

## **Análise da autocicatrização do concreto submetido ao ataque de íons sulfatos**

Cidirlei de Paula Silva<sup>1</sup>; 0009-0009-3662-7677

Pedro Henrique Tavares Geraldino<sup>1</sup>; 0009-0002-6261-8981

Dionatan Amaral Rodrigues<sup>1</sup>; 0000-0002-5584-9277

Cirlene Fourquet Bandeira<sup>1</sup>; 0000-0001-7034-2477

Roberto de Oliveira Magnago<sup>1,2</sup>; 0000-0003-0910-1572

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.

2 – UERJ-FAT, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ.

[cpengenharia.contato@gmail.com](mailto:cpengenharia.contato@gmail.com)

**Resumo:** A durabilidade das estruturas de concreto submetidas à ação de agentes químicos continua sendo um dos maiores desafios da engenharia civil. Entre esses agentes, os íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) destacam-se por induzirem reações expansivas na matriz cimentícia, resultando em fissuração e perda de desempenho estrutural. Neste contexto, a utilização de aditivos cristalizantes apresenta-se como alternativa promissora, uma vez que promove a autocicatrização de fissuras, reduz a permeabilidade e dificulta a penetração de compostos agressivos. A presente pesquisa teve como objetivo analisar a eficiência da autocicatrização em concretos produzidos com cimento Portland CP III aditivados com dois tipos distintos de produtos cristalizantes. Os corpos de prova foram moldados com traço 1:2:3 e relação a/c de 0,50, curados por 28 dias e posteriormente expostos a solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a 5% durante 90 dias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, compressão diametral e monitoramento da percolação de água através das fissuras induzidas. Os resultados mostraram que os concretos com aditivos apresentaram desempenho superior ao traço de referência, evidenciando fechamento parcial das fissuras a partir de 49 dias. A Amostra 2 destacou-se por apresentar incremento médio de 7% na resistência à compressão quando comparado ao concreto sem aditivo, confirmando sua maior eficiência frente ao ataque de sulfatos. Conclui-se que a incorporação de aditivos cristalizantes é uma alternativa viável para aumentar a durabilidade das estruturas, contribuindo para reduzir custos de manutenção e ampliar a vida útil de obras expostas a condições químicas agressivas.

**Palavras-chave:** concreto; autocicatrização; durabilidade; sulfatos; aditivos cristalizantes.

## INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto é um tema central na engenharia civil, especialmente devido ao aumento de estruturas expostas a agentes químicos que comprometem seu desempenho. Entre os mecanismos de degradação, o ataque por íons sulfato merece destaque pelo elevado potencial de deterioração da matriz cimentícia. Esse processo ocorre quando os sulfatos reagem com compostos hidratados do cimento Portland, formando produtos expansivos, como etringita e taumasita. A consequência é o surgimento de tensões internas, fissuração e redução progressiva da resistência mecânica, fatores que comprometem a integridade estrutural e reduzem a vida útil das edificações (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2013).

Além do impacto na durabilidade, o ataque de sulfatos gera custos elevados de manutenção e recuperação, tornando-se um desafio técnico e econômico para gestores e engenheiros. As medidas tradicionais de mitigação incluem o uso de cimentos resistentes a sulfatos, adições minerais e o controle da relação água/cimento. Embora eficazes, essas soluções nem sempre são suficientes em condições severas de exposição.

Diante disso, pesquisas recentes têm investigado técnicas complementares que aumentem a estanqueidade e a capacidade de autodefesa do concreto. Entre as estratégias, destacam-se os aditivos cristalizantes. Esses produtos reagem com a umidade e subprodutos da hidratação do cimento, formando cristais insolúveis que bloqueiam a permeabilidade e auxiliam no selamento de fissuras. Assim, possibilitam a chamada autocicatrização, ou seja, a recuperação parcial e autônoma de fissuras sem intervenção externa (Rocha et al., 2023).

A relevância deste estudo reside tanto na contribuição científica para a compreensão dos mecanismos de autocicatrização quanto na aplicação prática, uma vez que estruturas mais duráveis implicam redução de custos com manutenção, maior segurança e ganhos em sustentabilidade. O objetivo principal é avaliar a eficiência da autocicatrização do concreto com aditivos cristalizantes submetido ao ataque de sulfatos, fornecendo subsídios técnicos para projetos mais resistentes e de maior longevidade.

## MÉTODOS

O concreto foi produzido com uma dosagem de 350 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland do tipo CP III, atendendo aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2020. Os agregados miúdos utilizados na mistura foram peneirados e dosados conforme especificado pela ABNT NBR 17054:2022. Os agregados graúdos foram previamente separados e classificados por peneiramento com malha de 19 mm, em conformidade com os critérios da mesma norma. A água utilizada na produção dos corpos de prova e nos ensaios de permeabilidade seguiu as exigências da ABNT NBR 15900-1:2009, que estabelece os critérios mínimos de qualidade para a água de amassamento de concretos.

Foram incorporados à mistura dois aditivos distintos (x e y) ambos fornecidos por fabricantes distintos que sob cláusula de confidencialidade, não tiveram suas identidades comerciais divulgadas, e incorporados na proporção de 1,5% em massa em relação ao cimento. Esses produtos contêm compostos químicos capazes de reagir com a umidade e com subprodutos da hidratação do cimento, formando cristais insolúveis que se expandem nos poros e microfissuras, favorecendo a redução da permeabilidade e a autocicatrização.

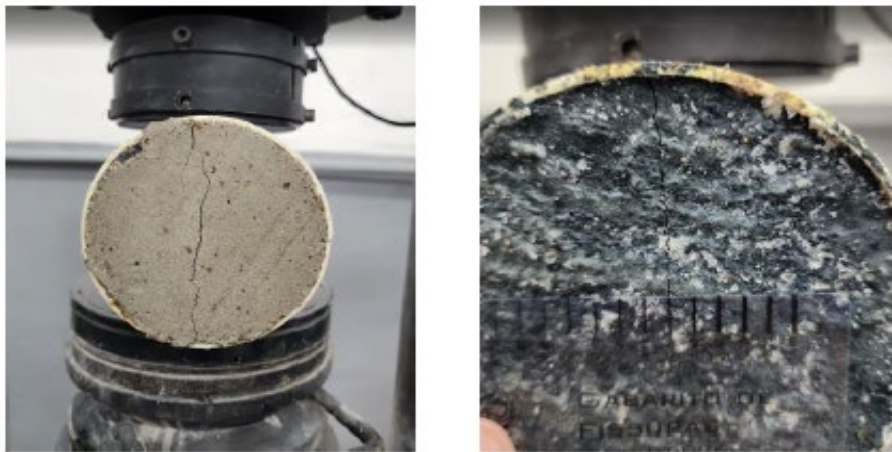
O traço adotado foi 1:2:3 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento de 0,50, proporção que permite equilíbrio entre trabalhabilidade e resistência mecânica. Os aditivos foram incorporados conforme a dosagem recomendada pelos fabricantes.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100 × 200 mm, de acordo com a NBR 5738:2016, divididos em três grupos: Amostra referência (sem aditivo), Amostra 1 (aditivo x) e Amostra 2 (aditivo y), que após a moldagem foram submetidos à cura úmida contendo água saturada de cal por 28 dias.

Após o processo de cura, os corpos de prova foram separados para realização das análises em condições distintas, com e sem sulfato, sendo os destinados ao ataque químico, parcialmente imersos em água diluída com solução contendo 5% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sulfato de sódio). A solução foi renovada quinzenalmente, de forma a manter a concentração iônica estável e evitar saturação por subprodutos. O período total de exposição foi de 90 dias, procedimento inspirado em ensaios acelerados de durabilidade amplamente descritos na literatura (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014).

Para simular o processo de deterioração e avaliar a capacidade de autocicatrização, foram induzidas fissuras por meio de compressão diametral, conforme representado na figura 1.

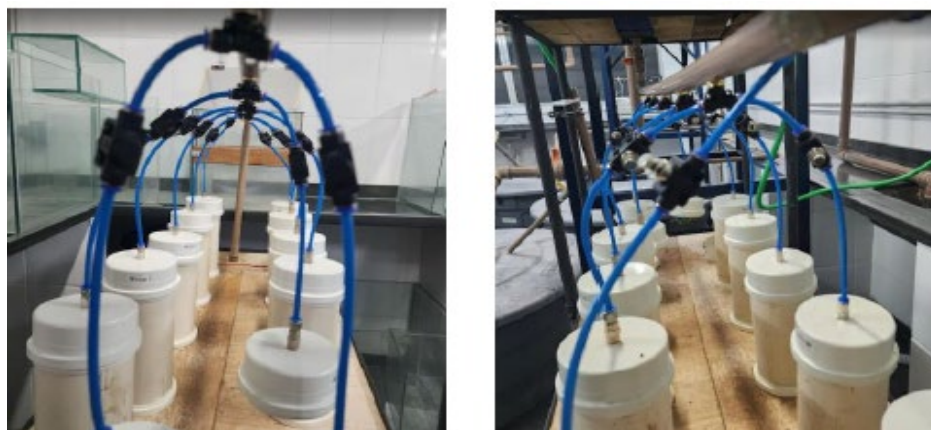
Figura 1 – Formação de fissuras após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Posteriormente os corpos de prova foram posicionados em um equipamento capaz de simular o processo de percolação da água através das fissuras nas estruturas de concreto, conforme representado na figura 2. O fechamento dessas fissuras foi monitorado por inspeções visuais periódicas, utilizando régua graduada de fissuras e lupa de aumento. Registrou-se a evolução do selamento em intervalos até os 90 dias de exposição.

Figura 2 – Ensaio de permeabilidade à água em corpos de prova de concreto



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A resistência à compressão axial foi determinada segundo a NBR 5739:2018, aos 7, 14, 28, 56 e 90 dias. Para cada idade e condição, foram rompidos três corpos de prova, adotando-se a média dos valores obtidos. Esse procedimento garante maior confiabilidade estatística e reduz a dispersão dos resultados.

O delineamento experimental buscou integrar parâmetros complementares de durabilidade visando analisar o desempenho mecânico residual, avaliado pela resistência à compressão após exposição ao meio sulfatado e a eficiência da autocicatrização, verificada pelo fechamento de fissuras induzidas.

A inclusão dos aditivos cristalizantes no protocolo experimental permitiu comparar seu desempenho frente ao traço convencional, oferecendo subsídios técnicos para validar ou refutar sua aplicação em estruturas sujeitas a ambientes químicos agressivos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de compressão axial demonstraram diferenças significativas entre os concretos avaliados, tendo a amostra de referência, quando exposta à solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , apresentado redução progressiva da resistência, confirmando a ação deletéria do ataque de sulfatos, já reportada na literatura (Neville, 2013; Mehta & Monteiro, 2014). Em contrapartida, as amostras contendo aditivos cristalizantes apresentaram desempenho superior. A Amostra 2 destacou-se, alcançando incremento médio de 7% na resistência aos 90 dias, quando comparada ao traço sem aditivo, conforme representado na tabela 1, evidenciando maior eficácia do aditivo em reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia e retardar a penetração dos íons agressivos.

Tabela 1 – Determinação da resistência a compressão axial (MPa) - com sulfato

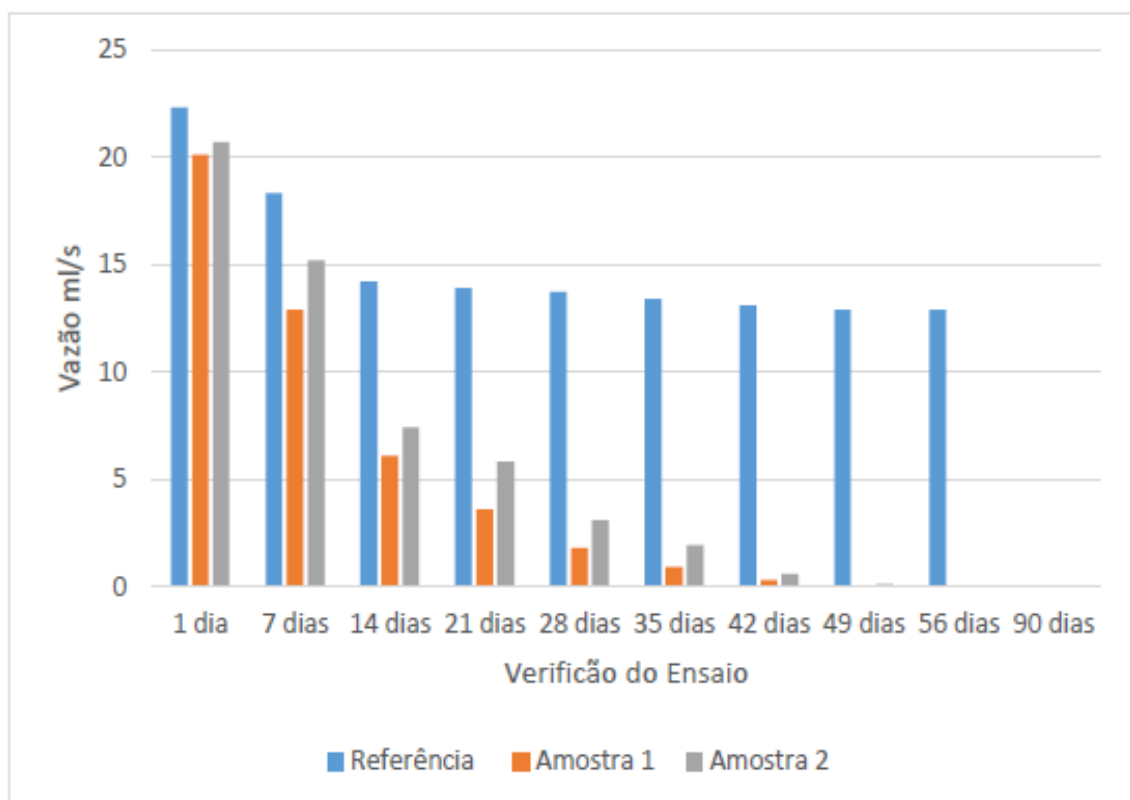
Ensaio (dias)	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Média	Desvio Padrão
7	22,0	23,8	24,2	23,3	1,16
14	28,0	29,5	30,0	29,2	1,04
28	34,5	36,2	37,0	35,9	1,30
56	36,2	38,1	38,8	37,7	1,35
90	35,0	36,5	37,45	36,3	1,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O monitoramento das fissuras induzidas revelou diferenças marcantes entre os grupos avaliados. O concreto de referência não apresentou sinais relevantes de selamento, permanecendo vulnerável ao avanço do ataque químico. Já os corpos de prova com aditivos cristalizantes mostraram fechamento parcial a partir de 49 dias, com destaque para a Amostra 2, na qual foi possível observar selamento visível de fissuras com aberturas com até 0,4 mm, a figura 3 representa o gráfico de vazão volumétrica nos corpos de prova.

Embora a literatura reporte que a cicatrização natural pode ocorrer em prazos mais curtos e em fissuras menores (<0,2 mm), os resultados indicam que, em meios agressivos, os aditivos ampliam tanto o prazo de manifestação quanto a largura de fissuras passíveis de recuperação, confirmando sua eficácia como solução complementar de durabilidade. Em síntese, a adição de produtos cristalizantes contribuiu para retardar os efeitos deletérios do ataque de sulfatos, favorecendo a preservação da resistência mecânica e promovendo a autocicatrização em condições mais severas de exposição.

Figura 3 – Gráfico da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Adicionalmente, os incrementos de resistência observados em alguns grupos com aditivos sugerem que, além de reduzir a degradação, os produtos cristalizantes podem contribuir para o ganho de desempenho mecânico tardio, hipótese também defendida por Bonifácio et al. (2022) em estudos de durabilidade acelerada.

Embora os resultados sejam promissores, o protocolo experimental adotado apresenta limitações inerentes ao ambiente laboratorial. A concentração constante de sulfatos e as condições controladas de cura não reproduzem integralmente as variações presentes em ambientes reais, como ciclos de secagem e molhagem, temperatura variável e presença de outros agentes agressivos. Portanto, recomenda-se a continuidade de pesquisas que incorporem análises microestruturais (MEV, DRX) e ensaios de campo para validar a aplicabilidade dos resultados em escala real.

## **CONCLUSÕES**

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

A incorporação dos produtos mostrou-se eficiente na mitigação dos efeitos do ataque de sulfatos, favorecendo tanto a preservação quanto o incremento da resistência à compressão em comparação ao concreto sem aditivo cristalizante.

Embora ambos os aditivos tenham contribuído para a melhoria da durabilidade, a Amostra 2 (aditivo y) apresentou desempenho superior, com incremento médio de 7% na resistência e maior capacidade de selamento de fissuras (até 0,4 mm).

O fechamento parcial das fissuras foi verificado a partir de 49 dias, evidenciando que os aditivos ampliam a eficiência da autocicatrização em condições químicas severas, nas quais o processo natural seria insuficiente.

A tecnologia analisada apresenta potencial para uso em estruturas expostas a sulfatos, como fundações, obras de saneamento e infraestrutura de transporte, contribuindo para maior vida útil e menor custo de manutenção.

Os ensaios foram conduzidos em condições laboratoriais controladas; portanto, a validação em campo, sob diferentes ciclos ambientais e análises microestruturais, é recomendada para aprofundar os resultados

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 5738: **Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 6118: **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 15900: **Água para amassamento do concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 17054: **Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.
- BONIFÁCIO, D. R. et al. **Análise sobre ataques por sulfatos ao concreto de fundações**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 4, 2022. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20653>.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- ROCHA, T. V.; RAMOS, L. M.; TEIXEIRA, B. L. **Concretos autocicatrizantes com aditivos cristalizantes: uma revisão crítica**. Revista Ciência & Engenharia, v. 41, n. 4, p. 71–83, 2023.