

ADITIVOS CRISTALIZANTES NA MELHORIA DA DURABILIDADE DO CONCRETO: EFEITOS NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E NA PERMEABILIDADE

Hadassa Mariana Silva Moraes Gomes

Bacharela em Engenharia Civil (hadassamariana058@gmail.com)

João Miguel Gomes da Silva Neto

Bacharel em Engenharia Civil (joaomiguelsn@gmail.com)

Marcos Dantas Carneiro

Bacharel em Engenharia Civil (marcosdantaskbl98@gmail.com)

Sara Rodrigues Rocha

Bacharela em Engenharia Civil (sararidriguesrocha98.98@gmail.com)

Julliana Simas Vasconcellos

Doutora, Docente da Universidade Estadual de Goiás - UEG (julliana.simas@ueg.br)

Ana Lúcia Carrijo Adorno

Doutora, Docente da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA e Universidade Estadual de Goiás - UEG (ana.carrijo@unievangelica.edu.br; ana.adorno@ueg.br)

RESUMO

Este trabalho investiga a influência da incorporação de aditivo cristalizante na permeabilidade e no desempenho mecânico do concreto, com foco em sua aplicação como tecnologia de autocicatrização ativa. Diante da necessidade crescente de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado frente à penetração de agentes agressivos, como cloretos e dióxido de carbono, o uso de aditivos para redução de permeabilidade (ARP) apresenta-se como uma alternativa promissora. Para avaliar essa tecnologia, foram produzidos quatro traços de concreto com relação a/c de 0,45: um de referência e três com 1%, 1,5% e 2% de aditivo cristalizante em massa de cimento. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão simples (NBR 5739), tração por compressão diametral (NBR 7222) e absorção de água por capilaridade (NBR 9779), aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados indicaram que a adição do aditivo, especialmente nas dosagens de 1% e 1,5%, proporcionou ganhos mecânicos relevantes — com acréscimos médios superiores a 20% em relação ao traço padrão — e reduziu significativamente a absorção capilar, atingindo valores inferiores a um terço da referência. A dosagem de 2% foi a mais eficaz na selagem capilar, porém com ganhos de resistência menos expressivos, sugerindo um retorno decrescente em dosagens mais elevadas. Assim, o estudo demonstra que o aditivo cristalizante é eficiente na obstrução da rede porosa e no reforço estrutural do concreto, com custo-benefício otimizado na faixa de 1% a 1,5% de adição. Esses achados reforçam o potencial da tecnologia como solução viável e sustentável para a construção civil, especialmente em estruturas expostas a ambientes úmidos e agressivos.

PALAVRAS-CHAVE: Aditivo cristalizante; Concreto autocicatrizante; Permeabilidade; Resistência mecânica; Absorção capilar.

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais cimentícios na construção acompanha a história humana desde as argamassas de gesso dos egípcios e as misturas de calcário calcinado, areia e fragmentos cerâmicos desenvolvidas por gregos e romanos, precursoras do concreto moderno (Neville e Brooks, 2013). A evolução desses compósitos culminou no concreto estrutural contemporâneo, valorizado pela elevada resistência à compressão e pela ampla disponibilidade de cimento, areia e agregados, atributos que mantêm seu custo relativamente baixo (Dyer, 2015; Costa, 2022).

Todavia, a baixa resistência à tração do concreto favorece a formação de fissuras que ampliam a permeabilidade e permitem o ingresso de cloretos e dióxido de carbono, acelerando a corrosão das armaduras (Oliveira, 2019; Lima *et al.*, 2022). Esse processo compromete diretamente a segurança e a funcionalidade das estruturas (Gaspar e Guimarães, 2019; Ziegler, 2020), e, embora armaduras de aço e detalhamentos cuidadosos ajudem a limitar a abertura dessas fissuras, não suprimem totalmente os caminhos para agentes agressivos (Schmidt *et al.*, 2022).

Nesse contexto, aditivos cristalizantes, designados neste estudo como aditivos para redução de permeabilidade (ARP), ganharam destaque: ao reagirem com a umidade migrante, formam cristais que selam poros e microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, a necessidade de reparos (Leão e Rohden, 2021; Bianchin, 2018). Esse mecanismo é especialmente vantajoso em túneis, barragens e estruturas costeiras, expostas continuamente a água e cloretos (Takagi, 2013; Gaspar e Guimarães, 2019).

A corrosão das armaduras decorre, sobretudo, da carbonatação do concreto e da penetração de íons cloreto (Baroghel-Bouny, Capra e Laurens, 2014); limitar a abertura de fissuras e a permeabilidade global da matriz é, portanto, essencial para prolongar a vida útil das edificações (Moreira, 2017). Além disso, a redução de intervenções de manutenção diminui o consumo de matérias-primas e as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento, promovendo benefícios ambientais significativos (Araújo; Rodrigues; Freitas, 2000; Schlangen e Joseph, 2009; Wu *et al.*, 2012).

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficácia do ARP na redução da permeabilidade do concreto e verificar sua influência na resistência mecânica. Para atingir essa meta, propõem-se três objetivos específicos: (i) quantificar o efeito do aditivo sobre a absorção de água por capilaridade, parâmetro que reflete a capacidade de ingresso de agentes corrosivos; (ii) analisar o desempenho mecânico do concreto aditivado por meio de ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral, identificando possíveis ganhos ou perdas de resistência; e (iii) comparar esses resultados com os de um concreto convencional, investigando se o uso do ARP oferece vantagens duráveis e economicamente viáveis para a construção civil.

Para responder a essas questões, corpos-de-prova com e sem ARP foram moldados e submetidos a ensaios laboratoriais de absorção capilar, compressão e tração diametral em condições controladas, permitindo uma avaliação sistemática do efeito do aditivo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A durabilidade do concreto é um tema central na construção civil, pois a longevidade das estruturas afeta diretamente a segurança e a economia de projetos de grande porte. O desempenho a longo prazo do concreto depende de sua capacidade de

resistir aos desafios ambientais e de uso, minimizando a necessidade de reparos e manutenção.

A durabilidade de estruturas de concreto refere-se à sua capacidade de resistir às condições ambientais e operacionais, mantendo a integridade estrutural e funcionalidade ao longo do tempo. Segundo as normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ISO 13823:2008, a durabilidade deve atender aos critérios de segurança e estabilidade definidos em projeto, permitindo que a estrutura mantenha o desempenho esperado sem necessidade de reparos significativos (ABNT, 2010). Desde a década de 1980, normas internacionais — e, no Brasil, a NBR 6118 (2003), passaram a exigir durabilidade como critério obrigatório de desempenho estrutural.

A vida útil do concreto depende do material, do ambiente e da manutenção; baixa permeabilidade bloqueia cloretos e CO_2 , preservando armaduras (Araújo *et al.*, 2000; Neville, 2016).

Aplicar critérios de durabilidade evita fissuras e corrosão precoces, reduz custos de reparo e favorece a sustentabilidade (Silva, 2007). Essa compreensão permite que engenheiros projetem estruturas mais resistentes, avaliando o desempenho do concreto em diferentes condições e promovendo economia e sustentabilidade ao minimizar o consumo de novos materiais e o impacto ambiental dos processos de manutenção e reparo. Partindo daí, notou-se que deveria ser adotado algo para amenizar essa problemática: o uso de concretos de alto desempenho pode evitar muitas patologias, especialmente quando não são submetidos a esforços de flexão, que geram fissuras e aumentam a permeabilidade (Silva, 2007).

Aguiar (2006) atribui a maioria das falhas de durabilidade a deficiências de projeto, execução e controle, mais do que à qualidade intrínseca do cimento. Além disso, falhas em estruturas de concreto geralmente estão mais associadas a técnicas de construção inadequadas do que à qualidade do material (Britez, 2013).

Difusão, absorção capilar e permeabilidade atuam em conjunto para levar líquidos ao interior do concreto, comprometendo-o ao longo do tempo (Ferreira, 2000). Essa movimentação é influenciada pela estrutura da pasta de cimento hidratada e pela presença de fissuras, que aumentam a permeabilidade do concreto.

A durabilidade do concreto proporciona economia ao reduzir os custos com manutenção e reparos e contribui para a sustentabilidade ao diminuir a demanda por novos materiais. Diversos mecanismos, como difusão, absorção capilar e permeabilidade, facilitam a entrada de líquidos no concreto, e esses processos geralmente atuam de forma combinada, comprometendo a integridade do material ao longo do tempo (Ferreira, 2000).

Fissuras permitem a entrada de agentes agressivos, acelerando a corrosão das armaduras e exigindo manutenções frequentes (Gaspar e Guimarães, 2019). Esses agentes aceleram o processo de corrosão das armaduras internas e afetam a durabilidade das construções, resultando em maior necessidade de manutenção e reparos. Mesmo com o uso de armaduras de aço para controlar a formação de fissuras, o concreto armado não é totalmente imune ao surgimento dessas aberturas, que podem evoluir ao longo do tempo e comprometer a estrutura.

Em resposta a essa necessidade, surgiram as tecnologias de autocicatrização, que visam prolongar a vida útil do concreto e reduzir os custos associados à manutenção. O concreto autocicatrizante se destaca por sua capacidade de fechar fissuras de forma autônoma, sem intervenção humana, e de recuperar parte de suas propriedades iniciais. Essa propriedade é inspirada em processos regenerativos observados em organismos vivos, como o processo de cicatrização da pele humana (Zwaag, 2007). A aplicação do concreto autocicatrizante é especialmente vantajosa em ambientes agressivos e em infraestruturas de difícil acesso para manutenção, como túneis, barragens e estruturas costeiras (Schlangen e Joseph, 2009).

A adoção do concreto autocicatrizante na construção civil alinha-se às demandas contemporâneas por sustentabilidade, inovação e economia. Além de diminuir a necessidade de reparos, essa tecnologia contribui para práticas construtivas mais sustentáveis, minimizando o consumo de matérias-primas e energia ao longo da vida útil da estrutura. Com a introdução de aditivos específicos, como os cristalizantes, o concreto autocicatrizante pode restaurar microfissuras e aumentar sua durabilidade estrutural, oferecendo uma alternativa moderna e eficiente para obras que exigem resistência e longevidade (Bianchin, 2018; Takagi, 2013).

O concreto autocicatrizante é um material que se caracteriza pela capacidade de reparar automaticamente fissuras internas sem necessidade de intervenções externas, aumentando a durabilidade das estruturas e reduzindo custos de manutenção. Segundo a RILEM 221-SHC (2013), a autocicatrização envolve processos automáticos de preenchimento e selagem de fissuras, promovendo a recuperação do desempenho do material deteriorado. Esse processo pode ocorrer naturalmente, por mecanismos internos ao próprio concreto, ou através da adição de agentes específicos que facilitam a cura.

Há duas categorias principais para as estruturas autocicatrizantes: estruturas passivas e estruturas ativas (Ghosh, 2009). Em estruturas passivas, a cicatrização ocorre naturalmente, principalmente pela hidratação de partículas de cimento não hidratadas e pela precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3), que, em presença de umidade, sela as fissuras no concreto. Esse processo, conhecido como autocura natural, é eficaz para fissuras pequenas de até 0,5mm e requer a presença de água para ser ativado (Edvardsen, 1996; Tittelboom; De Belie, 2013).

Por outro lado, as estruturas ativas empregam aditivos específicos, como agentes cristalizantes e polímeros superabsorventes, que são liberados em contato com a água nas fissuras, acelerando e intensificando o processo de cicatrização. Esses aditivos encapsulados promovem uma cura controlada e mais rápida, sendo indicados para fissuras maiores e estruturas que estejam sujeitas a condições ambientais adversas, como variações constantes de carga e exposição a agentes agressivos (Schlangen; Joseph, 2009). A cicatrização ativa aumenta a durabilidade do concreto em aplicações críticas, como túneis e infraestruturas costeiras, onde a resistência contra infiltração e corrosão é essencial.

Essas classificações, entre cicatrização passiva e ativa, refletem diferentes abordagens para promover a autocura no concreto autocicatrizante, adaptando-o a diversas condições e exigências estruturais.

O desenvolvimento do concreto autocicatrizante foi impulsionado pelo crescente interesse em soluções de engenharia que aumentem a durabilidade e reduzam a necessidade de manutenção em estruturas de concreto. Desde as primeiras observações de autocura em materiais cimentícios até o uso de aditivos sofisticados e agentes biológicos, a pesquisa nesse campo avançou. Esses estudos foram fundamentais para definir as técnicas atuais de autocicatrização, permitindo o uso de agentes encapsulados, microcápsulas, aditivos cristalizantes e até mesmo bactérias, cada um com o objetivo de aprimorar a capacidade de cicatrização do concreto.

Entre 1836 e 1994, as pesquisas sobre concreto autocicatrizante se concentraram principalmente na observação de fenômenos de autocura natural e no desenvolvimento gradual de tecnologias que foram aplicadas a outros materiais, como polímeros. A primeira documentação formal de autocura em materiais cimentícios foi realizada pela Academia Francesa de Ciências em 1836, em estruturas de retenção de água, onde se observou que a umidade auxiliava no fechamento de fissuras. Essa descoberta estabeleceu uma base para a compreensão de como condições ambientais, especialmente a presença de umidade, poderiam influenciar o fechamento de fissuras no concreto, conceito que viria a ser essencial para o estudo de autocicatrização (RILEM 221-SHC, 2013).

Ao longo do século XX, observações semelhantes foram feitas em estruturas expostas à água, como pontes e reservatórios, revelando a ocorrência espontânea de cicatrização em condições de alta umidade e ciclos de molhagem e secagem. Essas descobertas iniciais foram importantes para reforçar o entendimento de que a presença de água e condições ambientais favoráveis eram fatores essenciais para promover o fechamento de microfissuras no concreto (Reinhardt et al., 2013).

Nos anos 1960, os primeiros registros de aditivos autocicatrizantes em materiais poliméricos também ajudaram a abrir caminho para a aplicação de conceitos de autocura em materiais de construção, incluindo o concreto (White et al., 2001).

O marco mais significativo desse período foi o estudo de Carolyn Dry, em 1994, que propôs o uso de polímeros encapsulados no concreto para liberar agentes de cura quando ocorressem fissuras. Este estudo introduziu pela primeira vez o conceito de autocura ativa no concreto, utilizando encapsulamento para promover a cicatrização de forma controlada e mais eficaz (Dry, 1994). Essa inovação tornou-se a base para o desenvolvimento de técnicas mais avançadas, que, nas décadas seguintes, incorporaram agentes cristalizantes e até mesmo bactérias para aumentar a durabilidade e a eficiência do concreto autocicatrizante (Jonkers, 2010).

A evolução das pesquisas sobre concreto autocicatrizante evidencia o impacto progressivo das inovações tecnológicas no aumento da durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto. As observações iniciais sobre autocura natural em materiais cimentícios destacaram o papel da umidade no fechamento de fissuras, fornecendo uma base para as técnicas modernas de autocicatrização. A partir da década de 1990, com o trabalho de Dry (1994) sobre encapsulamento de polímeros, o conceito de autocura controlada ganhou força, estabelecendo uma abordagem prática para promover a cicatrização ativa em concretos fissurados.

Nas décadas mais recentes, o foco das pesquisas se expandiu para incluir aditivos cristalizantes e agentes biológicos, como bactérias, que não apenas aumentam a eficácia da cicatrização, mas também contribuem para práticas de construção sustentáveis. Estudos como o de Jonkers, que aplicou bactérias para precipitação de carbonato de cálcio, e o de De Belie et al. (2018), que revisou o potencial da biocicatrização, popularizaram o uso de biotecnologia no concreto. Esses avanços, somados às investigações mais recentes sobre o uso de aditivos sustentáveis e materiais pozolânicos, indicam um movimento contínuo em direção a práticas que combinam sustentabilidade e desempenho duradouro.

2.1 MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

A autocicatrização no concreto ocorre por meio de dois mecanismos principais: a autocicatrização autógena e a autônoma. Ambos os métodos buscam promover o fechamento de fissuras e o restabelecimento da resistência, mas utilizam processos distintos para alcançar esses objetivos.

A autocicatrização autógena é um processo natural que ocorre devido aos materiais presentes na própria composição do concreto. Nesse mecanismo, a recuperação das fissuras acontece por meio da hidratação residual de partículas de cimento que não reagiram completamente durante a cura inicial, assim como pela formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), que se precipita nas fissuras em presença de água. O carbonato de cálcio age como um "selante" natural, preenchendo pequenas fissuras e restaurando a integridade do material (RILEM 221-SHC, 2013).

A autocicatrização autógena é particularmente eficaz para fissuras com abertura de até 0,2 mm, mas é limitada em fissuras maiores (Edvardsen, 1996). A presença de umidade é essencial para que esse mecanismo funcione, pois a hidratação residual e o processo de carbonatação que leva à precipitação do carbonato de cálcio dependem de água

(Tittelboom; De Belie, 2013). Esse mecanismo contribui para a durabilidade do concreto em estruturas antigas e é amplamente aproveitado em ambientes onde a manutenção é limitada.

A autocicatrização autônoma, também chamada de cicatrização "projetada", envolve a adição de componentes específicos à matriz do concreto para promover uma recuperação controlada, especialmente em fissuras maiores. Entre os materiais utilizados estão microcápsulas com agentes de cura, polímeros superabsorventes e aditivos cristalizantes, que são ativados pela presença de água nas fissuras, promovendo o fechamento através de reações químicas (Ghosh, 2009). Esse tipo de mecanismo permite uma cicatrização mais eficiente e é indicado para estruturas sujeitas a condições ambientais severas ou que demandam maior controle sobre a recuperação de fissuras.

O uso de agentes como cinzas volantes e fibras também é comum na autocura autônoma, que pode incluir tecnologias mais avançadas, como sistemas vasculares ou bactérias que precipitam carbonato de cálcio (Jonkers, 2010). Esses aditivos são incorporados durante a produção do concreto e são liberados em resposta a fissuras, promovendo um processo de cicatrização mais rápido e eficiente.

A principal diferença entre os dois mecanismos reside nos elementos que promovem a cicatrização. A autocicatrização autógena ocorre naturalmente, utilizando os componentes já presentes no concreto, sendo eficaz para fissuras pequenas e em ambientes onde a umidade é abundante. Esse tipo de autocura é amplamente utilizado em reservatórios e infraestruturas submersas (Edvardsen, 1996).

Por outro lado, a autocicatrização autônoma oferece controle sobre o processo e pode ser aplicada em fissuras maiores. Ela é ideal para infraestruturas complexas e expostas a condições severas, como túneis e pontes, onde os ciclos de carga e variações climáticas exigem soluções de cicatrização mais robustas (RILEM 22-SHC, 2013). Em resumo, a autocicatrização autógena possui um custo menor, enquanto a autônoma, embora mais complexa e geralmente mais cara, proporciona uma cicatrização mais eficaz e versátil em condições adversas (Tittelboom; De Belie, 2013).

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A AUTOCICATRIZAÇÃO

A eficiência do concreto autocicatrizante depende de vários fatores físicos, químicos e mecânicos, que influenciam a capacidade de cicatrização e a durabilidade da estrutura. Esses fatores agem de forma conjunta para estimular a recuperação de fissuras, promovendo o fechamento das aberturas e, em alguns casos, restaurando as propriedades mecânicas do material.

2.2.1 Fatores físicos

Os fatores físicos envolvem o comportamento do concreto em presença de água e incluem a absorção de água e o inchaço do material. A autocicatrização autógena ocorre em grande parte devido ao efeito de inchaço da pasta de cimento, que se inicia nas bordas das fissuras. Quando a água é absorvida pela pasta de cimento hidratado, ocorre uma expansão que fecha pequenas fissuras, e nas fissuras maiores, esse efeito de inchaço pode promover outros processos de autocura. Contudo, existe a possibilidade de que, ao secar, as fissuras se expandam novamente (RILEM 221-SHC, 2013).

2.2.2 Fatores químicos

Os fatores químicos mais relevantes para a autocicatrização incluem a hidratação contínua de partículas de cimento e a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3). Durante

o processo de autocura, o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), liberado pela hidratação do cimento, reage com o dióxido de carbono presente na água, formando carbonato de cálcio, que atua como um selante para fechar fissuras. Esse mecanismo depende diretamente da presença de umidade, pois a água é o meio pelo qual os íons de cálcio e carbonato se dissolvem e reagem para formar o CaCO_3 (Edvardsen, 1996).

A hidratação contínua, que ocorre quando o concreto está em contato com a água, também contribui para o fechamento de fissuras, especialmente em materiais anidros. Esse processo químico de cicatrização é mais eficaz em fissuras pequenas e superficiais, geralmente com abertura inferior a 0,1 mm (Tittelboom; De Belie, 2013).

2.2.3 Fatores mecânicos

Os fatores mecânicos que influenciam a autocicatrização estão relacionados à presença de partículas suspensas na água que circula nas fissuras do concreto. Essas partículas, incluindo finos provenientes da matriz cimentícia e pequenas partículas soltas de cimento, podem se acumular nas regiões mais estreitas das fissuras, ajudando a obstruir a abertura e a promover o fechamento (Heide, 2005). Esse efeito é especialmente relevante em concreto submerso ou em contato constante com a água, onde o fluxo permite o transporte dessas partículas para dentro das fissuras (Reinhardt; Jooss, 2003).

2.2.4 Importância da presença de água

A presença de água é fundamental para a ativação dos mecanismos de autocura no concreto autocicatrizante. Ela atua como meio de transporte para os íons e partículas necessários para os processos químicos e mecânicos de cicatrização. Em concreto autógeno, a água permite a continuidade da hidratação e favorece a formação de carbonato de cálcio, que preenche as fissuras (Edvardsen, 1996). Em concreto com autocicatrização autônoma, a água ativa os agentes encapsulados, como polímeros superabsorventes e aditivos cristalizantes, que promovem o fechamento das fissuras (Takagi, 2013).

A exposição contínua do concreto a ciclos de umidade e secagem pode, inclusive, intensificar o processo de autocura, uma vez que a umidade ativa os mecanismos de inchaço e os processos químicos que contribuem para a recuperação das fissuras, enquanto o ar permite a carbonatação, reforçando o selamento do concreto (RILEM 221-SHC, 2013).

2.2.5 Aditivos utilizados no concreto autocicatrizante

Os aditivos no concreto autocicatrizante desempenham um papel de melhorar sua capacidade de autocura e aumentar a durabilidade das estruturas, especialmente em condições agressivas. A seguir, apresentam-se os principais tipos de aditivos, suas funções e como eles contribuem para o desempenho do concreto autocicatrizante.

Os aditivos para redução de permeabilidade sob pressão hidrostática (ARPH) são materiais cristalinos projetados para reagir com a água e o cimento no concreto, formando silicato de cálcio hidratado e precipitados que bloqueiam poros e microfissuras, aumentando a resistência à penetração de água. Conforme o ACI (2010), esses aditivos cristalinos criam uma estrutura impermeável e continuam ativos durante a vida útil da estrutura, selando novas fissuras que podem surgir com o tempo. Além de aumentar a resistência à água, os ARPHs são particularmente eficazes em estruturas submetidas a pressões hidrostáticas elevadas, como túneis, barragens e pontes. Estudos indicam que esses aditivos podem suportar pressões de até 122 metros de coluna d'água, aproximadamente 400 pés, após a cura completa (Kubal, 2000).

Os aditivos cristalizantes, amplamente utilizados no concreto autocicatrizante, atuam formando cristais em presença de umidade, que obstruem as microfissuras e capilares da estrutura. Este processo é contínuo enquanto houver umidade disponível, o que permite a cicatrização repetida das fissuras ao longo do tempo. Esses aditivos são frequentemente usados para proporcionar uma proteção duradoura contra a infiltração de água e são eficazes para selar fissuras menores, aumentando a durabilidade em ambientes úmidos (Takagi, 2013).

Os polímeros superabsorventes (PSA) são materiais que podem absorver grandes quantidades de água, aumentando de volume e formando um gel macio que ajuda a preencher as fissuras no concreto. Estudos mostram que esses polímeros podem absorver até 500 vezes seu próprio peso em água, o que é particularmente útil para manter o concreto hidratado e promover a autocura (Snoeck, 2012). Quando adicionados ao concreto, os PSA incham ao entrar em contato com a água, bloqueando a passagem de líquidos nas fissuras e impedindo a entrada de agentes agressivos.

A utilização de microcápsulas é outra técnica promissora no campo do concreto autocicatrizante. As microcápsulas contêm agentes de cura que são liberados quando ocorre uma fissura. Esse processo de cicatrização ativa permite que o concreto recupere suas propriedades mecânicas e estanqueidade rapidamente após o surgimento de danos. Os sistemas de encapsulamento podem incluir uma variedade de agentes cicatrizantes, como resinas epóxi e polímeros, que reagem em contato com a água e formam uma barreira para selar a fissura (Tang et al., 2015).

Cada tipo de aditivo oferece benefícios específicos para o concreto autocicatrizante. Os ARPHs são ideais para estruturas sujeitas a pressões hidrostáticas, como fundações e reservatórios, enquanto os aditivos cristalizantes são amplamente utilizados em ambientes com ciclos de umidade e secagem, oferecendo proteção contínua contra infiltrações. Por outro lado, os PSA são indicados para manter o concreto hidratado e auxiliar no fechamento de fissuras maiores, enquanto as microcápsulas proporcionam uma resposta mais rápida e eficiente ao surgimento de danos, tornando-as ideais para aplicações em túneis e pontes expostos a cargas cíclicas.

2.3 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Pesquisas realizadas nas últimas décadas indicam que a durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada à penetração de água e ao transporte de agentes agressivos dissolvidos nesse meio (Abyaneh, Wong, Buenfeld, 2014). Em concretos não saturados, a absorção de água por capilaridade é o principal mecanismo de transporte de fluidos em materiais porosos. De maneira geral, observa-se que a redução da taxa de absorção capilar contribui para o aumento da vida útil das estruturas de concreto (Mccarter, Alaswad, Suryanto, 2018).

A absorção capilar refere-se ao transporte de líquidos através dos poros capilares em razão da tensão superficial do fluido. Esse fenômeno pode ser quantificado por meio de ensaios de absorção capilar. Conforme destaca (Neville, 2016), a sucção capilar é influenciada por características do próprio líquido, como viscosidade, densidade e tensão superficial, bem como por propriedades do material sólido, especialmente a estrutura dos poros, incluindo o raio, a tortuosidade e a continuidade dos capilares. Outros fatores relevantes incluem a energia superficial do material e o seu teor de umidade.

Segundo Ho e Lewis (1987, *apud* Silva Filho, 1994), a taxa de absorção de água resultante da sucção capilar é um importante indicativo da estrutura porosa do material, especialmente em estruturas expostas ao ar. Nesse contexto, observa-se que capilares de menor diâmetro tendem a intensificar e acelerar esse mecanismo.

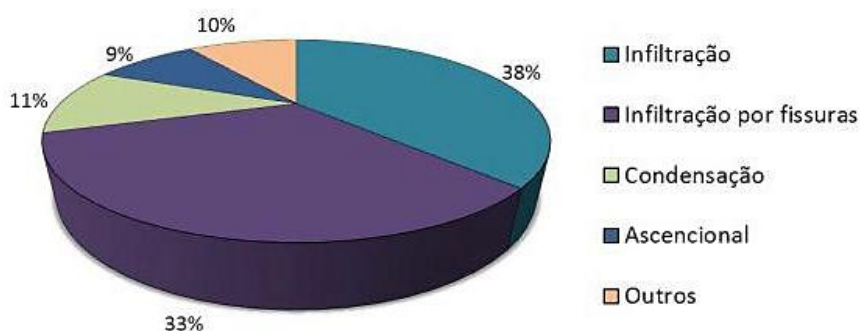
Conforme Helene (1999), a utilização de uma baixa relação água/cimento pode reduzir a absorção de água, pois resulta em concretos mais densos e compactos, com poros de menor diâmetro. No entanto, caso esses poros sejam interligados (comunicáveis), a absorção capilar pode aumentar, devido à maior altura da coluna de água que o sistema poroso consegue sustentar.

A degradação do concreto está diretamente relacionada aos diversos mecanismos de transporte de fluidos em sua estrutura, como já mencionado. Dessa forma, uma das estratégias mais eficazes para aumentar a durabilidade das estruturas é reduzir a permeabilidade do concreto.

Conforme Helene e Andrade (2010), a qualidade potencial do concreto é controlada, principalmente, pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação. Esses dois fatores determinam a absorção capilar, a permeabilidade sob gradiente de pressão de água ou gases, a difusividade de fluidos, a migração elétrica de íons e praticamente todas as propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade, resistências à compressão e à tração, fluência, relaxação e abrasão.

Entre as medidas mais eficazes para limitar a permeabilidade do concreto estão a redução da relação água/aglomerante e os tratamentos que selam fissuras ou criam barreiras à penetração de líquidos. A relevância dessas ações fica evidente no levantamento de Dal Molin (1988 *apud* Andrade, 1997), sintetizado na Figura 1, onde se observa que os fenômenos de infiltração direta e de infiltração por fissuras respondem juntos por cerca de 70% das manifestações patológicas em edificações. Esse percentual reforça que controlar a entrada de água é decisivo para prolongar a durabilidade das estruturas de concreto.

Figura 1- Manifestação patológica nas edificações



Fonte: Andrade (1997).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A seguir descreve-se a metodologia empregada neste estudo. Primeiro, caracterizam-se os materiais — cimento, agregados, água e o aditivo cristalizante — utilizados na produção dos concretos. Depois expõem-se as proporções dos traços, o processo de mistura e os procedimentos de moldagem dos corpos de prova. No estado endurecido, investigaram-se as resistências à compressão e à tração por compressão diametral, obtidas por ensaios conduzidos em idades definidas, com métodos e equipamentos padronizados. Para avaliar o desempenho do aditivo impermeabilizante por cristalização, foram preparados concretos contendo o aditivo e um traço de referência isento de adições, adotado como base de comparação. Todos os ensaios ocorreram no Laboratório de Análise de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás, e os resultados obtidos permitem confrontar diretamente os traços com e sem aditivo cristalizante.

3.1 MATERIAIS

Neste tópico, será feita a identificação dos materiais empregados ao longo da pesquisa, acompanhada da descrição de suas propriedades físicas e químicas relevantes para a análise do desempenho do concreto.

3.1.1 Cimento

No experimento, empregou-se o cimento CP II-Z 32, da marca Ciplan, composto com adições pozolânicas. A presença de pozolana melhora a durabilidade e a resistência química do concreto, tornando-o apropriado para obras expostas a ambientes agressivos, bem como para aplicações em estruturas de concreto armado e pavimentação (Ciplan, 2025). Essa versatilidade motivou sua escolha, pois atende tanto à produção de argamassas quanto de concretos em projetos de variadas escalas. As principais propriedades declaradas pelo fabricante encontram-se resumidas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Características Químicas do CP II-Z 32

Componente	Faixa de concentração (%)
Silicato tricálcico	20 – 70
Silicato dicálcico	10 – 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 – 15
Sulfato de cálcio	2 – 8
Carbonato de cálcio	0 – 20
Óxido de magnésio	0 - 5,5
Óxido de cálcio	0 - 0,2

Fonte: Ciplan, 2025.

Tabela 2 - Características Físicas e Mecânicas do CP II-Z 32

Propriedades	Valor/Descrição
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Solubilidade em água	até 1,5 g/l a 20°C
Massa Específica Absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2 \text{ g/cm}^3$ a 20°C
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C

Fonte: Ciplan, 2025.

3.1.2 Agregado miúdo

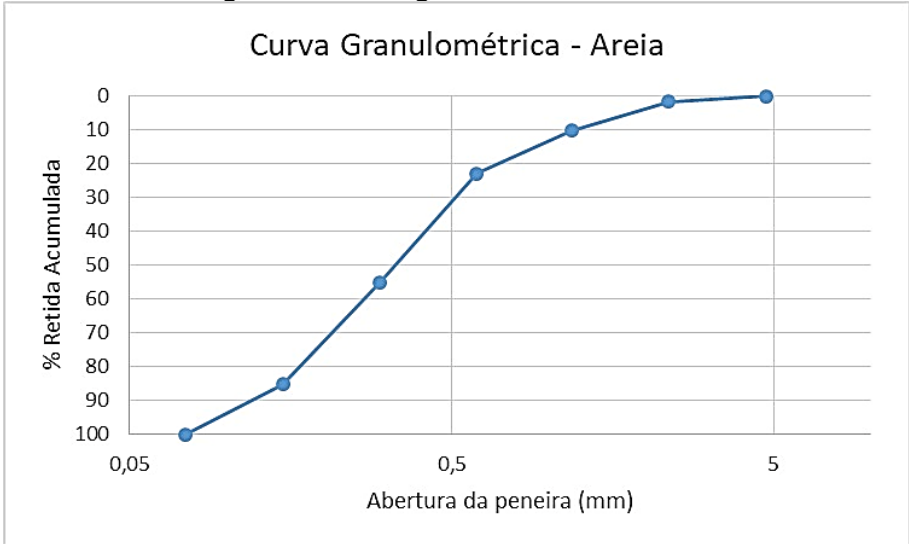
O agregado miúdo utilizado neste estudo é uma areia de rio de origem comercial. Sua caracterização seguiu os procedimentos da NBR 17054 (ABNT, 2022), para a composição granulométrica, da NBR 16916 (ABNT, 2021), para a determinação da densidade. As principais propriedades físicas estão resumidas na Tabela 3, enquanto a Figura 2 ilustra a curva granulométrica determinada para essa areia. Essa tabela apresenta a distribuição granulométrica da areia utilizada como agregado miúdo. Os dados indicam que: A maior parte da massa da areia está concentrada nas peneiras de 0,30 mm (32,13%) e 0,15 mm (30,15%), o que demonstra um material com predominância de grãos finos. A retida acumulada de 85,15% até a peneira de 0,15 mm confirma essa tendência fina. O módulo de finura (1,75) classifica essa areia como muito fina, de acordo com os critérios usuais na tecnologia do concreto. O DMC (diâmetro médio característico) de 1,18 mm e a baixa variação (%) de 0,05 indicam uniformidade e regularidade granulométrica, o que contribui para uma boa trabalhabilidade. Implicações para o concreto: areias finas como essa tendem a aumentar a demanda de água para manter a trabalhabilidade, o que pode

influenciar negativamente a resistência e a durabilidade. No entanto, a baixa variação e a classificação bem controlada ajudam a mitigar esses efeitos.

Tabela 3 - Propriedades físicas da areia			
Abertura (mm)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Retida acumulada (%)
4,75	0,0	0	0
2,36	7	1,75	1,75
1,18	34,2	8,55	10,3
0,60	50,3	12,58	22,875
0,30	128,5	32,125	55
0,15	120,6	30,15	85,15
Fundo	59,2	14,8	99,95
Módulo de finura		1,75	
DMC		1,18	
Variação (%)		0,05	

Fonte: Autores (2025).

Figura 2 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Densidade da areia							
m_a (g)	m_b (g)	m_c (g)	m_d (g)	V (cm³)	V_a (cm³)	ρ_s (g/cm³)	ρ_s (kg/m³)
495,9	500	870,7	1157,8	500	287,82	2,34	2337,17

m_a : massa da amostra seca em estufa;
 m_b : massa da amostra na condição saturada superfície seca;
 m_c : massa do conjunto (areia e molde);
 m_d : massa da areia em banho maria;
V: volume do frasco;
 V_a : volume da água adicionada ao frasco;
 ρ_s : densidade do agregado na condição seca.

Fonte: Autores (2025).

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado neste estudo é de origem basáltica e foi empregado em duas faixas granulométricas distintas. As Tabelas 5 e 6 apresentam os percentuais retidos em cada peneira, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022), para a brita 0 e a brita 1, respectivamente. A curva granulométrica correspondente a cada faixa pode ser visualizada nas Figuras 3 e 4.

Para a determinação da densidade seguiu-se a NBR 16917 (ABNT, 2021). O resultado está apresentado na Tabela 7.

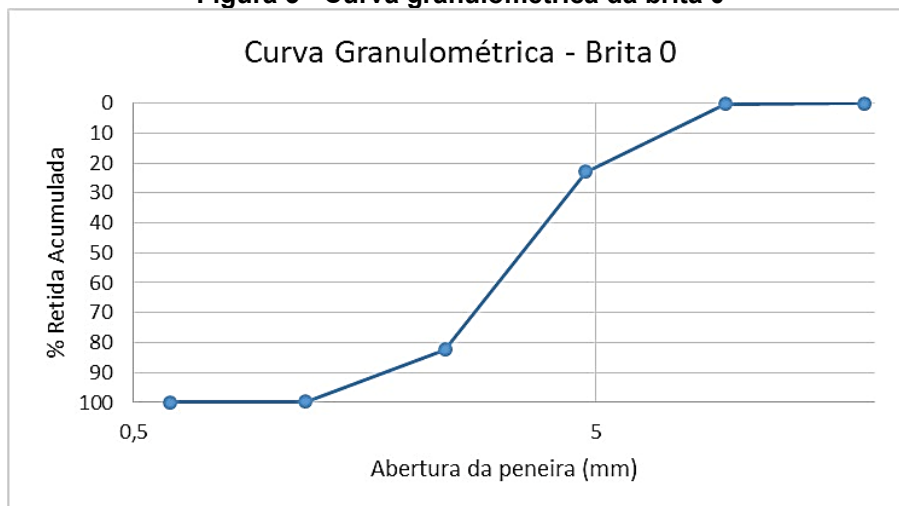
A distribuição está concentrada majoritariamente entre as peneiras de 4,75 mm (22,79%) e 2,36 mm (59,36%), o que caracteriza um agregado de granulometria fina. A retida acumulada atinge 99,79% até 1,18 mm, evidenciando que se trata de uma brita com partículas bem pequenas e compactas. O módulo de finura de 2,05 confirma que é um agregado mais próximo da transição entre agregado miúdo e graúdo. O DMC de 4,75 mm indica que essa brita é útil para preenchimento de vazios e para melhorar a coesão da mistura. A variação de 0% mostra excelente controle na graduação, o que é benéfico para uniformidade do traço.

Tabela 5 – Propriedades físicas da brita 0

Abertura (mm)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Retida acumulada (%)
19	0,0	0,00	0,00
9,5	6	0,21	0,21
4,75	638	22,79	23,00
2,36	1662	59,36	82,36
1,18	488	17,43	99,79
Fundo	6	0,21	100,00
19	0,0	0,00	0,00
Módulo de finura		2,05	
DMC		4,75	
Variação (%)		0,00	

Fonte: Autores (2025).

Figura 3 - Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Autores (2025).

A distribuição está concentrada majoritariamente entre as peneiras de 4,75 mm (22,79%) e 2,36 mm (59,36%), o que caracteriza um agregado de granulometria fina. A retida acumulada atinge 99,79% até 1,18 mm, evidenciando que se trata de uma brita com partículas bem pequenas e compactas. O módulo de finura de 2,05 confirma que é um agregado mais próximo da transição entre agregado miúdo e graúdo. O DMC de 4,75 mm indica que essa brita é útil para preenchimento de vazios e para melhorar a coesão da mistura. A variação de 0% mostra excelente controle na graduação, o que é benéfico para uniformidade do traço. A curva mostra uma graduação contínua, com distribuição suave até aproximadamente 5 mm. Indica um material bem graduado e útil para otimizar a compactação da matriz granular do concreto. Concentração acentuada de massa na peneira 9,5 mm (92,23%), o que indica um material pouco graduado (quase monogranular).

O módulo de finura é 3,91, e o DMC é 9,5 mm, confirmando que é um agregado graúdo típico com granulação mais grossa. A variação de 0,18% sugere leve desvio, mas ainda dentro de um padrão aceitável. Implicações práticas: A combinação das duas britas permite melhor empacotamento e transição granulométrica eficaz. A brita 0 preenche os vazios entre partículas maiores da brita 1, contribuindo para menor porosidade e melhora na densidade da mistura.

Tabela 6 – Propriedades físicas da brita 1

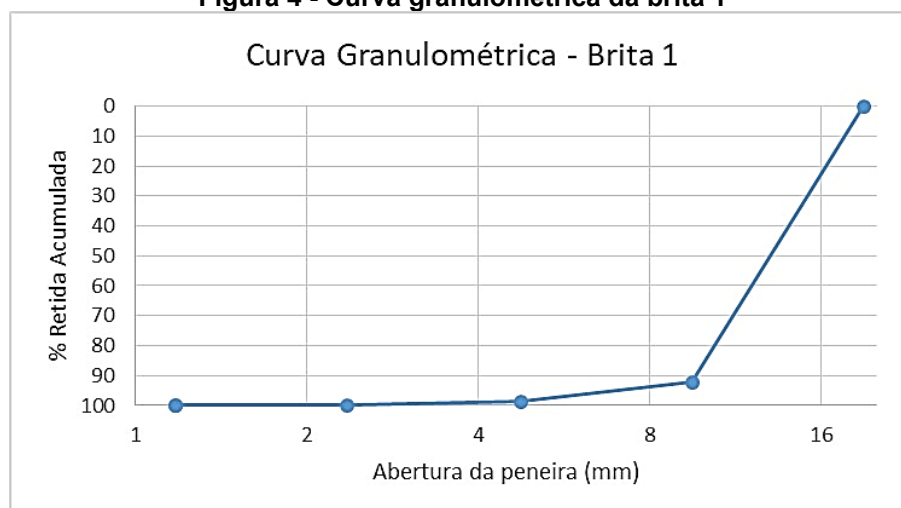
Abertura (mm)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Retida acumulada (%)
19	0,0	0,00	0,00
9,5	5 160	92,23	92,23
4,75	365	6,52	98,75
2,36	60	1,07	99,82
1,18	0	0,00	99,82
Fundo	0	0,00	99,82
19	0,0	0,00	0,00
Módulo de finura		3,91	
DMC		9,5	
Variação (%)		0,18	

Fonte: Autores (2025).

Concentração acentuada de massa na peneira 9,5 mm (92,23%), o que indica um material pouco graduado (quase monogranular). O módulo de finura é 3,91, e o DMC é 9,5 mm, confirmando que é um agregado graúdo típico com granulação mais grossa. A variação de 0,18% sugere leve desvio, mas ainda dentro de um padrão aceitável. Implicações práticas: A combinação das duas britas permite melhor empacotamento e transição granulométrica eficaz. A brita 0 preenche os vazios entre partículas maiores da brita 1, contribuindo para menor porosidade e melhora na densidade da mistura. A Figura 4 apresenta a curva granulométrica da brita 1, evidenciando sua baixa graduação. A curva revela uma distribuição altamente concentrada em partículas com abertura de peneira de 9,5 mm, o que confirma os dados da Tabela 6, onde mais de 92% da massa retida concentrou-se nessa faixa. Isso caracteriza a brita 1 como um agregado praticamente monogranular, condição que, se utilizada isoladamente, pode prejudicar o empacotamento das partículas e aumentar a presença de vazios na mistura. Entretanto, no contexto do presente estudo, a brita 1 foi empregada em conjunto com a brita 0, de granulometria mais fina, justamente para compensar essa deficiência e promover uma melhor distribuição granular no traço.

A curva é mais inclinada e abrupta, indicando predominância em uma única faixa de diâmetro (9,5 mm). Isso mostra que a brita 1, isoladamente, não seria ideal para compor um concreto com boa compactação, mas combinada com brita 0, forma uma mistura granulométrica bem distribuída. A Figura 4 apresenta a curva granulométrica da brita 1, evidenciando sua baixa graduação. A curva revela uma distribuição altamente concentrada em partículas com abertura de peneira de 9,5 mm, o que confirma os dados da Tabela 6, onde mais de 92% da massa retida concentrou-se nessa faixa. Isso caracteriza a brita 1 como um agregado praticamente monogranular, condição que, se utilizada isoladamente, pode prejudicar o empacotamento das partículas e aumentar a presença de vazios na mistura. Entretanto, no contexto do presente estudo, a brita 1 foi empregada em conjunto com a brita 0, de granulometria mais fina, justamente para compensar essa deficiência e promover uma melhor distribuição granular no traço.

Figura 4 - Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Densidade das britas

Material	Ma(g)	Mb(g)	Mc(g)	ps(g/cm³)	ps(kg/m³)
Brita 1	4032,3	4502	2586	2,105	2104,541
Brita 0	1941,3	2450	1219	1,577	1577,011

m_a : massa da amostra seca em estufa;

m_b : massa da amostra na condição saturada superfície seca;

m_c : massa do conjunto (areia e molde);

m_d : massa da areia em banho maria;

V : volume do frasco;

V_a : volume da água adicionada ao frasco;

ρ_s : densidade do agregado na condição seca.

Fonte: Autores (2025).

A Tabela 7 mostra os resultados dos ensaios de determinação da densidade das britas, realizados conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021). A brita 1 apresentou densidade seca de 2,105 g/cm³ (2104,541 kg/m³), valor condizente com materiais de origem basáltica e adequado ao uso em concretos estruturais. A brita 0, por sua vez, apresentou densidade significativamente inferior, de 1,577 g/cm³ (1577,011 kg/m³), refletindo sua maior porosidade e menor massa específica, típica de agregados mais finos. Esses resultados mostram que a combinação das duas britas é benéfica para a formulação de um concreto equilibrado: a brita 1 contribui para a resistência mecânica e a estruturação do esqueleto granular, enquanto a brita 0 melhora o empacotamento, reduz os vazios e contribui para a impermeabilidade da matriz. Essa combinação é coerente com os objetivos do estudo, que busca avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes quanto à redução da permeabilidade e o ganho de resistência, sendo essencial que os agregados utilizados apresentem características físicas conhecidas e controladas, conforme demonstrado pelas análises granulométricas e de densidade.

3.1.4 Aditivo Cristalizante

A Figura 5 apresenta o aditivo cristalizante em pó utilizado neste estudo, o Sika® WT-200 P, um produto amplamente aplicado na engenharia civil para reduzir a permeabilidade do concreto e promover a selagem de microfissuras por meio de processos de cristalização ativa. Esse aditivo é composto por uma mistura de cimentos, amino-álcoois e aglomerantes que, em presença de água, reagem formando compostos insolúveis que

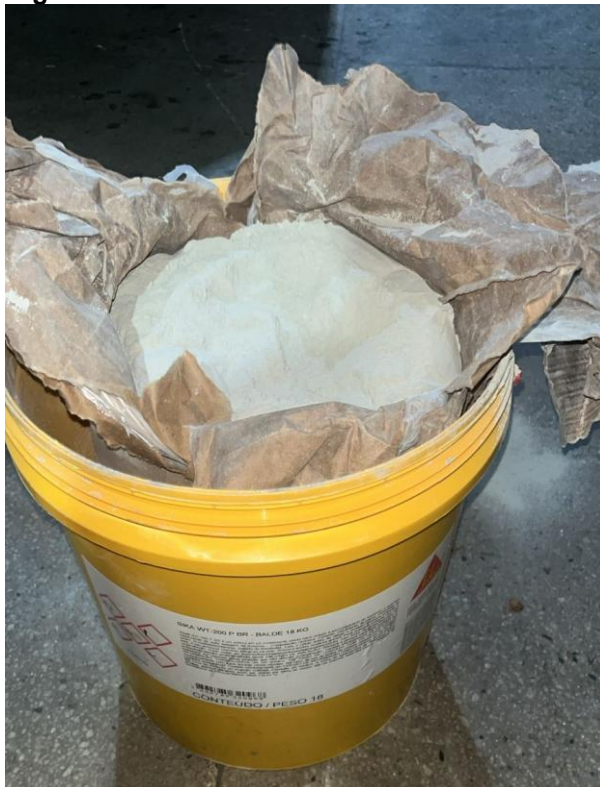
penetram e preenchem a rede capilar da matriz cimentícia. Tal mecanismo resulta na obstrução dos poros e na redução do transporte de água e agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, contribuindo diretamente para o aumento da durabilidade do concreto.

A Tabela 8 resume as principais características físico-químicas do aditivo conforme sua ficha técnica. Trata-se de um pó cinza, inodoro, com pH alcalino em solução ($12 \pm 1,0$), e densidade de 0,75 kg/L, valor típico para aditivos em pó com propriedades expansivas e cristalizantes. A dosagem recomendada pelo fabricante varia de 1,0% a 2,0% em massa de cimento, faixa que foi integralmente testada no presente estudo com o objetivo de avaliar a influência de diferentes teores na resistência mecânica e na absorção capilar dos corpos de prova.

A aplicação desse aditivo está alinhada aos objetivos do trabalho, que visa investigar métodos de mitigação da permeabilidade do concreto sem a necessidade de mudanças expressivas na composição convencional do traço. Ao ser incorporado durante a mistura, o Sika® WT-200 P atua como um agente de autocicatrização ativa, promovendo o bloqueio contínuo de fissuras com até 0,4 mm de abertura, mesmo após a cura inicial do concreto. Esse efeito é especialmente útil em estruturas sujeitas à constante presença de umidade, como reservatórios, túneis, fundações, estações de tratamento de efluentes e obras costeiras, nas quais o controle da infiltração de água é essencial para a durabilidade da estrutura.

Portanto, a caracterização físico-química do aditivo cristalizante apresentada na Tabela 8 valida sua aplicação como ferramenta eficiente na busca por concretos com maior vida útil e menor necessidade de manutenção, objetivos diretamente associados à proposta experimental deste trabalho.

Figura 5 – Aditivo cristalizante Sika® WT-200 P



Fonte: Autores (2025).

Tabela 8 – Características do aditivo cristalizante

Item	Valor
Aparência	Pó cinza
Odor	Inodoro
Estado físico	Sólido (pó)
pH em solução	12 ± 1,0
Densidade (kg/m³)	0,75
Dosagem (% sobre a massa do cimento)	1,0 – 2,0

Fonte: Sika (2025).

3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

O traço de referência foi dimensionado pelo método ABCP para atingir resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias, resultando na relação 1 : 1,3 : 0,33 : 1,1 : 0,45, isto é, 1 kg de cimento, 1,3 kg de areia, 0,33 kg de brita 0, 1,1 kg de brita 1 e 0,45 kg de água. Trata-se de um traço convencional, adequado a aplicações que dispensam altas resistências iniciais, mas garantem desempenho mecânico satisfatório ao longo do tempo.

Os concretos com adição do impermeabilizante foram produzidos nas mesmas condições do traço de referência, assegurando uniformidade nos parâmetros de comparação. Todos os procedimentos seguiram as normas técnicas pertinentes, em ambiente laboratorial controlado. As proporções dos materiais utilizados em cada traço encontram-se resumidas na Tabela 9.

Foram moldados quatro tipos de concreto: o traço de referência (sem aditivo), o Traço A (1% de aditivo em relação à massa de cimento), o Traço B (1,5%) e o Traço C (2%). Essa variação de 0% a 2% permite comparar a influência do aditivo cristalizante na permeabilidade e na resistência mecânica do concreto em diferentes idades de cura e acompanhar a evolução das suas propriedades ao longo do tempo.

Tabela 9 – Proporção dos traços dos concretos

Materiais	Traço de referência (0%)	Traço A (1%)	Traço B (1,5%)	Traço C (2%)
Cimento	1	1	1	1
Agregado miúdo — DMC 1,18 mm	1,30	1,30	1,30	1,30
Agregado graúdo — DMC 4,75 mm	0,33	0,33	0,33	0,33
Agregado graúdo — DMC 9,5 mm	1,10	1,10	1,10	1,10
Água	0,45	0,45	0,45	0,45
Aditivo cristalizante	—	0,010	0,015	0,020

Fonte: Autores (2025).

3.3 CONFECÇÃO DOS CONCRETOS

Seguindo a NBR 12655 (ABNT, 2022), cada componente foi pesado individualmente para assegurar as proporções previstas no traço (Figura 6). A mistura ocorreu em betoneira de eixo vertical, previamente lubrificada com uma leve argamassa de cimento e areia provenientes dos mesmos materiais do estudo. Mantendo a mesma sequência em todas as composições, introduziram-se, sucessivamente, a brita, um terço da água total, o cimento, outro terço da água, o aditivo cristalizante, a areia e, por fim, o terço restante de água, garantindo a uniformidade do processo.

Figura 6 – Pesagem e mistura dos materiais



Fonte: Autores (2025).

3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova deste estudo foram moldados de acordo com as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2016), que estabelece os procedimentos para a moldagem e cura de amostras de concreto. O adensamento foi realizado com o auxílio de uma haste metálica cilíndrica, assegurando a adequada compactação do material. As fôrmas utilizadas possuíam formato cilíndrico, com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Moldagem dos corpos de prova

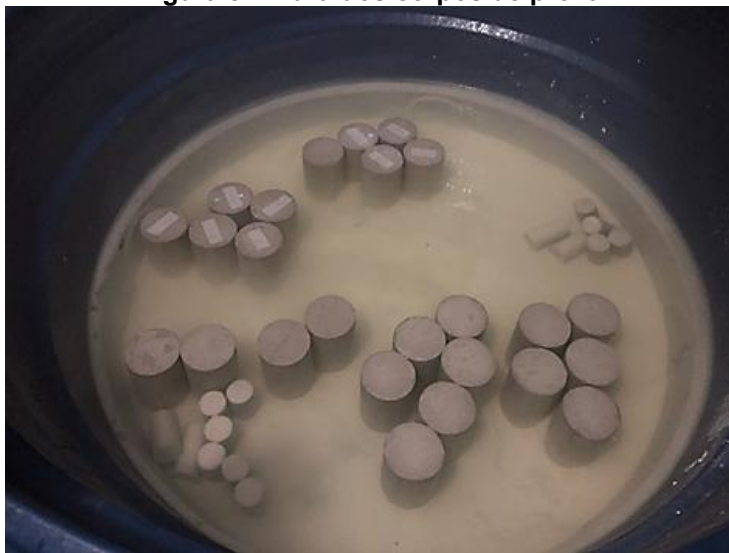


Fonte: Autores (2025).

Moldaram-se nove corpos de prova referentes ao traço de referência, sem adições. Além desses, outros nove corpos de prova foram preparados com a incorporação do impermeabilizante por cristalização, distribuídos em três diferentes dosagens: 1%, 1,5% e 2% em relação à massa de cimento, totalizando três exemplares para cada percentual.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em ambiente com temperatura controlada por 24 horas, protegidos com sacos plásticos para evitar a perda de umidade. Decorrido esse período, foram desmoldados, identificados e submersos em tanque com água saturada de cal, conforme especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2016), como ilustrado na Figura 8. Essa etapa de cura é essencial para garantir que o concreto alcance seu potencial máximo de resistência, preservando a integridade das amostras durante o período de cura. A temperatura da água foi mantida constante, evitando variações que pudessem comprometer os resultados dos ensaios.

Figura 8 – Cura dos corpos de prova



Fonte: Autores (2025).

3.5 ENSAIOS REALIZADOS

Para analisar o efeito do aditivo na permeabilidade dos corpos de prova, avaliou-se tanto a capacidade resistente do concreto quanto sua propensão à entrada de água por absorção capilar. Assim, foram executados três ensaios: resistência à compressão simples, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011) e absorção por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), que quantifica o volume de água que pode penetrar na matriz cimentícia. Esses procedimentos permitem relacionar a presença do aditivo cristalizante ao comportamento mecânico e à impermeabilidade dos concretos investigados.

3.5.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é fundamental para a estabilidade e segurança das estruturas. Ao realizar o ensaio de resistência à compressão, verifica-se se o concreto está de acordo com as especificações do projeto, identificando quaisquer diferenças na qualidade do material utilizado. Durante o ensaio, foi possível acompanhar a curva de desempenho do concreto sob esforço mecânico, permitindo registrar a resistência característica do material à compressão (f_c), proporcionando uma compreensão de seu comportamento estrutural ao longo do tempo.

Para avaliar a capacidade do concreto em suportar esforços mecânicos, foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples, Figura 9, aos 7 e 28 dias, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Os resultados desse ensaio estão apresentados na Tabela 10.

Figura 9 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autores (2025).

Para garantir a planicidade, nas superfícies superior e inferior dos corpos de prova utilizou-se neoprene confinado em anel metálico para aplicação da carga de compressão nos testes de ruptura.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios à compressão

Porcentagem de Aditivo	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de ruptura (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0,0%	7	1	21,0	22,1	0,817
		2	22,1		
		3	20,5		
	28	1	24,7	26,4	0,981
		2	26,3		
		3	26,4		
1,0%	7	1	25,4	28,8	3,46
		2	28,8		
		3	21,9		
	28	1	28,1	31,4	3,03
		2	25,4		
		3	31,4		
1,5%	7	1	25,7	27,5	1,23
		2	25,2		
		3	27,5		
	28	1	30,1	31,2	0,95
		2	31,2		
		3	29,3		
2,0%	7	1	26,4	26,4	0,208
		2	26,0		
		3	26,1		
	28	1	28,5	29,8	2,84
		2	24,4		
		3	29,8		

Fonte: Autores (2025).

3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à compressão diametral do concreto é um parâmetro importante para avaliar seu comportamento à tração, tendo em vista que o concreto apresenta baixa resistência quando submetido a esforços de tração. Por meio desse ensaio, é possível verificar a qualidade do concreto utilizado e identificar possíveis variações em sua composição ou desempenho mecânico.

Durante o ensaio, foi possível acompanhar a curva de desempenho do concreto sob esforço de compressão diametral, permitindo o registro da resistência à tração indireta e proporcionando uma melhor compreensão do comportamento estrutural do material ao longo do tempo.

O ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Para garantir a uniformidade na aplicação da carga, os corpos de prova cilíndricos foram posicionados horizontalmente entre os pratos da prensa, de modo que a força fosse aplicada ao longo do diâmetro, provocando uma fissuração característica perpendicular ao eixo de carregamento, como ilustrado na Figura 10. Os resultados desse ensaio estão apresentados na Tabela 11.

Figura 10 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autores (2025).

Tabela 11 – Resultados dos ensaios à tração

(continua)

Porcentagem de Aditivo	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de ruptura (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0,0%	7	1	2,6	2,9	0,25
		2	2,9		
		3	2,4		
	28	1	3,0	3,2	0,115
		2	3,2		
		3	3,0		
1,0%	7	1	3,1	3,5	0,208
		2	3,5		

Tabela 11 – Resultados dos ensaios à tração

(conclusão)

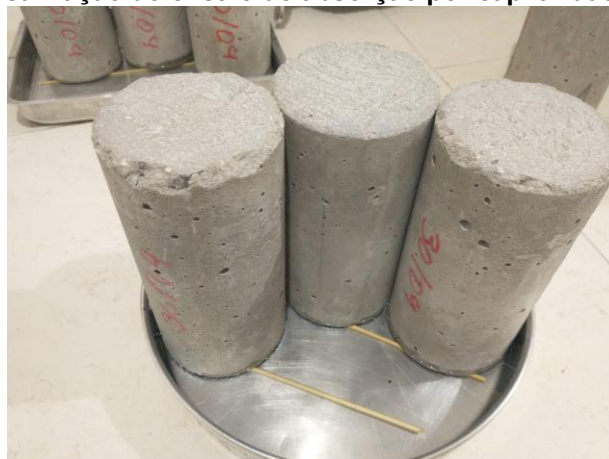
Porcentagem de Aditivo	Idade (dias)	Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima de ruptura (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1,0%	7	3	3,2	3,5	0,208
	28	1	3,6	4,0	0,208
		2	3,7		
		3	4,0		
1,5%	7	1	2,4	3,0	0,305
		2	2,9		
		3	3,0		
	28	1	3,5	3,8	0,153
		2	3,7		
		3	3,8		
2,0%	7	1	3,2	3,2	0,264
		2	2,8		
		3	2,7		
	28	1	3,5	3,6	0,264
		2	3,6		
		3	3,1		

Fonte: Autores (2025).

3.5.3 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 9779 (ABNT, 2012). A metodologia consiste em posicionar os corpos de prova em um recipiente com nível de água mantido constante a 5 ± 1 mm acima da face inferior das amostras, como apresentado na Figura 11, garantindo a absorção por capilaridade.

Figura 11 - Corpos de prova posicionados para realização do ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autores (2025).

Antes do início do ensaio, as amostras foram previamente secas e pesadas para obtenção da massa inicial. A Figura 12 mostra os corpos de prova sendo colocados em estufa a 105°C. Durante o período de ensaio, foram realizadas pesagens nas seguintes idades de saturação: 3, 6, 24, 48 e 72 horas, a fim de acompanhar o ganho de massa por absorção de água. Essas pesagens foram utilizadas para calcular a absorção de água por capilaridade em g/cm³, como mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Absorção de água por capilaridade nos corpos de prova

Sem adição de aditivo (Traço de referência - 0%)						
Tempo de ensaio (horas)	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III
0 (seco)	3568	3475	3560	---	---	---
3	3593	3502	3585	0,318	0,344	0,318
6	3596	3505	3589	0,357	0,382	0,369
24	3613	3521	3603	0,573	0,586	0,547
48	3623	3529	3609	0,700	0,688	0,624
72	3626	3533	3612	0,738	0,738	0,662
Tempo de ensaio (horas)	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
	Corpo de prova IV	Corpo de prova V	Corpo de prova VI	Corpo de prova IV	Corpo de prova V	Corpo de prova VI
0 (seco)	3546	3554	3534	---	---	---
3	3574	3575	3553	0,357	0,267	0,242
6	3581	3578	3559	0,446	0,306	0,318
24	3602	3590	3573	0,713	0,458	0,497
48	3612	3596	3577	0,840	0,535	0,547
72	3618	3598	3581	0,917	0,560	0,598
Adição de 1% de aditivo (Traço B)						
Tempo de ensaio (horas)	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III
0 (seco)	3537	3504	3486	---	---	---
3	3545	3510	3494	0,102	0,076	0,102
6	3546	3511	3495	0,115	0,089	0,115
24	3547	3513	3497	0,127	0,115	0,140
48	3550	3515	3499	0,166	0,140	0,140
72	3550	3515	3500	0,166	0,140	0,178
Adição de 1,5% de aditivo						
Tempo de ensaio (horas)	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III
0 (seco)	3429	3534	3497	---	---	---
3	3437	3544	3507	0,102	0,127	0,127
6	3438	3545	3508	0,115	0,140	0,140
24	3442	3548	3510	0,166	0,178	0,166
48	3443	3550	3512	0,178	0,204	0,191
72	3445	3550	3513	0,204	0,204	0,204
Adição de 2,0% de aditivo						
Tempo de ensaio (horas)	Massa do corpo de prova (g)			Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		
	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III	Corpo de prova I	Corpo de prova II	Corpo de prova III
0 (seco)	3480	3489	3483	---	---	---
3	3488	3496	3492	0,102	0,089	0,115
6	3489	3495	3493	0,115	0,076	0,127
24	3491	3498	3496	0,140	0,115	0,166
48	3492	3499	3497	0,153	0,127	0,178
72	3492	3499	3497	0,153	0,127	0,178

Fonte: Autores (2025).

Figura 12 - Corpos de prova em processo de secagem em estufa



Fonte: Autores (2025).

Figura 13 – Altura da água absorvida nos corpos de prova sem e com 1% de aditivo



a) 0%



b) 1%

Fonte: Autores (2025).

Figura 14 – Altura da água absorvida nos corpos de prova com 1,5% e 2% de aditivo



a) 1,5%



b) 2%

Fonte: Autores (2025).

Para verificar a eficácia do aditivo na redução da absorção capilar, mediu-se a altura alcançada pela água nos corpos de prova. Após o período de imersão parcial, marcou-se a linha de ascensão e, com o auxílio de uma trena, registrou-se essa altura para posterior comparação entre os traços. As Figuras 13 e 14 mostram a leitura realizada nos corpos de prova.

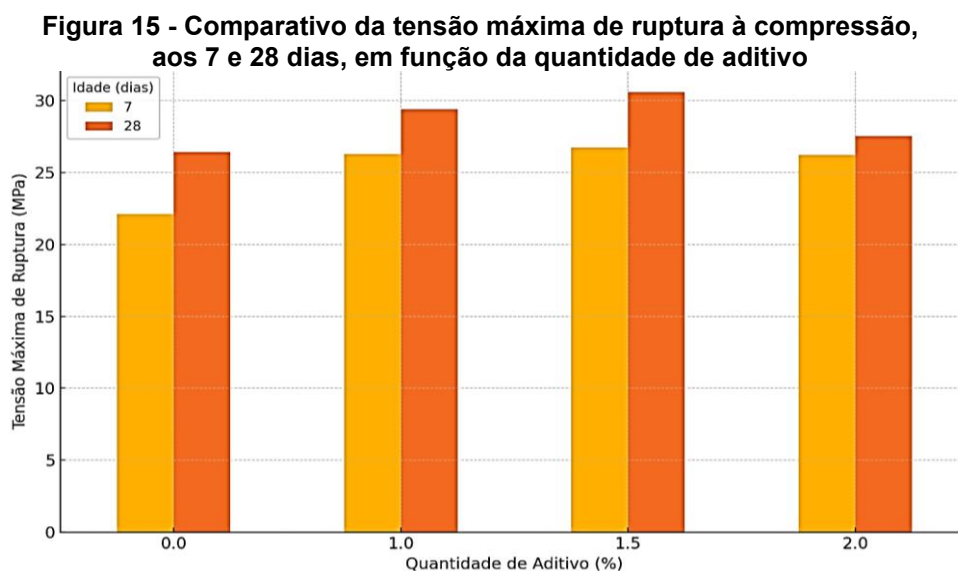
Nos corpos de prova sem aditivo, a água ascendeu, em média, 7,0 cm. Com 1,0% de aditivo cristalizante, essa altura diminuiu para 3,0 cm; com 1,5% de aditivo, alcançou 4,0 cm; e, com 2,0%, restringiu-se a 2,0 cm. Esses valores evidenciam a influência do teor de aditivo na redução da absorção capilar.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão analisados os resultados observados a partir dos ensaios realizados, descritos na seção 3.

4.1 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ADITIVO

O gráfico da Figura 15 apresenta a evolução da resistência à compressão simples do concreto em função da adição de diferentes teores de aditivo cristalizante (0%, 1%, 1,5% e 2%), com resultados avaliados aos 7 e 28 dias de cura. Os valores expressam a tensão máxima de ruptura obtida nos corpos de prova ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).



Fonte: Autores (2025).

A avaliação conjunta dos resultados mostra que a introdução do aditivo cristalizante eleva de forma consistente a resistência à compressão em comparação ao traço-referência, tanto na idade de 7 como na de 28 dias.

O concreto sem aditivo apresentou 22,1 MPa aos 7 dias e 26,4 MPa aos 28 dias, servindo de base para os cálculos de ganho. Com 1% de aditivo (Traço A) a resistência subiu para 28,8 MPa na primeira idade, acréscimo de aproximadamente 30%, e chegou a 31,4 MPa aos 28 dias, aumento de cerca de 19%.

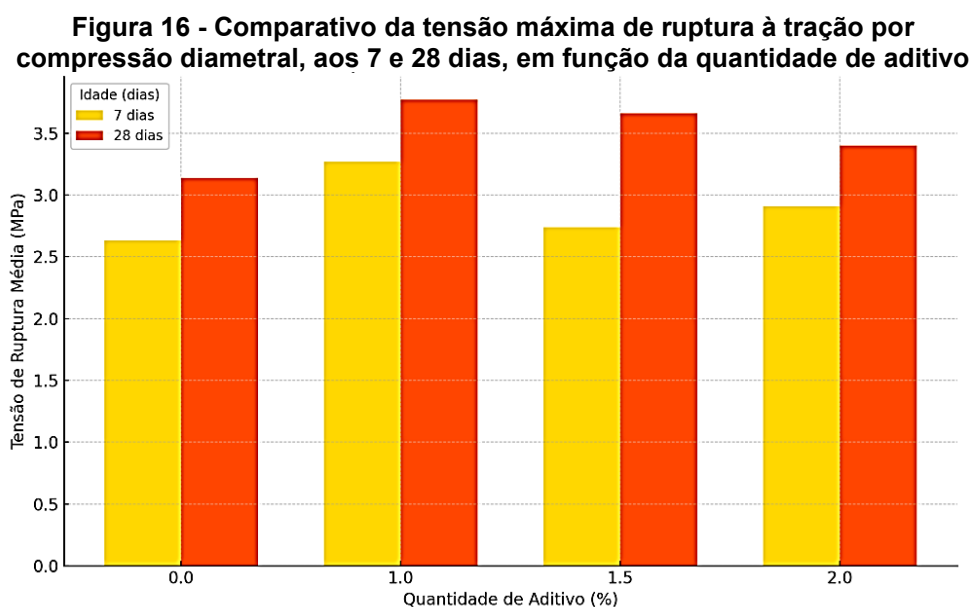
O teor de 1,5% (Traço B) manteve desempenho elevado, registrando 27,5 MPa aos 7 dias (+24%) e 31,2 MPa aos 28 dias (+18%), indicando que essa dosagem favorece o preenchimento da matriz capilar por cristais sem prejudicar o ganho mecânico subsequente.

Já o traço com 2% de aditivo (Traço C) atingiu 26,4 MPa aos 7 dias (+19%) e 29,8 MPa aos 28 dias (+13 %), confirmando a manutenção de um ganho inicial, mas revelando que, em idades posteriores, o benefício incremental se torna mais modesto.

Em síntese, o intervalo entre 1 % e 1,5 % oferece os maiores acréscimos relativos e absolutos de resistência — ganhos da ordem de 18% a 30% — ao passo que dosagens superiores tendem a apresentar retorno decrescente, sugerindo um teor ótimo próximo desse intervalo para conciliar redução de permeabilidade e incremento da resistência mecânica no traço estudado.

4.2 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ADITIVO

O gráfico da Figura 16 apresenta a variação da tensão de ruptura média por tração, obtida por meio do ensaio de compressão diametral, em concretos com diferentes teores de aditivo cristalizante (0%, 1%, 1,5% e 2%), avaliados aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados são expressos com suas respectivas barras de erro, representando o desvio padrão das amostras.



Fonte: Autores (2025).

A comparação dos resultados de tração por compressão diametral confirma que a incorporação do aditivo cristalizante melhora o desempenho do concreto, mas o ganho depende do teor utilizado. Aos 7 dias, o traço-referência alcançou 2,9 MPa; com 1% de aditivo a resistência subiu para 3,5 MPa, incremento de aproximadamente 21%. O teor de 2% também gerou melhora, atingindo 3,2 MPa (10% acima do valor-base), enquanto 1,5% mostrou elevação, chegando a 3,0 MPa ($\approx 3\%$). Aos 28 dias, o concreto sem aditivo registrou 3,2 MPa; a dosagem de 1% elevou a resistência a 4,0 MPa, um ganho de 25%, seguida pelo teor de 1,5 % com 3,8 MPa ($\approx 19\%$) e pelo de 2 % com 3,6 MPa ($\approx 13\%$).

Além dos aumentos médios, os desvios-padrão indicam boa reprodutibilidade: variações ficaram entre 0,115 MPa e 0,305 MPa, valores compatíveis com ensaios de laboratório. O comportamento conjunto revela que a faixa de 1% a 1,5% de aditivo proporciona os maiores ganhos relativos e absolutos de resistência à tração, sendo o teor

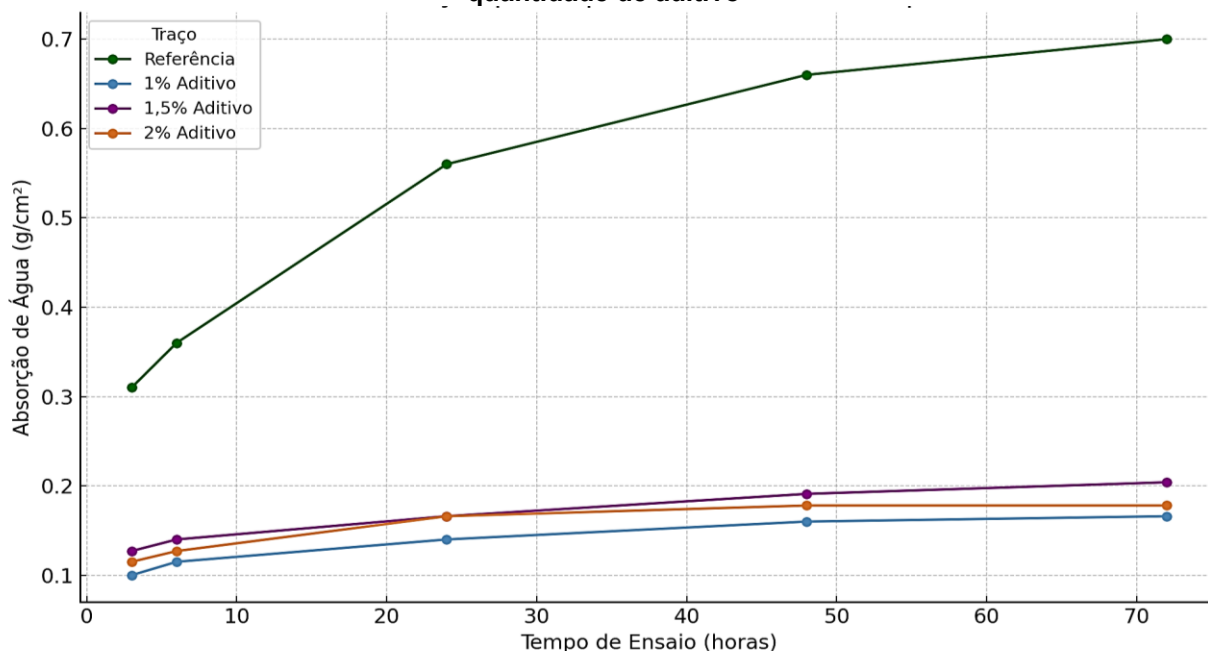
de 1% o mais eficiente, sobretudo porque combina o maior incremento aos 28 dias com o segundo melhor resultado aos 7 dias. Dosagens superiores a 1,5% continuam benéficas, porém o retorno adicional diminui, reforçando a indicação de que o ponto ótimo, para o traço estudado, situa-se próximo de 1 %.

4.3 ANÁLISE DA ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ADITIVO

A Figura 17 apresenta a evolução da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova ao longo do tempo para os diferentes traços analisados: traço de referência e traços com adição de 1%, 1,5% e 2% de aditivo cristalizante. Os dados correspondem à média das absorções obtidas em três corpos de prova para cada traço e tempo de ensaio.

Observa-se que o traço de referência apresenta os maiores valores de absorção em todas as idades analisadas, evidenciando maior permeabilidade capilar. Em contraste, os traços com aditivo cristalizante demonstram uma significativa redução na absorção de água, indicando a eficácia do aditivo na obstrução dos poros capilares do concreto. Entre os traços com aditivo, o de 1% apresentou comportamento semelhante ao de 2%, ambos com os menores índices de absorção ao final de 72 horas. O traço com 1,5% de aditivo, embora mais eficiente que o traço de referência, apresentou desempenho inferior aos demais com adição, o que pode indicar que doses maiores do aditivo não necessariamente resultam em melhorias proporcionais.

Figura 17 – Comparativo da absorção por capilaridade por tempo de ensaio em função da quantidade de aditivo



Fonte: Autores (2025).

As respectivas reduções na permeabilidade capilar, expressas em porcentagem de melhoria em relação ao traço de referência, com adição de 1,0%, 1,5% e 2,0% de aditivo foram: 72,02%; 70,95% e 78,26%, respectivamente.

Além disso, em relação à altura de água absorvida, notou-se que nos corpos de prova do traço sem adição do aditivo, a absorção foi consideravelmente maior que nos corpos com adição do mesmo.

Esses resultados reforçam o potencial do aditivo cristalizante como um agente redutor de permeabilidade, contribuindo diretamente para o aumento da durabilidade do

concreto frente à ação de agentes agressivos. Com isso, fica evidente que a incorporação do aditivo cristalizante reduziu a permeabilidade do concreto. O traço com 2% de aditivo apresentou o melhor desempenho, seguido de perto pelo traço com 1%, indicando que ambos são altamente eficazes na obstrução dos poros capilares. O traço com adição de 1,5%, apesar de ter apresentado melhoria significativa em relação ao traço de referência, não foi tão eficaz quanto as outras porcentagens.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios comprovaram que a incorporação do aditivo cristalizante melhora simultaneamente a estanqueidade e o desempenho estrutural do concreto. As dosagens de 1% e 1,5% reduziram a absorção capilar a menos de um terço do valor de referência e limitaram a ascensão de água a cerca de metade da altura observada no traço sem aditivo, enquanto elevaram a resistência à compressão para a faixa de 31 MPa aos 28 dias—aproximadamente 19% acima do concreto-padrão. A resistência à tração por compressão diametral também apresentou acréscimos da ordem de 20%, indicando que o preenchimento da rede porosa por cristais insolúveis densifica a microestrutura sem prejudicar a coesão da matriz.

O acréscimo do teor para 2% intensificou ainda mais o selamento dos poros, resultando nas menores alturas de ascensão e na maior queda absoluta de absorção; contudo, o ganho de resistência adicional foi modesto, sugerindo retorno decrescente e revelando que níveis mais altos de aditivo podem interferir na cinética de hidratação ou criar zonas de transição menos eficientes. Assim, o intervalo entre 1% e 1,5% mostrou-se o mais eficiente para conciliar impermeabilidade e desempenho mecânico, sem exigir alterações significativas na dosagem convencional.

Do ponto de vista prático, a adoção dessas dosagens é técnica e economicamente atrativa para estruturas que exigem elevada estanqueidade—reservatórios, fundações, túneis ou obras costeiras—porque reduz a necessidade de reparos e prolonga a vida útil, contribuindo para menores custos de manutenção e maiores níveis de segurança.

Recomenda-se, para pesquisas futuras, avaliar o comportamento desse material sob ciclos acelerados de umedecimento—secagem, exposição prolongada a cloretos e carbonatação, bem como investigar a sinergia do aditivo com outros tipos de cimentos. Esses estudos ampliarão o conhecimento sobre a durabilidade de longo prazo e ajudarão a posicionar o aditivo cristalizante como solução ainda mais sustentável para a construção civil.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 17054:2022 — Concreto — Determinação da resistência à tração por compressão diametral — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. NBR 16916:2021 — Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. NBR 17054:2022 — Concreto — Determinação da resistência à tração por compressão diametral — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. NBR 16917:2021 — Concreto — Determinação da resistência à tração na compressão axial — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. NBR 12655:2022 — Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. NBR 5738:2007 — Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016

ABNT. NBR 5739:2018 — Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. NBR 9779:2012 — Agregado miúdo para concreto — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012ACI (American Concrete Institute). Report on Chemical Admixtures for Concrete, ACI 212.3R-10, 2010.

AFANDI, R.; JONES, P.; ANDERSON, A. Advances in self-healing concrete for structural applications. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, v. 4, n. 2, p. 111-123, 2023.

AGUIAR, M. R. **Durabilidade em Estruturas de Concreto: Desafios e Soluções**. São Paulo: Editora Técnica, 2006.

ALVES, L. P.; SILVA, F. M.; PEREIRA, A. C. Efeito dos aditivos cristalizantes na resistência à compressão do concreto autocicatrizante. *Revista Brasileira de Materiais e Construção*, v. 28, n. 1, p. 55-67, 2022.

ARAÚJO, M.; RODRIGUES, R.; FREITAS, L. **Durabilidade e Resistência do Concreto em Ambientes Agressivos**. São Paulo: Editora da Engenharia, 2000.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, L. Durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas** (Tradução: O. Cascudo e H. Carasek.), p. 255–326, 2014.

BASSO, M. Estudo de aditivos sustentáveis para concreto autocicatrizante. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 27, n. 4, p. 313-329, 2021.

BIANCHIN, Felipe Hirata. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. 2018. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BRITEZ, C. Concreto Autocicatrizante e Aplicações em Construções de Larga Escala. *Revista de Engenharia Civil*, v. 8, p. 130-145, 2013.

COST Action CA15202 (SARCOS). SARCOS: Self-healing Aspects in the Rehabilitation of the Concrete Structures. European Cooperation in Science and Technology (COST), 2016.

COSTA, R. F. da. **Concreto Autocicatrizante com Agregado Regional**. Manaus: Centro Universitário do Norte, 2022.

DE BELIE, N.; VAN TITTELBOOM, K.; JONKERS, H. Bacteria-based self-healing concrete: From laboratory to field application. *Construction and Building Materials*, v. 45, p. 471-484, 2018.

- DRY, C. Development of self-healing concrete using encapsulated polymers. *Journal of Smart Materials and Structures*, v. 3, n. 2, p. 118-125, 1994.
- DUARTE, M. **Patologia das Construções**. São Paulo: Pini, 1998.
- DYER, T. **Durabilidade do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- EDVARDESEN, C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, v. 96, n. 4, p. 448-454, 1996.
- FERREIRA, G. H. **Fissuras em Edificações de Concreto Armado**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2000.
- GASPAR, J. M.; GUIMARÃES, G. V. O Avanço do Concreto Autocicatrizante no Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia de Materiais e Estruturas*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 30-45, 2019.
- GHOSH, S. Intelligent structures and materials: a framework for self-healing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, n. 7, p. 719-739, 2009.
- GONÇALVES, A. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Diagnóstico e Soluções**. São Paulo: Editora da Construção, 2015.
- HEIDE, T. Effects of suspended particles on crack closure in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 235-242, 2005.
- HELENE, P. R. L.; ALMEIDA, C. F.; DUARTE, M. L. Materiais pozolânicos como agentes de autocura em concreto de alta durabilidade. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 22, n. 5, p. 343-356, 2022.
- HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Thermodynamics of autogenous self-healing in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 43, p. 141-152, 2014.
- JONKERS, H. M. Bacteria-mediated self-healing concrete. *Journal of Microbial Biotechnology*, v. 3, n. 5, p. 54-59, 2010.
- KUBAL, M. T. **Waterproofing systems and concrete: sealing of concrete structures**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LEÃO, C.; ROHDEN, L. Aditivo Cristalizante em Concreto. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 1, 2021.
- LIMA, M. S *et al.* Concreto Autocicatrizante e Corrosão em Armaduras. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, 2022.
- LIMA, M. S. Comparativo dos métodos de autocura em concreto autógeno e autônomo. *Revista de Engenharia Civil*, v. 20, n. 2, p. 78-89, 2021.
- MOREIRA, M. M. **Efeito do Aditivo Redutor de Permeabilidade em Concretos: Contribuições aos Processos de Autocicatrização**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 2016.

- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- OLIVEIRA, Ana Luiza Alves de. **A Influência do Aditivo Cristalizante nas Propriedades do Concreto Fresco e Endurecido**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.
- OLIVEIRA, C. **Manual de Patologia e Recuperação de Estruturas**. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- PACHECO, J. C. **Patologia das Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- POLESELLO, J. S.; MAUS, S. M. Influência do aditivo cristalizante no concreto autocicatrizante. *Revista Engenharia e Construção*, v. 20, n. 3, p. 55-67, 2020.
- REINHARDT, H.-W.; JOOSS, M. Effects of temperature and crack width on autogenous healing in high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 295-306, 2003.
- REINHARDT, H.-W.; JOSEPH, C.; SCHLANGEN, E. Self-healing in cementitious materials – A review. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 344-356, 2013.
- RILEM. RILEM 221-SHC: **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Londres: Springer, 2013.
- SABATINI, J.; BARROS, L. Fissuras em Estruturas de Concreto. *Revista de Engenharia Civil*, v. 12, n. 2, p. 98-109, 1990.
- SANTOS, V.; SILVA, J.; NASCIMENTO, F. **Durabilidade e Fissuração no Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2017.
- SCHLANGEN, E.; JOSEPH, C. Self-healing processes in concrete. In: *Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications*. London: Springer, 2009. p. 141-182.
- SCHMIDT, B. C.; et al. Utilização do Concreto Autocicatrizante e sua Influência na Corrosão das Armaduras. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, 2022.
- SILVA, A. J. **Patologias no Concreto Armado e Técnicas de Recuperação**. São Paulo: Editora Técnica, 2007.
- SNOECK, D.; DE BELIE, N. Autogenous healing in cementitious materials with superabsorbent polymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 5, p. 511-518, 2012.
- SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Manual de Recuperação, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 2009.
- TAKAGI, E. Aplicação de aditivos cristalizantes em concreto autocicatrizante no Museu de Arte do Rio. In: *Semana Nacional de Ciência e Tecnologia*, Brasília, 2013. Anais [...]. Brasília: SNCT, 2013.

- TAKAGI, E. Concretos Autocicatrizantes com Aditivos Cristalizantes. In: *Semana Nacional de Ciência e Tecnologia*, Brasília, 2013.
- TANG, J.; WU, M.; GEIKER, M. Microencapsulation-based self-healing in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 70, p. 492-500, 2015.
- THOMAS, M. **Sustainable Concrete Construction**. New York: Springer, 2015.
- THOMAZ, E. **Fissuras em Concreto e Alvenaria**. São Paulo: Editora da Engenharia, 1989.
- TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials - A Review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013.
- VEIGA, A. L. **Patologias em Estruturas de Concreto: Diagnóstico e Recuperação**. São Paulo: Pini, 1998.
- VERÇOZA, F. **Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto**. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 1991.
- WHITE, S. R.; SOTTOS, N. R.; GEUBELLE, P. H.; MOORE, J. S.; KESSLER, M. R.; SRIRAM, S. R.; BROWN, E. N.; VISWANATHAN, S. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, v. 409, n. 6822, p. 794-797, 2001.
- WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, v. 28, p. 571-583, 2012.
- ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- ZINGLER, A. Avaliação dos ciclos de molhagem e secagem no processo de autocicatrização com aditivos cristalizantes. *Revista Engenharia e Construção*, v. 30, n. 1, p. 45-56, 2020.
- ZWAAG, S. Self-healing materials: an introduction. In: *Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications*. London: Springer, 2007. p. 1-18.