

REGENERAÇÃO E MICROESTRUTURA DE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE ATIVADO POR CRISTALIZAÇÃO INTEGRAL

JHONATAN ISRAEL MELO ROSENDO¹, ISYANNE TAVARES DA SILVA SOBRAL² e EDUARDO DA CRUZ TEIXEIRA³

¹Discente em Engenharia Civil, IFPB, Campina Grande-PB, jhonatan.melo@academico.ifpb.edu.br;

²Discente em Construção de Edifícios, IFPB, Campina Grande-PB, isyanne.tavares@academico.ifpb.edu.br;

³DSc. em Engenharia Civil, Prof. Titular Engenharia Civil, IFPB, Campina Grande-PB, eduardo.teixeira@ifpb.edu.br;

RESUMO: Este artigo avalia a regeneração e as alterações microestruturais de concretos autocicatrizantes ativados por cristalização integral, com foco na recuperação da estanqueidade, redução da permeabilidade e recuperação parcial da resistência mecânica após a formação de fissuras controladas. O programa experimental comparou um concreto convencional e um concreto contendo o aditivo cristalizante Penetron Admix, submetidos a diferentes condições de cura. Foram realizados ensaios de resistência mecânica, permeabilidade e absorção de água, além de análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX), complementadas pelo acompanhamento visual do fechamento das fissuras. Os resultados evidenciaram maior capacidade de autocicatrização do concreto com aditivo cristalizante, caracterizada pelo fechamento progressivo das fissuras e redução da permeabilidade. As análises microestruturais indicaram a formação de produtos cristalinos nas regiões fissuradas, contribuindo para a regeneração do material e o aumento da durabilidade e da vida útil das estruturas de concreto.

PALAVRAS-CHAVE: fissuração; durabilidade; permeabilidade; estanqueidade; aditivo cristalizante.

REGENERATION AND MICROSTRUCTURE OF SELF-HEALING CONCRETE ACTIVATED BY INTEGRAL CRYSTALLIZATION

ABSTRACT: This study evaluates the regeneration and microstructural changes of self-healing concrete activated by integral crystallization, focusing on watertightness recovery, permeability reduction, and partial recovery of mechanical strength after controlled crack formation. The experimental program compared conventional concrete with concrete containing Penetron Admix crystalline admixture, subjected to different curing conditions. Mechanical strength, permeability, and water absorption tests were performed, along with microstructural analyses using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD), complemented by visual monitoring of crack closure. The results demonstrated a greater self-healing capacity in concrete containing the crystalline admixture, characterized by progressive crack closure and reduced permeability. Microstructural analyses indicated the formation of crystalline products in cracked regions, contributing to material regeneration and increasing the durability and service life of concrete structures.

KEYWORDS: cracking; durability; permeability; watertightness; crystalline admixture.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por estruturas de concreto mais duráveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir os efeitos da fissuração e prolongar a vida útil das edificações. Apesar de sua ampla utilização na construção civil, o concreto é suscetível à formação de fissuras decorrentes de retração, variações térmicas e solicitações mecânicas, que favorecem a entrada de agentes agressivos e comprometem a durabilidade das estruturas (HELENE; ANDRADE, 2010; DAL MOLIN, 1988; MOSH, 2009). Nesse contexto, destacam-se os concretos autocicatrizantes (*self-healing concrete*), capazes de

promover a recuperação de fissuras por mecanismos autógenos, relacionados à hidratação tardia e à carbonatação, ou autônomos, por meio da incorporação de agentes de cura, como aditivos cristalizantes, polímeros, microcápsulas e microrganismos (DE ROOIJ et al., 2013; VAN TITTELBOOM et al., 2012; STRYSZEWSKA; DUDEK, 2020). Entre essas alternativas, os aditivos cristalizantes apresentam potencial para reagir com a água e os compostos da matriz cimentícia, formando cristais insolúveis capazes de preencher poros e fissuras, reduzindo a permeabilidade e contribuindo para a durabilidade do concreto, especialmente em ambientes úmidos (STRYSZEWSKA; DUDEK, 2020; GHAZY et al., 2024).

Diante disso, este estudo avalia o comportamento de concretos autocicatrizantes ativados por cristalização integral, analisando o fechamento de fissuras, a recuperação parcial das propriedades mecânicas e os efeitos do aditivo cristalizante na durabilidade do concreto, em comparação com um concreto convencional sem aditivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo comparou um concreto de referência e outro contendo aditivo cristalizante integral, ambos com resistência característica de 30 MPa. Foram utilizados cimento CP V-ARI, areia natural lavada, brita granítica de 19 mm e relação água/cimento de 0,45, conforme as ABNT NBR 12655:2021 e NBR 6118:2023. A trabalhabilidade foi avaliada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998). Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 × 20 cm, curados e posteriormente fissurados por compressão diametral controlada, com abertura média de $0,20 \pm 0,05$ mm. Após a fissuração, os corpos de prova foram submetidos a diferentes condições de cura por 14 dias. A autocicatrização foi avaliada por meio de ensaios de resistência mecânica, absorção de água, permeabilidade e monitoramento visual das fissuras, complementados por análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX). Os resultados foram analisados por médias, desvios-padrão e ANOVA, permitindo avaliar os mecanismos de autocicatrização e o potencial do material para aplicações com maior durabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova com Penetron Admix apresentaram desempenho superior ao concreto de referência quanto à autocicatrização. Após a fissuração controlada, foram submetidos à imersão em água para ativação do aditivo, cuja reação com a água e os compostos livres do cimento promoveu a formação de cristais insolúveis, capazes de preencher as fissuras e recuperar parcialmente a impermeabilidade do concreto. Aos 14 dias, observou-se evolução progressiva da cicatrização, período de intensificação da formação desses produtos (GHAZY et al., 2024). Conforme as Figuras 1 e 2, verificou-se o fechamento gradual das fissuras, especialmente aquelas com abertura média próxima de 0,20 mm..

Figura 1 - Evolução das fissuras cp I aos 14 dias com 0,5% do aditivo



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)



Figura 2 - Evolução das fissuras da base do cp IV aos 14 dias com 0,8% do aditivo

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise visual evidenciou redução das fissuras e formação de depósitos sólidos em suas paredes após 14 dias de cura, indicando a atuação do aditivo cristalizante. Nos corpos de prova de referência, não houve fechamento visual significativo, restringindo-se à autocicatrização autóloga por hidratação tardia e carbonatação. A ausência do aditivo limitou a formação de produtos capazes de selar progressivamente as fissuras, conforme Van Tittelboom et al. (2012) e Stryszewska e Dudek (2020).

Dessa forma, os resultados confirmam a limitada capacidade de autocicatrização do concreto convencional e evidenciam a importância da incorporação de aditivos cristalizantes para a ativação de mecanismos autônomos de selamento, especialmente em fissuras de maior abertura.

Além da análise visual do fechamento das fissuras, a eficiência do processo de autocicatrização foi avaliada por meio dos ensaios de resistência mecânica realizados após 14 dias de cura, cujos resultados médios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência média à compressão diametral dos corpos de prova aos 14 dias

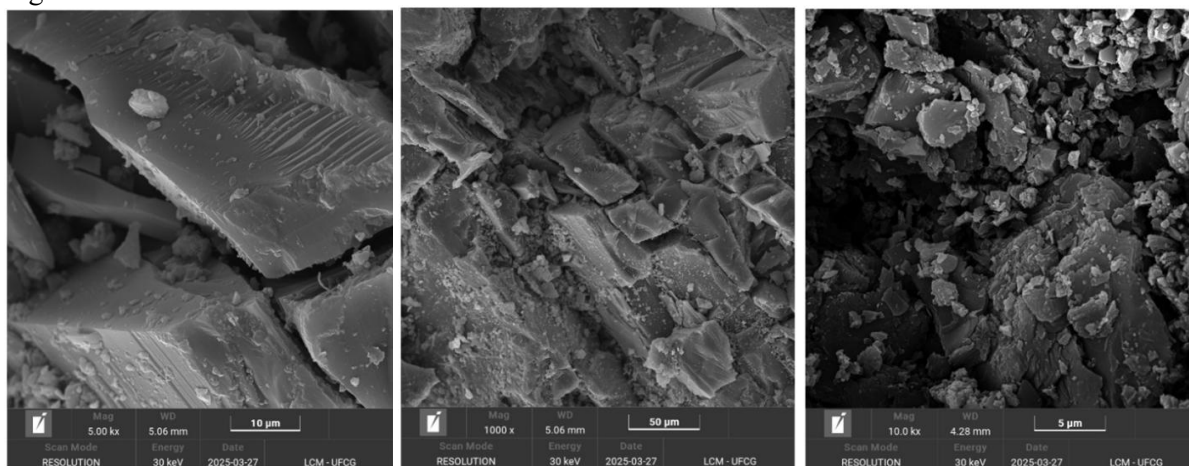
Corpo de prova	Condição de cura	Ensaio 1 (MPa)	Ensaio 2 (MPa)	Resistência média (MPa)
Referência	Ar ambiente	44,95	50,15	47,55

Referência	Submerso	54,15	29,90	42,02
Penetron 0,5%	Ar ambiente	26,60	61,80	44,20
Penetron 0,5%	Submerso	18,60	62,10	40,35
Penetron 0,8%	Ar ambiente	87,10	82,60	84,85
Penetron 0,8%	Submerso	85,45	21,15	53,30

Os corpos de prova com Penetron apresentaram, em geral, maior resistência mecânica e menor permeabilidade em relação ao concreto de referência, com destaque para o teor de 0,8%, comportamento associado à obstrução de poros e à consolidação microestrutural (STRYSZEWSKA; DUDEK, 2020). A análise visual aos 14 dias evidenciou maior selamento das fissuras nos concretos com aditivo, especialmente sob cura submersa, enquanto o concreto de referência apresentou apenas autocicatrização autógena pontual (VAN TITTELBOOM et al., 2012). A disponibilidade de água favoreceu a formação de cristais insolúveis, promovendo o preenchimento de poros e fissuras e a recuperação parcial da resistência, sobretudo em fissuras inferiores a 0,3 mm (GHAZY et al., 2024; DE ROOIJ et al., 2013). Os resultados indicam que o aditivo cristalizante contribui para a redução da permeabilidade, o selamento de fissuras e o aumento da durabilidade do concreto, apresentando potencial para aplicações em estruturas expostas à umidade.

As análises em MEV confirmam que o concreto autocicatrizante apresenta desempenho superior em termos de densificação microestrutural, selagem de fissuras e resistência à penetração de agentes agressivos. A presença de aditivo cristalino promove mudanças significativas na configuração interna do material, resultando em maior durabilidade e menor necessidade de intervenções corretivas em ambientes agressivos.

Figura 3 – Amostras ADT



CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a incorporação do Penetron Admix favoreceu a autocicatrização do concreto, promovendo maior fechamento das fissuras, redução da permeabilidade e recuperação parcial da capacidade resistente. As análises por MEV evidenciaram uma matriz cimentícia mais densa e contínua no concreto com aditivo, com poros parcialmente preenchidos por formações cristalinas, incluindo estruturas compatíveis com etringita, contribuindo para o selamento de vazios e fissuras internas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA; ISAIA, 2017). Em contraste, o concreto de referência apresentou microestrutura mais porosa, com falhas na zona de transição pasta-agregado. A cura em meio úmido mostrou-se fundamental para ativar a cristalização e favorecer a formação de produtos insolúveis, dificultando a penetração de agentes agressivos. Assim, os resultados confirmam o

potencial dos aditivos cristalizantes para aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto, embora sua eficiência dependa da abertura das fissuras e das condições de cura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13752: Perícias de engenharia na construção civil. Rio de Janeiro, 2024.

ANDRADE, T.; HELENE, P. Durabilidade do concreto: fundamentos e aplicações. São Paulo: Pini, 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. Fissuração e deformações em concretos de alta resistência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

MOSH, L. Mechanisms of Cracking and Debonding in Concrete Structures. Journal of Structural Engineering, v. 135, n. 4, p. 312–324, 2009.

DE ROOIJ, M. R.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC. Dordrecht: Springer, 2013.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; DE ROOIJ, M. R. Autogenous and Autonomous Crack Healing in Cementitious Materials. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 12, p. 1566–1573, 2012.

STRYSZEWSKA, T.; DUDEK, M. Microstructure of Autonomous Self-Healing Concrete. Materials Science and Engineering, v. 471, p. 012057, 2020.

GHAZY, M. H.; ABO EL-ENIN, S. A.; ZAYED, T. Self-Healing Concrete Techniques and Performance: A Review. Results in Materials, v. 22, p. 101–135, 2024.