamental para compreender como o concreto se comporta sob tensões de tração e como a adição de cristalizantes pode influenciar sua capacidade de resistir a fissuras.

Os corpos de prova foram identificados de maneira a correlacionar os resultados com suas respectivas condições de tratamento e tempos de cura. Para garantir a integridade dos resultados, limitou-se a fissuração a um máximo de 5 mm durante os testes.

Para a realização dos testes de ruptura, foi utilizada uma máquina de ensaio de compressão, marca SOLOTEST modelo 200f - 220V-60Hz 930kg, que permite a aplicação de cargas axiais nos corpos de prova. A máquina foi calibrada de acordo com as normas técnicas, como a NBR 7222, que regulamenta os ensaios de resistência de concretos.

**Figura 8.** Prensa hidráulica e rompimento na diametral.



O procedimento para a realização dos testes de resistência à tração por compressão diametral incluiu as seguintes etapas:

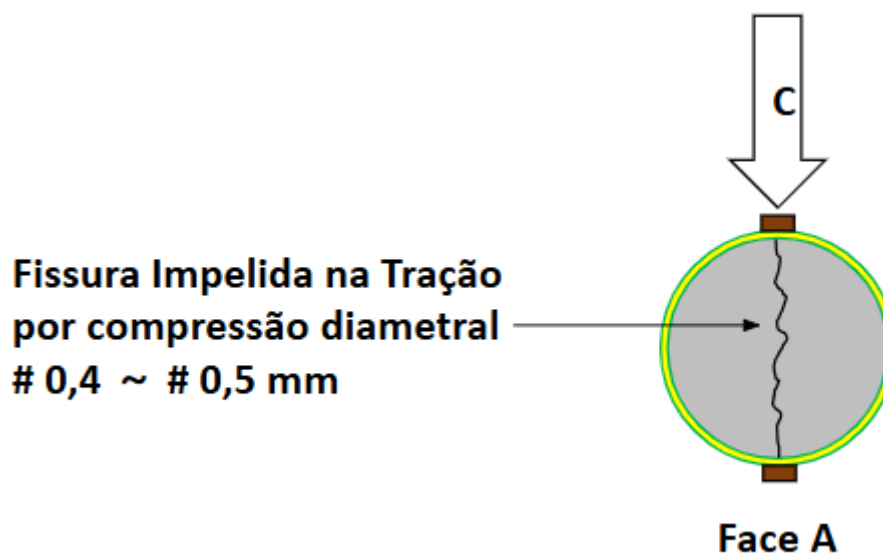
**Posicionamento dos corpos de prova:** os corpos de prova foram colocados horizontalmente na máquina de ensaio, assegurando que a carga fosse aplicada ao longo do eixo longitudinal do corpo de prova.

**Aplicação da carga:** a carga foi aplicada de forma contínua até a ruptura do corpo de prova. Durante o teste, foram monitorados os valores de carga e deslocamentos, possibilitando a análise do comportamento do concreto antes da falha.

**Controle da fissuração:** para garantir que a fissuração não ultrapassasse 5 mm, foram realizadas medições visuais periódicas durante a aplicação da carga. Caso a fissuração se aproximasse desse limite, a carga era ajustada para evitar a ruptura prematura.

**Registro da ruptura:** o modo de ruptura foi observado e registrado, permitindo uma análise qualitativa sobre a formação de fissuras e a propagação das mesmas durante o teste.

**Figura 9.** Demonstração da fissura.



Fonte: Elaborado pelo autor. 2025

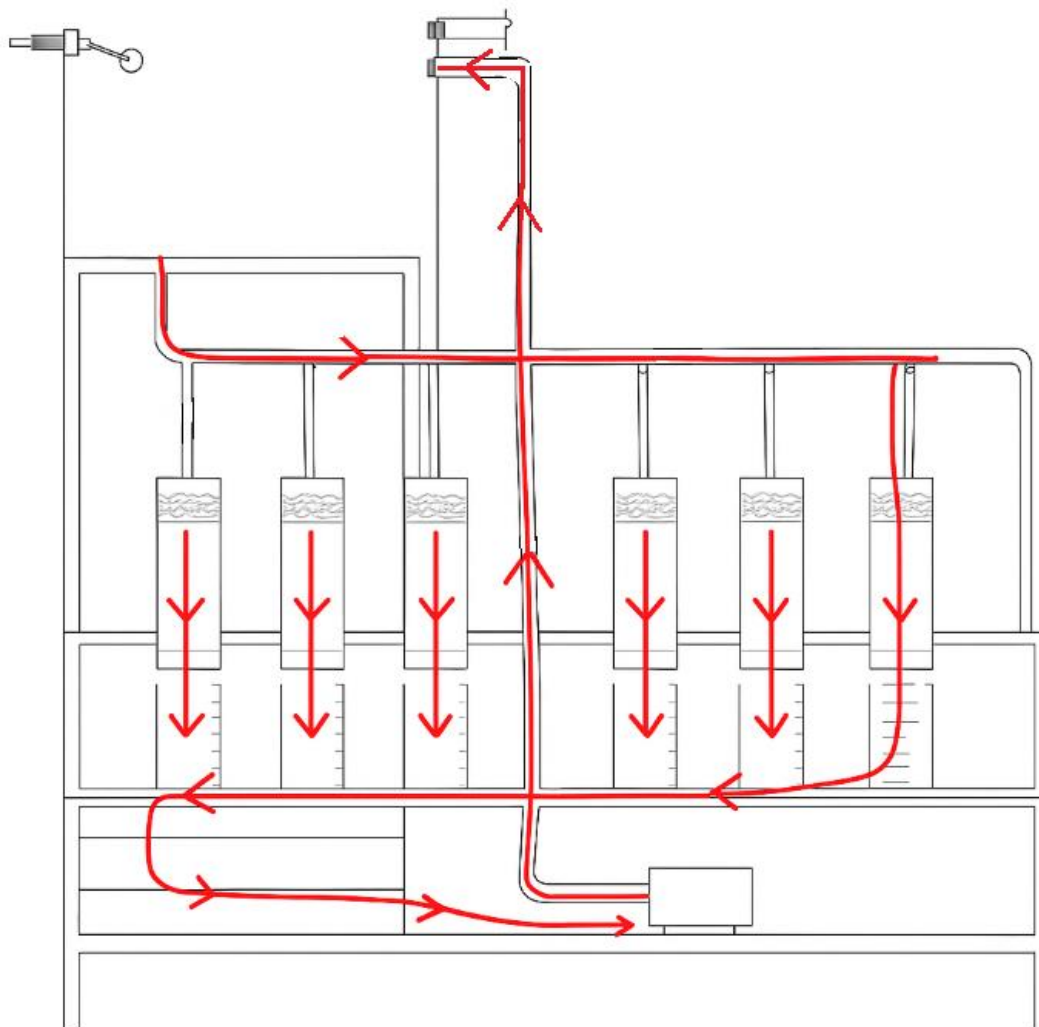
### **3.6 Testes de vazão de água para avaliar a autocicatrização do concreto**

Para a realização dos ensaios de autocicatrização do concreto, um dispositivo específico para medição de vazão de água em corpos de prova de concreto semirrompidos foi desenvolvido. Este equipamento é projetado para monitorar a quantidade de água que permeia os corpos de prova ao longo do tempo, fornecendo dados essenciais sobre a eficácia dos aditivos cristalizantes em promover a cicatrização e em reduzir a permeabilidade do concreto.

O dispositivo apresenta uma estrutura em formato de "L" e é constituído por um sistema de bombeamento contínuo de água, um reservatório de distribuição controlado por bóia, e um sistema de coleta de água que permite a análise precisa da quantidade de água que atravessa as fissuras dos corpos de prova. A configuração do equipamento permite a realização de testes simultâneos em até doze corpos de prova, o que aumenta a eficiência do ensaio e possibilita uma

análise comparativa entre diferentes tratamentos e condições de aplicação dos cristalizantes.

**Figura 10.** Equipamento patenteado, mostrando o fluxo da água



Fonte: Elaborado pelo autor. 2025

Os corpos de prova são previamente preparados e submetidos a fissurações controladas, simulando condições de degradação semelhantes às observadas em estruturas reais de concreto. Estes corpos de prova são inseridos em câmaras de teste individualizadas no dispositivo, posicionados de forma a garantir a estabilidade e o centro de gravidade constante durante o ensaio, o que melhora a precisão dos dados coletados. O sistema de distribuição de água, localizado na parte superior do equipamento, permite que o fluxo ocorra por gravidade, garantindo um fluxo constante e controlado de água sobre as fissuras dos corpos de prova.

A água que permeia cada fissura é recolhida em béqueres dispostos abaixo dos corpos de prova, permitindo a coleta periódica do fluido que atravessa as fissuras. Esta coleta é essencial para a quantificação precisa da vazão de água e para a avaliação da capacidade de autocicatrização do concreto. A análise da quantidade de água que passa através dos corpos de prova ao longo do tempo é usada para medir a eficácia dos aditivos cristalizantes, proporcionando informações quantitativas sobre a redução da permeabilidade e a recuperação da integridade estrutural do concreto tratado.

### **3.7 Equipamentos necessários para a realização dos testes**

Para a execução dos testes de vazão e análise da eficácia dos aditivos cristalizantes na autocicatrização de fissuras em concreto, foi necessária uma seleção cuidadosa de equipamentos, organizados em três etapas principais: preparo dos corpos de prova, rompimento e geração das fissuras, e realização dos testes de vazão.

**Betoneira:** usada para promover uma mistura homogênea dos componentes do concreto, garantindo uniformidade na composição do material, conforme as dosagens estabelecidas, marca CSM modelo 400L 1 Traço Max Mono 220V.

**Moldes de PVC:** com dimensões de 10 cm de diâmetro e 25 cm de altura, esses moldes padronizados foram utilizados para moldar os corpos de prova cilíndricos, assegurando que tivessem as mesmas proporções e permitindo comparações consistentes.

**Balança de precisão:** essencial para a medição exata dos materiais, garantindo a conformidade com a dosagem projetada e a padronização do preparo do concreto, marca Bel modelo TX-6002 60 KG X 2g.

**Tanque de cura:** mantém os corpos de prova sob condições controladas de umidade e temperatura, fundamentais para a cura ideal do concreto, assegurando o desenvolvimento adequado das propriedades de resistência do material.

**Prensa hidráulica:** Utilizada para gerar fissuras nos corpos de prova, simulando condições de esforço que poderiam ocorrer em uma estrutura de concreto. A carga aplicada pela prensa é controlada, visando a obtenção de fissuras

com abertura precisa e controlada, marca SOLOTEST modelo 200f - 220V-60Hz 930kg .

**Fisurômetro:** ferramenta usada para medir a largura das fissuras, garantindo que estejam dentro das especificações necessárias para a aplicação dos aditivos e a avaliação subsequente de vazão.

**Equipamento de medição de vazão:** desenvolvido para este trabalho, consiste em um reservatório superior de água com sistema de controle de fluxo, permitindo que a água passe por gravidade sobre os corpos de prova fissurados. Cada corpo de prova é colocado em uma câmara individual para assegurar medições precisas e independentes de vazão.

**Béqueres para coleta de água:** situados abaixo das câmaras de ensaio, esses recipientes coletam a água que passa pelas fissuras, permitindo a medição precisa do volume de água em intervalos de tempo.

**Instrumentos de medição e calibração:** incluem cronômetros de alta precisão para o controle do tempo de coleta e balanças de precisão para medir a quantidade exata de água coletada em cada teste. Equipamentos de calibração também foram utilizados para garantir que o fluxo inicial fosse uniforme em todas as etapas dos ensaios de vazão de água nos corpos de prova fissurados.

### **3.8 Desenvolvimentos do equipamento para medição da vazão da água**

Para este estudo, foi necessário o desenvolvimento de um equipamento específico para medir a vazão de água em corpos de prova de concreto fissurados. Esse equipamento foi projetado para atender às condições de teste e garantir precisão nas medições, permitindo avaliar a eficiência dos aditivos cristalizantes no processo de autocicatrização.

O sistema foi desenvolvido a partir de um conceito de fluxo gravitacional, utilizando um reservatório elevado que armazena a água e permite sua passagem controlada através das fissuras dos corpos de prova. O equipamento foi projetado com um suporte ajustável, que facilita o posicionamento dos corpos de prova abaixo do reservatório, garantindo que o fluxo de água incida diretamente sobre as fissuras, sem dispersões laterais.

Para assegurar que cada corpo de prova pudesse ser testado de forma independente, foram criadas câmaras de ensaio individuais, que evitam interferências e facilitam o monitoramento da vazão de cada espécime. Sob cada câmara de ensaio, recipientes de coleta específicos foram posicionados para captar a água que passa através das fissuras e permitir medições precisas do volume de vazão.

Adicionalmente, a precisão na leitura do tempo de coleta foi garantida por um cronômetro digital sincronizado com o início de cada coleta, sendo este fundamental para obter uma taxa de vazão exata ao longo de cada intervalo de tempo. Esse sistema customizado proporcionou um controle preciso dos testes e uma coleta rigorosa dos dados, tornando possível uma análise detalhada do desempenho do concreto autocicatrizante.

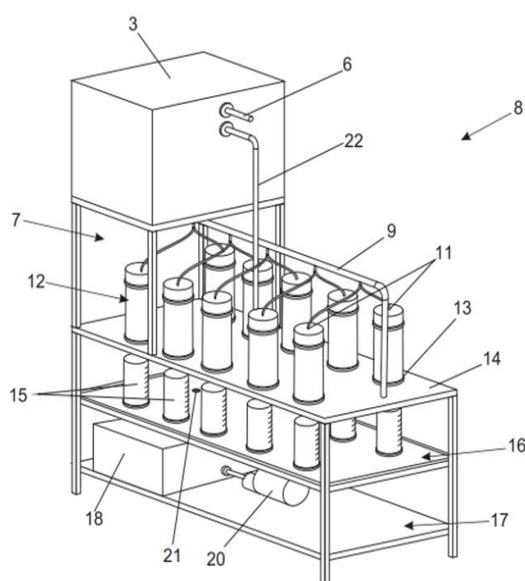
Com esse equipamento, tornou-se viável mensurar as variações de vazão ao longo do tempo, oferecendo uma base sólida para verificar a eficácia dos aditivos cristalizantes e seu potencial na promoção da autocicatrização no concreto, pela redução progressiva da vazão de água através das fissuras.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Patente do equipamento**

O equipamento destinado à medição e monitoramento da vazão de água em dispositivos hidráulicos. Este sistema foi especialmente concebido para aplicações experimentais em laboratório, apresentando características que favorecem a precisão, a flexibilidade e a segurança dos ensaios. O equipamento foi registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o número de depósito BR 10 2024 009216-7, demonstrando seu ineditismo e potencial de aplicação em contextos acadêmicos e industriais (BRASIL, 2024).

**Figura 11.** Representação esquemática do equipamento patenteado.



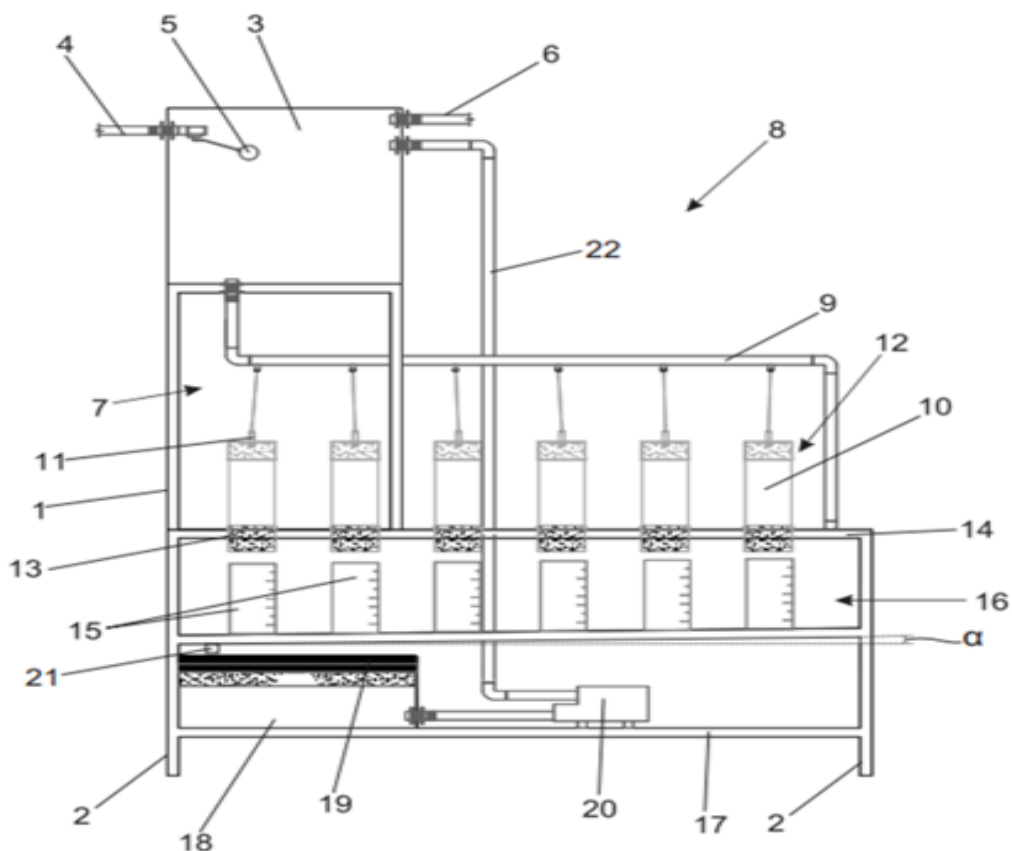
1. Suporte e base para reservatório de água
2. Base com quatro apoios para sustentação do equipamento
3. Reservatório de água
4. Entrada de água
5. Boia de controle de nível de água
6. Ladrão de água (transbordo)
7. Seção intermediária de sustentação do reservatório
8. Equipamento completo (visão geral)
9. Tubulação de distribuição da água
10. Corpos de prova envelopados com PVC
11. Tampas superiores em PVC com entrada de água
12. Câmaras individuais em PVC para os corpos de prova
13. Base de encaixe dos corpos de prova
14. Plataforma de apoio superior
15. Béqueres para coleta da água percolada
16. Base com leve declive para drenagem
17. Estrutura inferior de suporte para bomba e filtro
18. Tanque auxiliar com filtro
19. Mídia filtrante no tanque
20. Bomba de recirculação da água
21. Dreno localizado na base inclinada
22. Tubo de alimentação principal

Fonte: Elaborado pelo autor. 2025

O dispositivo é constituído por três módulos principais, organizados de maneira modular sendo três módulos diferentes, o módulo de alimentação, responsável por garantir o suprimento e a estabilidade do escoamento do fluido, o módulo de medição, que abriga sensores de pressão diferencial posicionados a montante e jusante do componente a ser testado, o módulo de descarte ou recirculação, responsável por direcionar o fluido após o ensaio.

A principal inovação reside na integração desses componentes em uma estrutura portátil, adaptável e de fácil operação, construída com materiais comerciais de baixo custo e elevada resistência. O sistema inclui válvulas de controle de vazão, elementos de retenção, conectores rápidos, suportes estruturais em polímero e pontos de calibração que asseguram a repetibilidade dos ensaios e a integridade dos dados experimentais.

**Figura 12.** Vista lateral do equipamento patentado.



**Legenda - Componentes do Equipamento Representado nas Figuras**

1. Suporte e base para reservatório de água
2. Base em 4 apoios para todo equipamento
3. Reservatório de água
4. Entrada de água
5. Boia que controla entrada de água
6. Ladrão de água
7. Seção intermediária para ajudar na sustentação do reservatório
8. O dispositivo como um todo
9. Tubo para distribuição de água
10. Corpos de prova envelopados por PVC
11. Tampos de PVC com entrada de água
12. Câmaras de PVC
- 13 e 14. Base onde os corpos de prova encaixam
15. Béqueres para medição
16. Base com declive
17. Base para filtro e bomba
- 18 e 19. Tanque com filtro
20. Bomba
21. Dreno da base com declive
22. Tubo de alimentação principal

O equipamento foi empregado em uma série de ensaios hidráulicos com diferentes configurações geométricas e condições de escoamento. A modularidade do sistema permitiu sua rápida adaptação às particularidades de cada configuração experimental. Os dados obtidos apresentaram excelente concordância com os modelos teóricos utilizados como referência, validando tanto o desempenho do dispositivo quanto a metodologia experimental aplicada.

Além disso, a utilização do sistema proporcionou benefícios operacionais significativos, como a redução do tempo de montagem dos experimentos, facilidade de higienização e manutenção, maior segurança para o operador e versatilidade de uso em diferentes escalas e condições. A possibilidade de desmontagem e transporte do conjunto, permite seu uso para aplicações didáticas e projetos de extensão tecnológica.

Dessa forma, o desenvolvimento do equipamento não apenas contribuiu diretamente para a obtenção dos resultados apresentados nesta pesquisa, como também representa um avanço técnico relevante no campo da engenharia.

O equipamento como vemos na figura 1 e 2 seria melhor descrito da seguinte forma (1) suporte e base para reservatório de água (2) base em 4 apoios para todo equipamento (3) reservatório de água (4) entrada de água (5) boia que controla entrada de água (6) ladrão de água (7) seção intermediária para ajudar na sustentação do reservatório (8) o dispositivo como um todo (9) tubo para distribuição de água (10) corpos de prova envelopados por pvc (11) tampos de pvc com entrada de água (12) câmaras de pvc (13 e 14) base onde os corpos de prova encaixam (15) béqueres para medição (16) base com declive (17) base para filtro e bomba (18 e 19) tanque com filtro (20) bomba (21) dreno da base com declive.

## **4.2 Metodologia**

### **4.2.1 Teste 1**

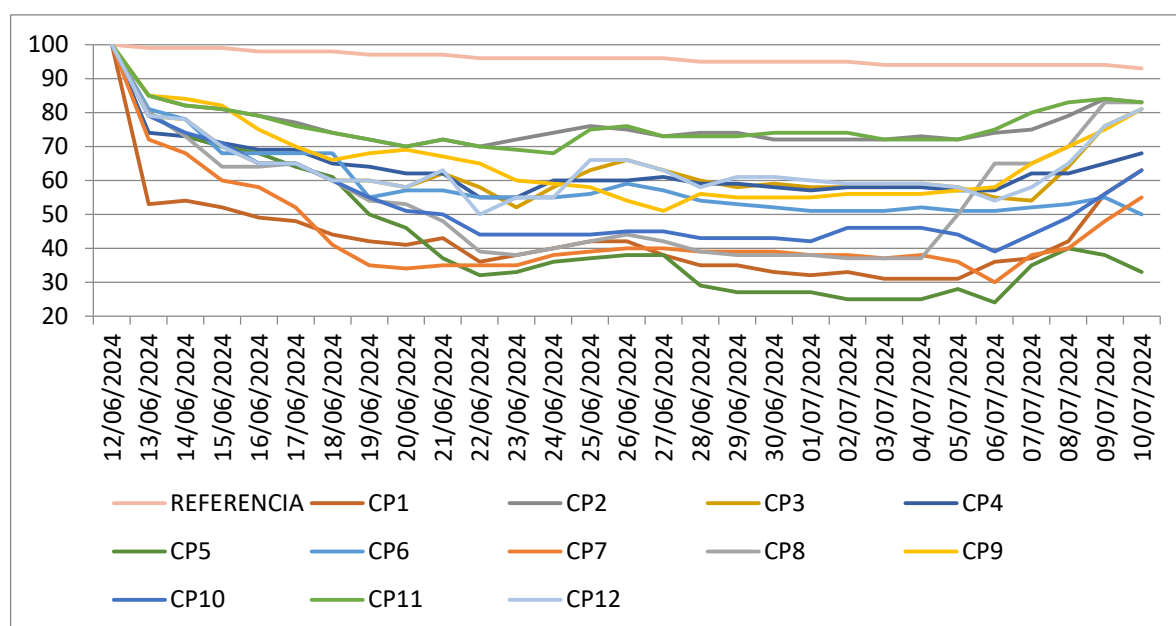
O primeiro conjunto de testes teve como objetivo avaliar as amostras de concreto com cura de 28 dias, medindo a permeabilidade relativa em porcentagem e a abertura inicial das fissuras, variando entre 0,4 e 0,5 mm. Os resultados

demonstraram que o equipamento desenvolvido para a aplicação do aditivo cristalizante atendeu de maneira eficaz ao propósito proposto, garantindo a distribuição uniforme e o preenchimento adequado dos poros capilares do concreto.

Esse processo resultou em uma significativa redução na penetração de água, evidenciando a eficiência do equipamento em promover a melhoria das propriedades impermeabilizantes do material.

O desempenho do equipamento variou conforme a largura das fissuras iniciais, mas, de forma geral, todos os corpos de prova apresentaram uma melhora substancial na resistência à permeabilidade, quando comparados ao corpo de prova referência (sem o aditivo autocicatrizante). Isso confirma que a aplicação do aditivo cristalizante, através do equipamento, contribuiu de maneira eficaz para o aumento da durabilidade do concreto, atendendo à proposta de reduzir a penetração de água e fortalecer a estrutura do material.

**Figura 13:** Teste 1 dos corpos de prova



EIXO VERTICAL - Permeabilidade Relativa (%) EIXO HORIZONTAL – Data das medições

Fonte: Elaborado pelo autor. 2025.

#### 4.2.2 Teste 2

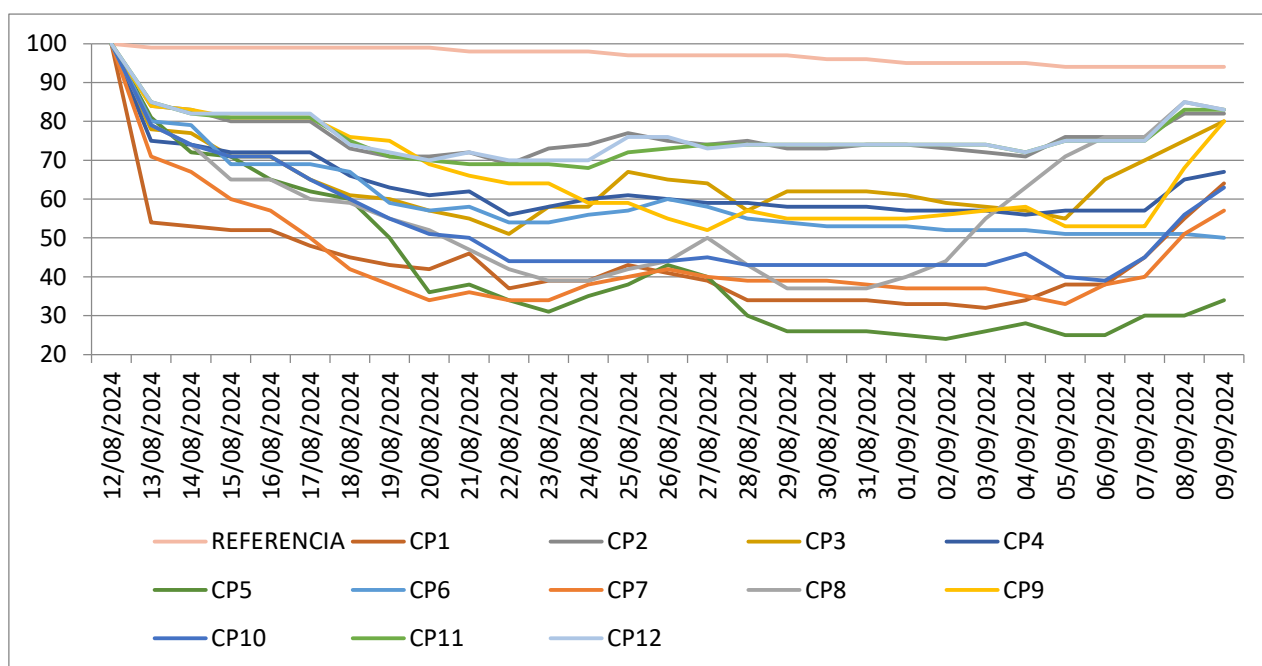
O segundo conjunto de testes seguiu a mesma metodologia do primeiro, avaliando o comportamento dos corpos de prova sob condições semelhantes. Os

resultados obtidos corroboraram os dados iniciais, demonstrando que o equipamento e o aditivo cristalizante continuaram a proporcionar uma redução consistente na permeabilidade relativa do concreto.

Além disso, foi observado um selamento parcial das fissuras menores, o que garantiu a manutenção da integridade estrutural dos corpos de prova. O comportamento do concreto, quando exposto à ação do aditivo, mostra que a autocicatrização foi eficaz em áreas de fissuras iniciais, assegurando que o material mantivesse suas propriedades de impermeabilidade e resistência, mesmo diante de fissuras menores.

Esses resultados confirmam que o equipamento desenvolvido não só atendeu às expectativas quanto à aplicação do aditivo cristalizante, mas também demonstrou eficácia na promoção da autocicatrização e manutenção da integridade estrutural do concreto ao longo do tempo.

**Figura 14:** Teste 2 dos corpos de prova



EIXO VERTICAL - Permeabilidade Relativa (%) EIXO HORIZONTAL – Data das medições

Fonte: Elaborado pelo autor. 2025.

Ambos os testes demonstraram que os corpos de prova contendo o aditivo cristalizante apresentaram uma autocicatrização relevante ao longo do período analisado. Ressalta-se que a ação desse tipo de aditivo não se limita ao intervalo de tempo avaliado, podendo manter sua eficácia mesmo após o encerramento dos ensaios, o que sugere uma tendência de melhoria contínua da impermeabilidade ao longo do tempo. Observou-se ainda que, em grande parte das amostras, houve uma redução significativa na vazão de água inicialmente, seguida por um novo aumento pontual. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza não uniforme das fissuras geradas durante os testes, as quais favorecem o surgimento de caminhos alternativos para o escoamento da água. Nesses casos, o processo de cicatrização pode demandar mais tempo para a formação de cristais capazes de vedar completamente as novas trajetórias, reforçando a importância de períodos de avaliação prolongados em estudos futuros.

## **5 CONCLUSÕES**

O desenvolvimento do equipamento proposto nesta dissertação mostrou-se plenamente funcional, atendendo aos requisitos técnicos e operacionais definidos ao longo do trabalho. A sua aplicação prática nos testes realizados evidenciou sua capacidade de operar de forma eficiente, segura e reprodutível, demonstrando que a concepção e os materiais utilizados foram adequados para os objetivos propostos.

Além disso, a metodologia estabelecida para a utilização do equipamento foi testada de maneira sistemática, apresentando resultados consistentes que confirmam sua viabilidade técnica e científica. Os procedimentos experimentais aplicados, bem como os dados coletados, permitem afirmar que a metodologia é eficaz na obtenção dos parâmetros desejados e pode ser replicada em futuras pesquisas ou aplicações industriais.

Dessa forma, conclui-se que tanto o equipamento quanto a metodologia desenvolvidos e empregados neste estudo representam contribuições válidas e inovadoras para a área de pesquisa abordada, abrindo novas possibilidades para investigações futuras e otimizações tecnológicas.

Adicionalmente, os resultados obtidos nos ensaios com concretos contendo aditivo cristalizante indicaram uma autocicatrização relevante ao longo do período

analisado. Vale destacar que a ação desse tipo de aditivo persiste mesmo após o encerramento dos testes, sugerindo uma potencial melhora contínua da impermeabilidade. Em diversos corpos de prova foi observada uma redução inicial na vazão de água, seguida por um leve aumento em determinados momentos, possivelmente devido à heterogeneidade das fissuras, que podem ter permitido a abertura de novos caminhos de percolação. Nessas situações, a atuação do aditivo tende a demandar mais tempo para preencher integralmente essas rotas alternativas, o que reforça a importância de estudos com acompanhamento em períodos prolongados para melhor compreender o comportamento de longo prazo desses materiais.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados obtidos e nas observações realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, identificam-se algumas oportunidades de aprimoramento e continuidade do trabalho. Dentre as principais perspectivas para estudos futuros, destacam-se:

Ampliação da quantidade de testes realizados, de modo a reforçar a robustez estatística dos dados obtidos e permitir análises mais aprofundadas sobre a variabilidade dos resultados em diferentes condições experimentais.

Realização de ensaios em ambientes salinos, visando avaliar o comportamento dos corpos de prova sob condições mais agressivas, simulando cenários de exposição reais, especialmente em contextos onde a corrosividade representa um fator crítico de degradação.

Aprimoramento da metodologia na etapa de rompimento dos corpos de prova, com o objetivo de aumentar a precisão e a repetibilidade dos ensaios destrutivos, garantindo maior controle sobre os parâmetros envolvidos nesse processo.

Melhorias no equipamento desenvolvido, especialmente no que diz respeito à sua capacidade de análise e automação, permitindo maior eficiência operacional, maior volume de amostras analisadas e potencial integração com sistemas digitais de coleta e tratamento de dados.

Essas direções de continuidade têm potencial para ampliar significativamente o alcance e a aplicabilidade do estudo, contribuindo para o avanço técnico-científico na área e promovendo inovações com impactos relevantes tanto na pesquisa quanto na indústria.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Advances in Modifications and High-Temperature Applications of Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites in Aerospace: A Focused Review.** *Ceramics International*, 2021.

**ALMEIDA, José Antônio Santos de.** O concreto como material de construção. *Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 1, n. 17, p. 49–58, out. 2013.

**AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL COMITEE.** *Engineered materials handbook: composites*. v. 1. USA: ASM International, 1987.

**AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL COMITEE.** *Engineered materials handbook: engineering plastics*. v. 2. USA: ASM International, 1987.

**ANDOLFATO, Rodrigo Piernas.** *Controle tecnológico básico do concreto*. 2002.

**ARAÚJO, Lúcio Otávio Costa de.** *Método para a previsão e controle da produtividade da mão-de-obra na execução de fôrmas, armação, concretagem e alvenaria*. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

**ARICI, A. A.** Effect of hygrothermal aging on polyetherimide composites. *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, Berlin, v. 26, n. 18, 2007.

**BANDEIRA, C. F.** *Aplicação de frequências não convencionais na obtenção de curvas de DMA de compósitos poliméricos*. 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

**BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos.** *Estruturas de Concreto I*. 2019.

**BOEING COMPANY.** *Composite materials handbook: polymer matrix composit – materials usage, design and analyses guidelines*. v. 2. US: Department of Defense, 2002. 693 p. (Commercial Data Bulletin, Apr. 2015).

**CHAWLA, K. K.** *Composite Materials: Science and Engineering*. 3. ed. Springer, 2012.

**COSTA, Gilmar Veloso da.** *Uso do concreto leve na construção civil*. 2016.

**COUTO, José Antônio Santos et al.** O concreto como material de construção. *Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 1, n. 17, p. 49–58, out. 2013.

**DIONÍSIO, Iago Serpa; QUARESMA, José Eduardo; FLORIAN, Fabiana.** Eficácia de técnicas e produtos de reabilitação em estruturas de concreto armado: uma revisão bibliográfica. *Revista Científica Multidisciplinar RECIMA21*, v. 4, n. 1, p. 1–17, jan. 2023.

**EL-ANSARY, A. et al.** Sustainability assessment of ultra-high-performance concrete mixtures incorporating high-volume supplementary cementitious materials. *Cleaner Materials*, v. 5, 2024.

**GALLI, Nicholas Borchardt.** *Revisão do processo de autocicatrização em caldas de injeção de alvenaria antiga à base de cal*. 2023.

**GAMBALE, A. L.; POSSAN, E.; HASPARYK, N. P.** Avaliação da capacidade de autocicatrização de argamassas especiais contendo aditivo mineral cristalizante e agentes biológicos. *Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção e Congresso de Controle de Qualidade na Construção*, 2023.

**GONZÁLEZ-GARCÍA, Y. M. et al.** Effect of nanocellulose on mechanical properties of cementitious materials: a review. *Green Materials*, v. 12, n. 1, p. 1–16, 2024.

**KUMAR, R.; SINGH, R.; HASHMI, M. S. J.** Polymer-Ceramic Composites: A State of Art Review and Future Applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2020.

**LI, X. et al.** Research and application of biomimetic modified ceramics and ceramic composites: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024.

**LIU, Rui et al.** Design method of high transport performance biochar-cement based materials based on particle size distribution and permeation probability calculation model. *Construction and Building Materials*, v. 411, p. 134557, 2023.

**MOHAMED, W. A. A. et al.** Role of nanotechnology in cement-based materials: evaluation of nanocellulose, nanosilica, and nanoclay as partial replacements. *Egyptian Journal of Chemistry*, v. 67, n. 2, p. 227–238, 2024.

**NASCIMENTO, E. M. et al.** Durability and microstructural aspects of sustainable concrete with ceramic waste: a review. *Frontiers in Materials*, v. 11, 2024.

**PEÑA, Jorge Ronaldo et al.** Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica*, v. 23, n. 1, p. 94–109, jan.–jun. 2022.

**PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.** *Fundamentos do concreto e projeto de edifícios*. São Carlos: Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

**RASHID, B. et al.** Breaking Boundaries with Ceramic Matrix Composites: A Comprehensive Overview of Materials, Manufacturing Techniques, Transformative Applications, Recent Advancements, and Future Prospects. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024.

**SANTOS, Alexandre Pimenta.** *Análise comparativa de custo de um edifício residencial dimensionado em concreto armado e alvenaria estrutural*. 2022. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2022.

**SHAIKH, F. U. A. et al.** Sustainable development of engineered cementitious composites incorporating nanocellulose and high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 416, 2024.

**SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da.** *Recuperação e reforço em elementos estruturais de concreto armado*. 2009.

**SINGH, M. et al.** Optimising sustainability in concrete using sugarcane bagasse ash and stone dust: mechanical and environmental assessment. *Scientific Reports*, v. 14, art. 3125, 2024.

**WACHTMAN, J. B.; CANNON, W. R.; MATTHEWSON, M. J.** *Mechanical Properties of Ceramics*. John Wiley & Sons, 2009.

**WU, R. et al.** Field implementation of cellulose nanocrystals in concrete pavements: A pilot study. *International Journal of Pavement Engineering*, 2024.

**ZHANG, S.; LI, V. C.; YE, G.** Micromechanics-guided development of a slag/fly ash-based strain-hardening geopolymer composite. *Cement and Concrete Composites*, v. 109, p. 103510, 2020.

**ZHANG, W.** Recent progress in B<sub>4</sub>C–SiC composite ceramics: Processing, microstructure, and mechanical properties. *Materials Advances*, v. 4, p. 3140–3191, 2023.

**ZHOU, Y. et al.** Mechanical properties and strengthening mechanism of SiC particle reinforced porcelain. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024.