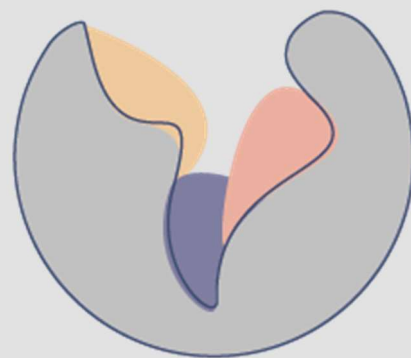


ANAIIS SIBRACIC



1º Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto - Estanqueidade e Durabilidade

22 e 23 de maio de 2025
Porto Alegre – RS

Realização:



Copromoção:



Patrocínios:



ADITIBRAS



Apoio Institucional:



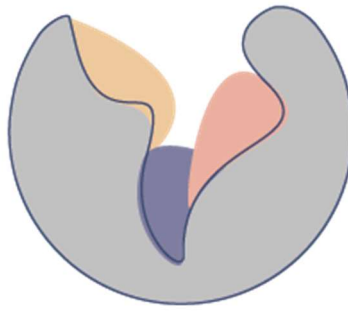
Instituto de
Impermeabilização



DESDE 1949



DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025>



I° SIBRACIC

1º Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto - Estanqueidade e Durabilidade

**22 e 23 de maio de 2025
Porto Alegre, RS**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Rosa Helena Cunha Vidal CRB 10/1906

612s Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto (1. : 2025 : Porto Alegre, RS).

Anais do I Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto, 22 e 23 de maio de 2025, Porto Alegre, RS / organizado por Edna Possan, Victor Saldanha Cassel e Aline Cristiane Rocha Lacerda. – Porto Alegre : ANTAC, 2025.

ISBN: 978-65-987342-0-6

1. Concreto. 2. Autocicatrização. 3. Durabilidade. 4. Recuperação de fissuras. I. Possan, Edna; II. Cassel, Victor Saldanha; III. Lacerda, Aline Cristiane Rocha. IV. Título.

CDU 624.01

Comissão organizadora local

Prof^a. Dra. Angela Borges Masuero (UFRGS) - Comissão coordenadora

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS) - Comissão coordenadora

Prof^a. Dra. Denise Dal Molin (UFRGS) - Comissão coordenadora

Prof^a. Dra. Lais Zucchetti (UFRGS) - Comissão coordenadora

Prof^a. Dra. Fernanda Lamego Guerra (UFRGS)

Prof^a. Dra. Dóris Zechmeister (UFRGS)

Prof^a. Dra. Silvia Trein Heimfarth Dapper (PUCRS)

Rosana Dal Molin (ANTAC) - Secretária ANTAC

Aldo Leonel Temp (Doutorando NORIE/UFRGS)

Caroline Giordani (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Caroline Krauczuk (Mestranda NORIE/UFRGS)

Claudio Alex de Oliveira Pires (Doutorando NORIE/UFRGS)

Daniel Thomaz Farina (Mestrando NORIE/UFRGS)

Gabrieli Lazzari Vieira (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Jéssica Deise Bersch (Doutoranda NORIE/UFRGS e ULisboa)

José Maria de Moura Junior (Doutorando NORIE/UFRGS)

Júlia da Rosa Costa (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Juliane Rodrigues Falcão (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Julliana Andrade Laner (Mestranda NORIE/UFRGS)

Leonardo Marquezan de Oliveira (Mestrando NORIE/UFRGS)

Lucas Leonardo Lima Rabim (Doutorando NORIE/UFRGS)

Ludimilla da Silveira Ferreira da Silva (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Marciele Monique Lazzari Klein (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Maria Eduarda da Costa Walber (Mestranda NORIE/UFRGS)

Maria Eduarda da Silva Dembogurski (Mestranda NORIE/UFRGS)

Roberta Picanço Casaril (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Rodrigo Henrique R. Quevedo Melo (Doutorando NORIE/UFRGS)

Thainá Yasmin Dessuy (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Vanessa Giaretton Cappellesso (Pós doutoranda NORIE/UFRGS)

Victor Saldanha Cassel (Doutorando NORIE/UFRGS)

Yasmin Waffa Tamimi (Mestranda NORIE/UFRGS)

Comitê científico

Edna Possan (UNILA)

Fernanda Pacheco (UNISINOS)

Revisores

Alex Neves Junior (UFMT)

Ana Paula Maran (UFMS)

Berenice Martins Toralles (UEL)

Geilma Vieira (UFES)

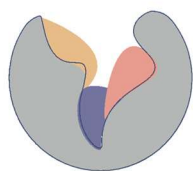
Gersson Fernando Barreto Sandoval (UPTC - Colômbia)

Nicole Pagan Hasparyk (pesquisadora/consultora)

Nicole Schwantes Cezario (UEL)

Robson Arruda dos Santos (IFPB)

Sidiclei Formagini (UFMS)



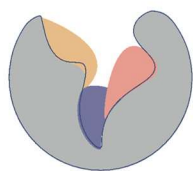
SUMÁRIO

BIOCONCRETO

APLICAÇÃO DE MICRORGANISMO PRECIPITANTE DE CARBONATO DE CÁLCIO EM FISSURAS INDUZIDAS EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA.....	6
AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS À BASE DE CIMENTO DEVIDO À BIOPRECIPITAÇÃO DE CaCO_3 : EFEITO DA CURA E DO TIPO DE BACTÉRIA	17
AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR ENCAPSULAÇÃO DE BACTÉRIA EM AGREGADO LEVE	27
AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO INCORPORADO COM BACTÉRIAS DO GÊNERO <i>BACILLUS SUBTILIS</i> PARA FINS DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS.....	38
BIOCONCRETO COM <i>BACILLUS SUBTILIS</i> : AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	49
BIODEPOSIÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO POR BACTÉRIAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: UMA MINIREVISÃO	57
DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE BACTÉRIAS ISOLADAS DE CAVERNA PARA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS E REDUÇÃO DA POROSIDADE	59
INVESTIGAÇÃO DE BACTÉRIAS INDÍGENAS PARA A PROMOÇÃO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS	71

MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DAS ESTRUTURAS

AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM AMBIENTES COM SEVERA AGRESSIVIDADE POR ATAQUE DE CLORETO	86
CHARACTERIZATION OF THE RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PRODUCED BY AUTOGENOUS HEALING	94
INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS.....	103
PROTEÇÃO DO CONCRETO DA CASA DE FORÇA DE PCH POR ADITIVO AUTOCICATRIZANTE PARA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS	113
USO DE ADITIVO AUTOCICATRIZANTE COMO PARTE INTEGRANTE DE SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE PISCINAS DE CONCRETO - ESTUDO DE CASO.....	122

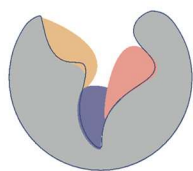


MATERIAIS CRISTALIZANTES

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES FRENTE A MIGRAÇÃO DE CLORETOS	131
DESEMPENHO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS, POR MEIO DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS E PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA	139
ESTUDO DA MELHORIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE REGENERATIVO COM SILICATO MODIFICADO POR ENZIMAS	151
INFLUÊNCIA DA AUTOCICATRIZAÇÃO SUPERFICIAL NO POTENCIAL DE CORROSÃO POR CLORETOS EM CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE.....	158
PRELIMINARY STUDIES ON THE SELF-HEALING CAPACITY OF CONCRETE BEAMS.....	169
CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ADITIVO CRISTALIZANTE SOB ATAQUE DE SULFATO	178

SUSTENTABILIDADE

ANÁLISE DA CAPACIDADE AUTOCICATRIZANTE DA CINZA VOLANTE EM CONCRETOS..	189
ANÁLISE DO MECANISMO AUTOGÊNICO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS CONTENDO CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³	198
AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO COM VISTAS À MIGRAÇÃO DE CLORETOS.....	207
AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO UTILIZANDO POZOLANAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA NO PERÍODO DE 2014 A 2024	216
AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DE FISSURAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO POR MEIO DA RESISTÊNCIA À INFILTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	227
AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE AUTOCICATRIZANTE DE CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO QUANTO AO POTENCIAL DE CORROSÃO POR CLORETOS	235
CINZA DE CASCA DE ARROZ: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	243
POTENCIAL DE CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	251



Iº SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

Apresentação

A durabilidade das construções a base de cimento, tema de investigação há décadas, demanda soluções tecnológicas inovadoras com escopo da concepção do projeto à seleção de materiais e a modelagem com inteligência artificial.

Nos últimos anos, soluções em materiais voltadas à recuperação de fissuras considerando os princípios de autocicatrização decorrentes de processo autônomos ou autógenos têm surgido como promissoras, com estudos que abrangem desde os materiais constituintes a agentes inovadores que podem ser adicionados a matriz cimentícia, como aditivos cristalizantes e bactérias.

O SIBRACIC 2025 – **I Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto** – configura-se como um evento pioneiro no país ao congregar pesquisadores, profissionais e representantes da indústria, nacionais e internacionais, com o propósito de promover o intercâmbio de conhecimentos e discutir os avanços mais recentes nesta área estratégica. A programação contempla conferências, painéis e apresentações técnicas que refletem o estado da arte das pesquisas e das aplicações relacionadas à autocicatrização do concreto.

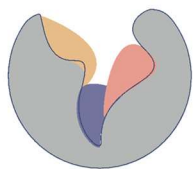
Os anais aqui apresentados reúnem contribuições técnico-científicas de elevado rigor e relevância, representando um importante registro para o desenvolvimento e consolidação deste campo no Brasil. Trata-se de um material de referência para o desenvolvimento de novos estudos assim como aplicações práticas voltadas à durabilidade das estruturas de concreto a fim de garantir o desempenho e à vida útil requerida em projeto.

Esperamos que os conhecimentos do 1º SIBRACIC sirvam de base sólida para futuras inovações, fortalecendo a engenharia nacional e contribuindo para a construção de um ambiente construído mais resiliente, durável e sustentável.

Edna Possan

Presidente do Comitê científico | 1º SIBRACIC

BIOCONCRETO



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

APLICAÇÃO DE MICRORGANISMO PRECIPITANTE DE CARBONATO DE CÁLCIO EM FISSURAS INDUZIDAS EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.1>

Graciela Mânica

Email: gmanica@universo.univates.br

Hinoel Zamis Ehrenbring

Email: hzamis@unisinos.br

Claucia Fernanda Volken de Souza

Email: claucia@univates.br

RESUMO

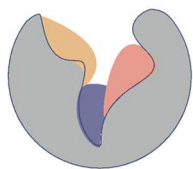
O objetivo do trabalho foi analisar o potencial de cicatrização de compostos cimentícios, com fissuração induzida, utilizando um microrganismo precipitante do CaCO_3 (*Bacillus subtilis* ATCC6633). Este foi adicionado aos corpos de prova (CPs), encapsulado por extrusão e não encapsulado e as fissuras foram induzidas mecanicamente por meio do ensaio de flexão por três pontos. Após, os CPs foram submersos em água com e sem ureia para ativação do microrganismo e acompanhamento da cicatrização das fissuras. Decorridos cem dias, observou-se a cicatrização de fissuras com até 0,6 mm nos CPs contendo microrganismo encapsulado, sem apresentar diferença entre os tratamentos com e sem ureia.

Palavras-chaves: Fissuração; calcita; *Bacillus subtilis*.

ABSTRACT

The goal of this study was to analyze the healing potential of cementitious composites with induced cracking using a CaCO_3 -precipitating microorganism (*Bacillus subtilis* ATCC6633). This was added to the specimens, encapsulated by extrusion and not encapsulated, and the cracks were induced mechanically using the three-point bending test. The CPs were then submerged in water with and without urea to activate the microorganism and monitoring of healing of the cracks. After 100 days, cracks up to 0.6 mm wide had healed in the CPs containing the encapsulated microorganism, with no difference between the treatments with and without urea.

Palavras-chaves: Cracking; calcite; *Bacillus subtilis*.



1. INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios são amplamente utilizados na indústria da construção. Porém, fissuras podem surgir nestes materiais devido a vários fatores, incluindo características intrínsecas do material e as interações entre seus componentes, bem como falhas na execução do projeto ou uso inadequado após a conclusão da estrutura.^(1, 2) As fissuras favorecem a entrada de agentes agressivos no elemento estrutural, podendo causar danos como, a corrosão da armadura e perda de capacidade de carga, aumentando os custos de manutenção e acelerando a degradação do sistema estrutural.⁽³⁾

Há várias formas de reparação das fissuras presentes nos elementos de concreto, podendo ocorrer através de reações entre os materiais componentes da mistura cimentícia, com o uso de aditivos cristalizantes, ou pela adição de microrganismos capazes de precipitar calcita ou carbonato de cálcio (CaCO_3). Esta última vem sendo estudada visando encontrar uma alternativa *eco-friendly*, que diminua os impactos das obras de reparo e melhore as características da estrutura como estanqueidade e resistência mecânica.⁽⁴⁾ A proposta envolve o uso de bactérias precipitantes de CaCO_3 na própria mistura do compósito cimentício.^(5 - 7)

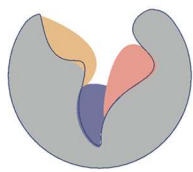
Wiktor e Jonkers⁽⁸⁾ observaram que adicionar microrganismos diretamente na mistura reduz sua atividade devido à alcalinidade da pasta de cimento. Vieira⁽⁹⁾ propôs o microencapsulamento dos microrganismos para protegê-los e mencionou a inclusão de nutrientes para auxiliar no processo metabólico. Manica et al.⁽⁴⁾ descreveram diferentes formas de aplicação do microrganismo, impregnado em componentes da mistura, encapsulados ou adicionados em meio de cultivo líquido. Ao comparar os estudos, os autores mencionaram que houve melhoria nas características do material cimentício, como diminuição da porosidade e aumento da resistência mecânica. Citam ainda que, quando o microrganismo foi adicionado incorporado em algum componente, como terra de diatomácea ou cinzas volantes, ou encapsulado em materiais poliméricos, como alginato, a cicatrização das fissuras induzidas foi observada.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cicatrização de fissuras em corpos de prova (CPs) de argamassa através da incorporação do microrganismo *Bacillus subtilis* ATCC6633 encapsulado e não encapsulado.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi estruturado em duas etapas. Na primeira, foram executados procedimentos experimentais para (i) definição da composição do meio de cultivo mais adequado para o desenvolvimento do microrganismo, (ii) identificação do tempo ótimo para o seu crescimento e (iii) encapsulamento do microrganismo com alginato (1,5% (m/v)) ou alginato (1,5% (m/v)) com amido (1% (m/v)). Na segunda etapa, o microrganismo, encapsulado e não encapsulado, foi incorporado na matriz cimentícia. Para isso, a adição do microrganismo encapsulado (cápsulas contendo o agente cicatrizante) ocorreu durante a moldagem dos corpos de prova (CPs) de argamassa, e o microrganismo não encapsulado (células microbianas livres em suspensão no meio de cultivo líquido) foi adicionado durante a mistura dos componentes da argamassa, substituindo parte da água da massa. Após a cura

MÂNICA, Graciela; EHRENBRING, Hinoel Z.; DE SOUZA, Cláucia F. V. **Aplicação de microrganismo precipitante de carbonato de cálcio em fissuras induzidas em corpos de prova de argamassa.** SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025.



dos CPs, as fissuras foram induzidas e o acompanhamento da cicatrização ocorreu ao longo de 100 dias.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

O microrganismo precipitante de calcita utilizado neste trabalho foi o *B. subtilis* ATCC6633, previamente adquirido da *American Type Culture Collection* (ATCC). Os demais materiais utilizados foram (i) nutrientes para o meio de cultivo do microrganismo: extrato de levedura, cloreto de sódio, triptona, peptona e ágar bacteriológico, adquiridos da empresa Merck, (ii) os agentes encapsulantes (materiais de parede) para a preparação das cápsulas: alginato e amido, e (iii) os materiais empregados na elaboração dos CPs: cimento CPV-ARI, areia de rio e água disponibilizada pela rede local.

3.2. Métodos de ensaio

3.2.1 Determinação das condições de cultivo para crescimento do microrganismo

Para determinação da composição do meio de cultivo para desenvolvimento do microrganismo *B. subtilis* ATCC6633 foram utilizados: (i) Meio de Cultivo 1 (MC1): extrato de levedura (5 g/L), cloreto de sódio (10 g/L) e peptona (10 g/L) e (ii) Meio de Cultivo 2 (MC2): extrato de levedura (5 g/L), cloreto de sódio (10 g/L) e triptona (10 g/L).⁽¹⁰⁾

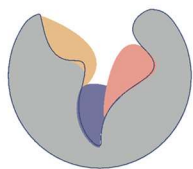
O crescimento do *B. subtilis* ATCC6633 no MC1 e no MC2 foi determinado a partir da leitura da densidade óptica (DO), em espectrofotômetro em 600 nm, e pela contagem do número de células microbianas viáveis em placas de Petri contendo os meios sólidos, através da quantificação do número de unidades formadoras de colônia (UFC). O meio de cultivo sólido foi preparado acrescentado ágar bacteriológico (15 g/L) à composição previamente descrita para o MC1 e o MC2. A partir dessas determinações foram traçadas as curvas de crescimento do microrganismo em ambos os meios de cultivo. Os experimentos e as análises foram realizados em triplicata.

3.2.2 Preparação dos esporos microbianos e encapsulamento por extrusão

A preparação dos esporos microbianos do *B. subtilis* ATCC6633 para o encapsulamento, foi realizada através da inoculação de uma colônia do microrganismo em 50 mL do MC1 líquido, que foi mantido a 8 °C por 72 h para formação dos esporos. Para preparação dos agentes encapsulantes foram misturados (i) 1,5 g de alginato de sódio com água destilada até 100 mL, e (ii) 1,5 g de alginato de sódio e 1 g de amido com água destilada até 100 mL.⁽¹¹⁾ Para encapsulamento do microrganismo foram misturados 10 mL dos agentes encapsulantes e 10 mL do cultivo com os esporos microbianos, previamente preparado, e essa mistura foi gotejada em solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) (0,5 M), sob agitação lenta e constante em placa agitadora magnética para formação das cápsulas.

3.2.3 Produção dos corpos de prova e aplicação do microrganismo

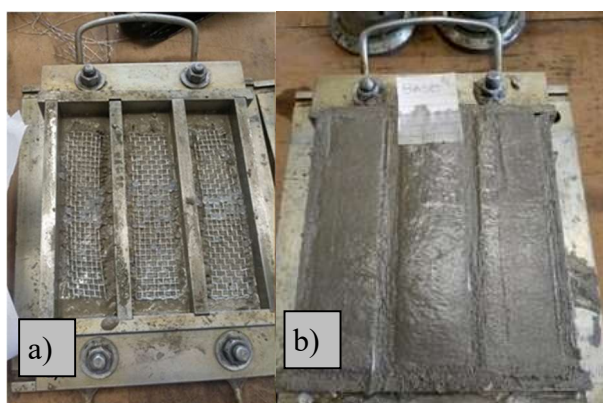
O traço utilizado neste estudo foi baseado em Wiktor e Jonkers.⁽⁸⁾ A proporção dos materiais foi 1,0: 3,2: 0,48 (cimento; areia; a/c), em massa. O preparo foi realizado em misturador de



eixo planetário, de acordo com a ABNT NBR 7215: 2019⁽¹²⁾. Os CPs foram moldados em fôrma prismática com 4 x 4 x 16 cm. O microrganismo foi acrescentado de duas formas ao material cimentício: em meio de cultivo líquido (não encapsulado), e encapsulado com alginato (1,5% m/v) e alginato com amido (1% m/v).

Nos CPs em que o microrganismo foi aplicado não encapsulado, 10 mL do MC1 com os esporos microbianos do *B. subtilis* ATCC6633 substituíram 10 mL da água utilizada na mistura dos componentes na argamassadeira. A aplicação das cápsulas com o microrganismo foi realizada no momento de moldagem da argamassa, entre as duas camadas de adensamento (Figura 1). Utilizou-se uma tela de abertura 0,5 x 0,5 cm para evitar o rompimento total das amostras durante a aplicação da carga. Os CPs foram desenhados após dois dias e foram mantidos em câmara úmida (23 ± 2 °C e umidade acima de 95%) por mais cinco dias para que ocorresse a cura da argamassa.

Figura 1 – Corpos de prova moldados: a) primeira camada de argamassa já adensada, com a tela e as cápsulas; b) corpos de prova de referência recém moldados.



Foram moldados 3 CPs prismáticos para cada uma das três formas de aplicação do microrganismo e 2 CPs de referência (sem adição de microrganismo), conforme consta na Figura 2.

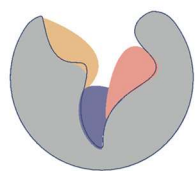
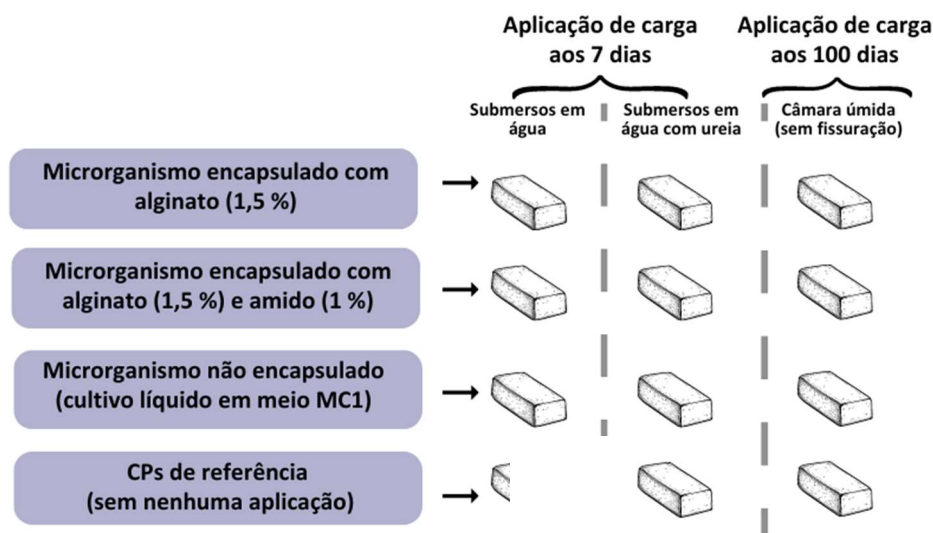


Figura 2 – Quantidade de corpos de prova moldados e os tratamentos realizados em cada um deles.



3.2.4 Fissuração dos corpos de prova e análise da cicatrização

Após cura úmida por sete dias, realizou-se o ensaio de tração na flexão por três pontos, para indução das fissuras. Dois CPs prismáticos de cada uma das três aplicações e um CP de referência foram fissurados. A fissuração ocorreu com o auxílio de uma prensa hidráulica (50 N/s). Um CP prismático de cada uma das três aplicações e o de referência foram armazenados em câmara úmida por 100 dias para verificação da resistência das cápsulas dentro dos CPs, conforme Figura 2.

A amplitude das fissuras foi determinada através de imagem em microscópio metalográfico no mesmo dia em que foram induzidas. O dimensionamento foi feito com auxílio do *software* AutoCad. Então, um dos CPs fissurados foi armazenado em recipiente com água e o outro em recipiente com água e ureia (20 g/L), pelo período de 100 dias. A cada 15 dias os corpos de prova eram retirados da cura para realizar a medição das fissuras com o auxílio de um fissurômetro e análise visual de deposição de cristais.

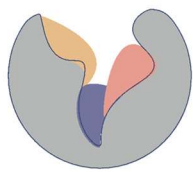
A porcentagem de cicatrização foi calculada com a Equação 1, com base na análise da abertura superficial das fissuras.

$$(e_i - e_f) / e_i * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

e_i = espessura inicial da fissura

e_f = espessura final da fissura



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação das condições de cultivo para crescimento do microrganismo

As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas de crescimento do microrganismo *B. subtilis* ATCC6633 no MC1 e MC2.

Figura 3 - Curvas de crescimento do *Bacillus subtilis* ATCC6633 em densidade ótica (DO). a) Curva de crescimento no MC1; b) Curva de crescimento no MC2.

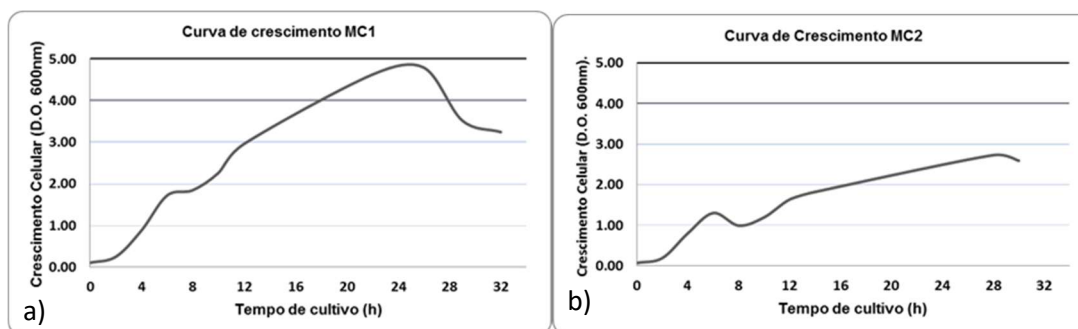
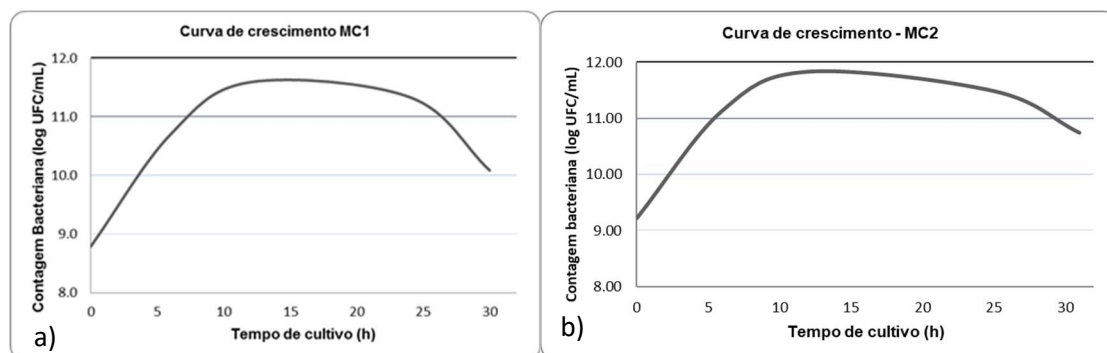


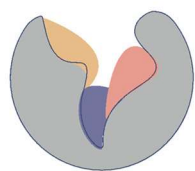
Figura 4 – Curvas de crescimento do *Bacillus subtilis* ATCC6633 em unidades formadoras de colônias (UFC) expressos em log UFC/mL. a) Curva de crescimento no MC1; b) Curva de crescimento no MC2.



A comparação dos resultados (Figuras 3 e 4) demonstrou que as duas fontes de proteína (peptona e triptona) possibilitam o crescimento ótimo do microrganismo em aproximadamente 24 h. Esse mesmo período foi determinado por Vieira,⁽⁹⁾ que também avaliou o microrganismo *B. subtilis* ATCC6633 como agente cicatrizante de fissuras. Para definição do meio de cultivo, os custos dos componentes proteicos foram avaliados. Desta forma, o MC1 foi escolhido, pois a peptona apresenta um custo, aproximadamente, 4 vezes menor que o da triptona.

4.2 Avaliação da cicatrização das fissuras

Após 42 dias foi possível observar, por análise visual, os primeiros sinais de cicatrização nos CPs mergulhados na ureia e com o microrganismo encapsulado em alginato (1,5 % (m/v)) combinado com ureia (Figura 5). Ao final do período de 100 dias observou-se a cicatrização tanto nos CPS mergulhados em água com ureia como naqueles mergulhados apenas em água. Os CPs de referência e os com microrganismo não encapsulado não apresentaram cicatrização



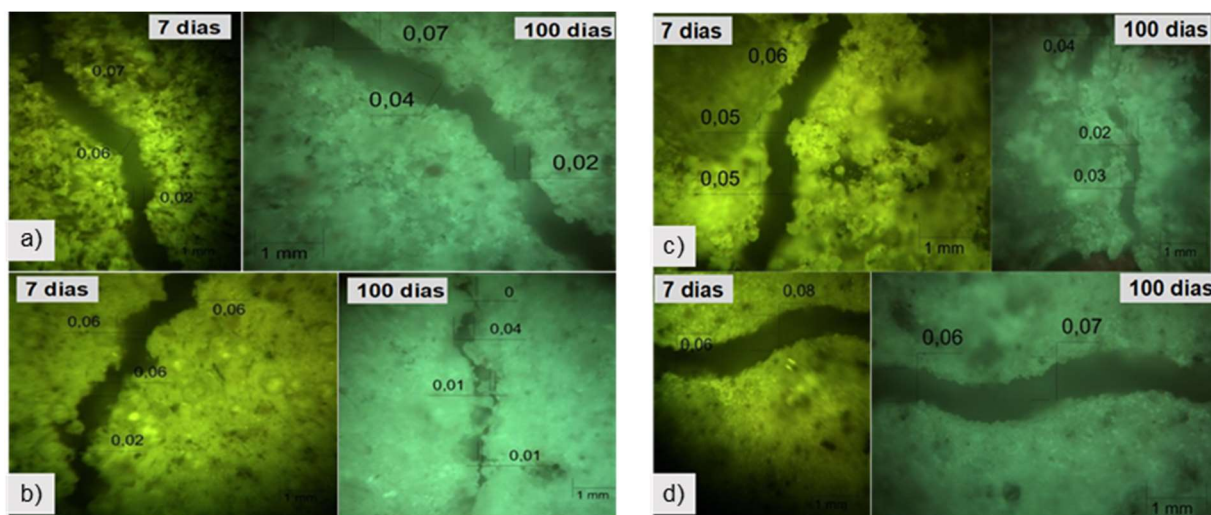
visível a olho nu neste período, apenas foi possível verificar a redução da amplitude das fissuras por meio de observação em microscópio metalográfico.

Figura 5 – Cicatrização de fissura aos 42 dias (microrganismo encapsulado em alginato (1,5% m/v) e mergulhado em água com ureia).



Após 100 dias as imagens foram realizadas novamente em microscópio para verificar se houve formação de cristais. As Figuras 6 a 8 apresentam as medidas, em mm, das fissuras dos CPs aos sete e aos 100 dias com ampliação de 20x, comparando os resultados dos CPs mergulhados na água com ureia e na água.

Figura 6 – Medidas das fissuras, em mm, aos sete e aos 100 dias no CP com microrganismo encapsulado. a) CP mergulhado na ureia (cápsula de alginato); b) CP mergulhado na água (cápsula de alginato) c) CP mergulhado na ureia (cápsula de alginato e amido); d) CP mergulhado na água (cápsula de alginato e amido)



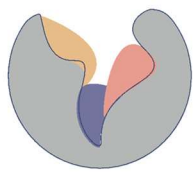


Figura 7 – Medidas das fissuras, em mm, aos sete e aos 100 dias no CP com microrganismo não encapsulado. a) CP mergulhado na ureia; b) CP mergulhado na água.

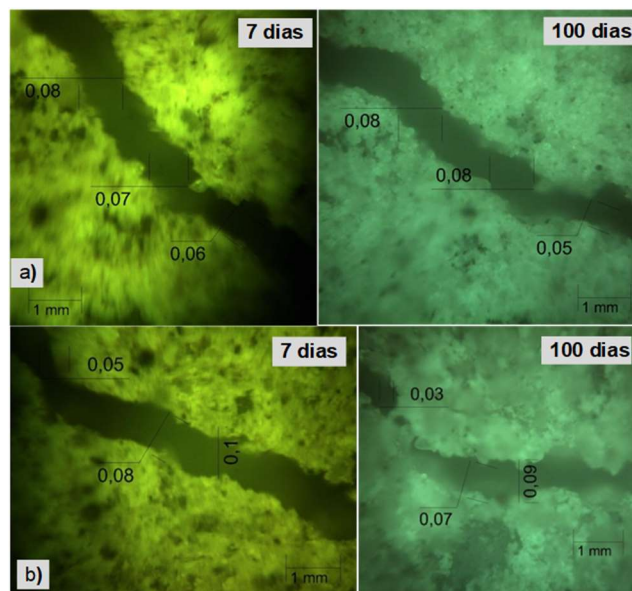
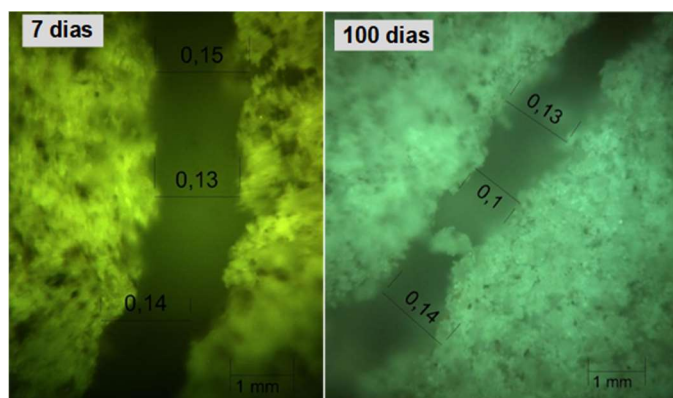


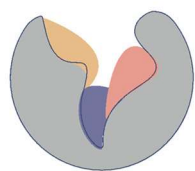
Figura 8 – Medidas das fissuras, em mm, aos sete e aos 100 dias no CP de referência mergulhado na água.



Após análise das imagens apresentadas nas Figuras 6 a 8 foi possível observar uma maior formação de cristais nas fissuras dos CPs que receberam a aplicação do microrganismo encapsulado. O resultado obtido vai ao encontro dos resultados mencionados por Su et al⁽¹³⁾.

Os autores mencionam que, após 60 dias, observaram 80% de cicatrização nas fissuras dos CPs que receberam o microrganismo encapsulado enquanto nas amostras que receberam o cultivo microbiano sem proteção houve 30% de cicatrização aos 7 dias, sem nenhum acréscimo após esse período. Estes resultados comprovam a importância de proteger os esporos bacterianos para aplicação no material cimentício.

Ao final do período de 100 dias as fissuras dos CPs contendo o microrganismo, encapsulado ou não, foram comparadas, considerando a forma de cura a que foram expostas (mergulhados em água e mergulhados em água com ureia), para todas as formas de aplicação. Não foi observada diferença entre as duas propostas, porém, as fissuras mergulhadas em água com MÂNICA, Graciela; EHRENBRING, HInoel Z.; DE SOUZA, Cláucia F. V. **Aplicação de microrganismo precipitante de carbonato de cálcio em fissuras induzidas em corpos de prova de argamassa.** SIBRACIC - 1° SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025.



ureia apresentaram uma cicatrização em um período mais curto (42 dias), como constatado por avaliação visual no decorrer do período. Vieira⁽⁹⁾ menciona a ureia como um facilitador do processo de precipitação de calcita e os resultados encontrados neste trabalho comprovaram.

A Tabela 1 apresenta os valores em milímetros (mm) das fissuras no dia em que foram induzidas e ao final do período de 100 dias e o resultado máximo da cicatrização (em %) para cada forma de aplicação e tratamento de cura.

Tabela 1 – Cicatrização máxima das fissuras aos 100 dias para cada forma de aplicação

Amostra	Data	Largura da fissura (mm)	Potencial de cicatrização (%)
Microrganismo encapsulado (alginato 1,5 % m/v) mergulhado em água	dia 1	0,50 ± 0,02	80
	dia 100	0,10 ± 0,02	
Microrganismo encapsulado (alginato 1,5 % m/v) mergulhado em água com ureia	dia 1	0,50 ± 0,02	13
	dia 100	0,4 ± 0,02	
Microrganismo encapsulado (alginato 1,5 % m/v e amido 1 % m/v) mergulhado em água	dia 1	0,7 ± 0,01	11
	dia 100	0,6 ± 0,01	
Microrganismo encapsulado (alginato 1,5 % m/v e amido 1 % m/v) mergulhado em água com ureia	dia 1	0,5 ± 0,00	44
	dia 100	0,3 ± 0,01	
Microrganismo não encapsulado (em meio de cultura líquido) mergulhado em água	dia 1	0,8 ± 0,02	18
	dia 100	0,6 ± 0,02	
Microrganismo não encapsulado (em meio de cultura líquido) mergulhado em água com ureia	dia 1	0,7 ± 0,01	5
	dia 100	0,6 ± 0,01	
Referência mergulhado em água	dia 1	0,14 ± 0,01	14
	dia 100	0,12 ± 0,02	

Os resultados correspondem à média ± o desvio padrão das moldagens realizadas.

Aos 100 dias os CPs que foram armazenados em câmara úmida foram rompidos para observação da resistência das cápsulas. A Figura 9 mostra que as cápsulas foram preservadas.

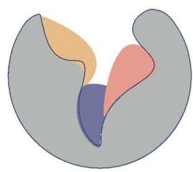
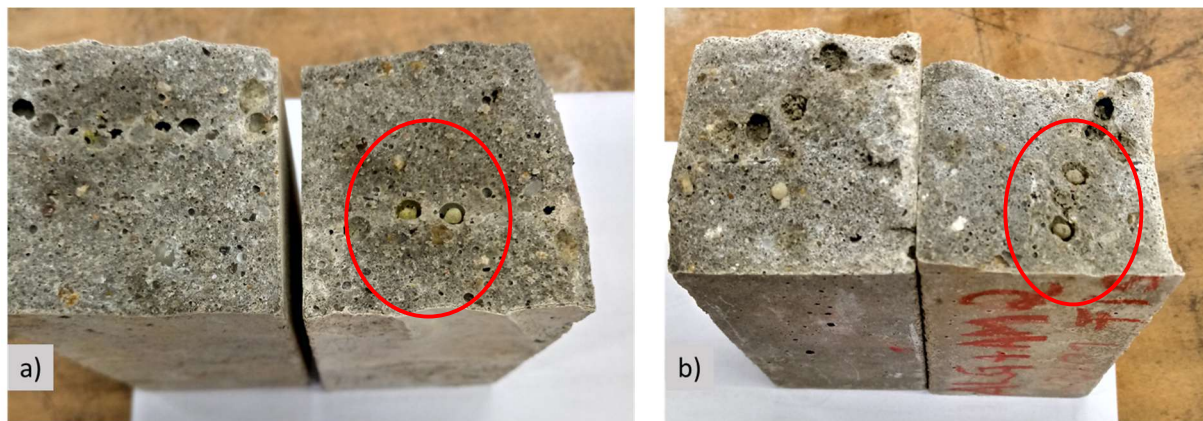


Figura 9 – Presença de cápsulas no interior dos CPs aos 100 dias de armazenamento em câmara úmida. a) Cápsulas de alginato. b) Cápsulas de alginato com amido.



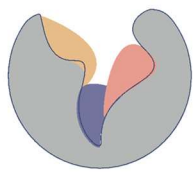
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados foi possível concluir que:

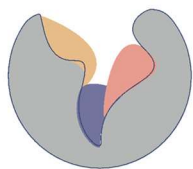
- Os dois meios de cultura (MC1 e MC2) apresentaram crescimento microbiano similar, sendo que o MC1 apresentou menor custo.
- A cicatrização das fissuras ocorreu nos CPs contendo o microrganismo encapsulado tanto com o alginato como com o alginato e amido combinados.
- A ureia demonstrou ser um acelerador do processo de cicatrização, visto que as amostras mergulhadas na água com ureia apresentaram cicatrização em um período mais curto (42 dias).
- O maior potencial de cicatrização (80%) ocorreu nos CPs contendo o microrganismo encapsulado com alginato e submersos em água.
- O encapsulamento por extrusão demonstrou manter o microrganismo viável durante o período avaliado.
- As cápsulas, de alginato e alginato combinado com amido, quando acondicionadas em câmara úmida, mantiveram-se íntegras pelo período de 100 dias.
- A variação do tamanho das fissuras demonstrou ser um desafio para a análise dos resultados, bem como a avaliação visual da cicatrização. Por isso, a aprimoração destes fatores é fundamental para melhoria do estudo.

REFERÊNCIAS

1. ZHANG, X.; QIAN, C. Engineering Application of Microbial Self-healing Concrete in Lock Channel Wall. **Case Studies in Construction Materials**, 2020.
2. MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo. IBRACON, 2014.



3. BERTRON, A. Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts. **Materials and Structures**. Netherlands, v. 47, n 11; p. 1787-1806, Nov 2014.
4. MÂNICA G.; DUCATI, R. G.; MASCOLO, R.; SOUZA, C. F. V. de. Use of microorganisms in cementitious materials - a systematic review. **Construction and Building Materials**. V. 373, 2023.
5. ROSSI, E., ROY, R.; COPUROGLU, O.; JONKERS, H. M. Influence of self-healing induced by polylactic-acid and alkanoates-derivates precursors on transport properties and chloride penetration resistance of sound and cracked mortar specimens. **Construction and Building Materials**, v. 319, 2022.
6. Qu, Z.; Guo, S.; Zheng, Y.; Giakoumatos, E. C.; YU, Q.; Voets, I. K. A simple method to create hydrophobic mortar using bacteria grown in liquid cultures. **Construction and Building Materials**, v. 297, 2021.
7. NGUYEN, T. H.; GHORBEL, E.; FARES, H.; COUSTURE, A. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment, *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 103340, 2019.
8. WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.33, Issue 7, p. 763-770, 2011.
9. VIEIRA, Juliana Aparecida. **Biodeposição de CaCO₃ em materiais cimentícios: Contribuição ao estudo da biomineralização induzida por *Bacillus subtilis***. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2017.
10. NUGROHO, A.; SATYARNO, I.; SUBYAKTO, S. Bacteria as Self-Healing Agent in Mortar Cracks. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 47, n. 3, p. 279-295, jul. 2015.
11. MARTIN, M. J.; LARA-VILLOSLADA, F.; RUIZ, M. A.; MORALES, M. E. Effect of unmodified starch on viability of alginate-encapsulated *Lactobacillus fermentum* CECT5716. **LWT - Food Science and Technology**. v. 53. P. 480-48617, 2013.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de janeiro: ABNT, 2019.
13. SU, Y.; QU, F.; ZHANG, J.; ZHANG, X. A new bacteria-based self-healing system triggered by sulfate ion for cementitious material. **Journal of Building Engineering**, v. 86, 108886, 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS À BASE DE CIMENTO DEVIDO À BIOPRECIPITAÇÃO DE CaCO_3 : EFEITO DA CURA E DO TIPO DE BACTÉRIA

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.2>

Tamires Souza Razente

Email: ts.razente.2020@aluno.unila.edu.br

Renato Enrique da Silva

Email: re.silva.2019@aluno.unila.edu.br

Pamela Leticia dos Santos Bez Fontana

Email: pls.fontana.2021@aluno.unila.edu.br

Edna Possan

Email: edna.possan@unila.edu.br

RESUMO

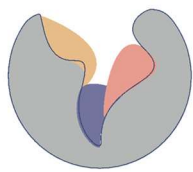
Neste estudo avaliou-se experimentalmente a autocicatrização de argamassas com e sem ar incorporado, para duas linhagens de bactérias *Bacillus subtilis* (AP91 e B2) e duas condições de cura (submersa e com manta geotêxtil). Foram conduzidos ensaios de resistência à compressão, velocidade de propagação de pulso ultrassônico e módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 63 dias, em amostras íntegras e fissuradas. A medição de abertura de fissuras foi conduzida com estereomicroscópio nas idades de 7, 14 e 56 dias. Constatou-se que as bactérias propiciam a autocicatrização de fissuras, especialmente quando submetidas à cura submersa. A incorporação de ar à mistura corrobora para o processo de autocicatrização biológica.

Palavras-chaves: Bactérias, fissuras, biomateriais.

ABSTRACT

This study experimentally evaluated the self-healing behavior of mortars with and without air-entrainment, using two *Bacillus subtilis* strains (AP91 and B2) under two curing conditions (submerged and geotextile-covered). Compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and dynamic modulus of elasticity tests were performed on intact and pre-cracked specimens at 28 and 63 days. Crack width measurements were carried out using a stereomicroscope at 7, 14, and 56 days. The results indicated that bacterial activity promotes crack self-healing, particularly under submerged curing conditions. Additionally, air entrainment in the mixture contributed positively to the biological self-healing process.

Palavras-chaves: Bacteria, cracks, biomaterials.



1. INTRODUÇÃO

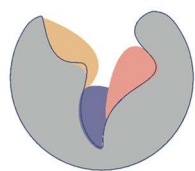
O concreto é o material mais utilizado na construção civil devido à sua acessibilidade, facilidade de produção e adaptabilidade à trabalhabilidade desejada. No entanto, sua baixa resistência à tração contribui para o aparecimento de fissuras, manifestações patológicas que podem desencadear ou acelerar outros processos de degradação, como a corrosão das armaduras, sendo importante evitar ou mitigar sua ocorrência.

Com o avanço da tecnologia e a busca por melhorias qualidade das construções, surgiram estudos sobre a eficiência das bactérias na recuperação de fissuras em elementos e estruturas de concreto (Jonkers; Schlangen, 2008, Ghellere, 2021). As bactérias precipitam carbonato de cálcio (CaCO_3), conferindo paulatinamente o preenchimento das fissuras em um processo conhecido como autocicatrização (em inglês, *self-healing*), o que confere aumento da resistência mecânica (Roig-Flores et al., 2021; Jogi; Lakshmi, 2020) e melhoria da estanqueidade do material cimentício (Jonkers; Schlangen, 2008).

A reparação de fissuras, por meio da biodeposição de CaCO_3 por bactérias, vem se tornando uma ferramenta biotecnológica de manutenção e restauração de estruturas à base de materiais cimentícios. Esta alternativa pode ser considerada promissora principalmente em locais não visíveis e/ou de difícil acesso como estruturas de concreto subterrâneas, e ainda estruturas que para serem reparadas podem necessitar da interrupção temporária de serviço, como pontes, túneis e barragens (Tittelboom ;De Belie, 2003).

Em matrizes a base de cimento, as bactérias atuam como agentes catalisadores; a umidade ingressa com mais facilidade e quantidade através da fissura do material, entrando em contato com as bactérias que saem do estado de hibernação e precipitam carbonato de cálcio (CaCO_3), podendo preencher fissuras de até 0,9 mm (Roig-Flores et al., 2021). Esse preenchimento ocorre da parede para o interior da fissura, sendo que fissuras de menor abertura são fechadas mais rapidamente (Ghellere et al., 2025). Além do tamanho da fissura, o tipo de agente biológico empregado, a disponibilidade de nutrientes, oxigênio e umidade, o pH da matriz de cimento, a temperatura ambiente, entre outros fatores afetam o processo de autocicatrização de fissuras por agentes biológicos em materiais a base de cimento Portland (Jonkers; Schlangen, 2008, Roig-Flores et al., 2021, Lenz, 2022, Ghellere et al., 2025).

O processo de *self-healing* através da precipitação de carbonato de cálcio por bactérias (biodeposição), envolve vários microrganismos, vias metabólicas e ambientes diferenciados. A aplicação de incorporador de ar em misturas cimentícias pode potencializar a eficiência da reparação das fissuras, pois elevam a disponibilidade de oxigênio necessário ao desenvolvimento bacteriano (Lenz, 2022). Além das características do agente biológico empregado (Ghellere et al., 2025), outro fator importante no processo de autocicatrização é a disponibilidade de água, onde em ambientes saturados tem-se melhor performance (Wong et al, 2024). Neste contexto, este estudo busca avaliar o efeito do tipo de agente biológico, da incorporação de ar e o tipo cura no processo de autocicatrização de matrizes à base de cimento.



2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Visando avaliar o potencial de aplicação de diferentes bactérias para recuperação de fissuras em materiais a base de cimento, considerando o processo de cura e a presença de ar incorporado à mistura, este estudo experimental foi conduzido. Conforme tabela 1, foram confeccionadas seis argamassas (com e se ar incorporado), submetidas a dois distintos processos de cura (submersa e com manta geotêxtil) que totalizaram nove grupos de análise.

Tabela 01: matriz experimental do estudo

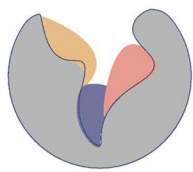
Argamassas	Bactéria	Condição de cura	Aditivo incorporador de ar
B2	Unila	Manta geotêxtil	Não
AP91	Embrapa		
SBAC	-		
B2	Unila	Submersa	
AP91	Embrapa		
SBAC	-		
B2	Unila	Submersa	Sim
AP91	Embrapa		
SBAC	-		

Primeiramente, fez-se a preparação das bactérias, seguida da produção e preparação das amostras e realização dos ensaios de controle tecnológico e avaliação da autocicatrização.

2.1 Preparação das bactérias

Para o início do preparo das bactérias, foi necessário reativá-las, visto que estavam inertes e armazenadas a -80 °C. Foram preparadas duas cepas bacterianas a *Bacillus subtilis* AP91 e a *Bacillus subtilis* B2, avaliadas no estudo de Ghellere, et al. (2025). Os agentes bacterianos foram retirados do freezer e descongelados lentamente utilizando uma caixa térmica com gelo, evitando assim o choque térmico ao passarem de -80 °C para a temperatura ambiente. Após o descongelamento, as bactérias foram cultivadas em um meio sólido composto por sódio (Na) e nistatina (C47H75NO17) (Figura 1 a). Posteriormente o crescimento, iniciou-se o processo de esporulação, que consiste em transferir as bactérias do meio sólido para o meio líquido de cultura de Mueller Hinton, composto por 17 g/L de peptona de caseína, 2 g/L de peptona de carne e 1,5 g/L de amido, com pH final de $7,3 \pm 0,1$. Em seguida, as bactérias foram colocadas em um agitador por 66 horas a uma temperatura constante de 37 °C.

Para obter uma maior concentração dos agentes bacterianos após a agitação as bactérias foram lavadas para remover o meio de cultura líquido. A lavagem foi realizada colocando as bactérias em tubos Falcon e centrifugando-as por 20 minutos a uma rotação de 3600 rpm, substituindo o meio de cultura por uma solução de 0,85% de cloreto de sódio (NaCl). A solução final foi armazenada por 2 dias a 8 °C, induzindo a formação de esporos. Posteriormente, para o cálculo da concentração de esporos, utilizou-se a fórmula apresentada por Ramachandran (equação 1) onde Y representa à quantidade de esporos e X a absorvência média.



$$Y = (8,59 \times 10^7) \cdot (X^{1,3627}) \quad (\text{equação 01})$$

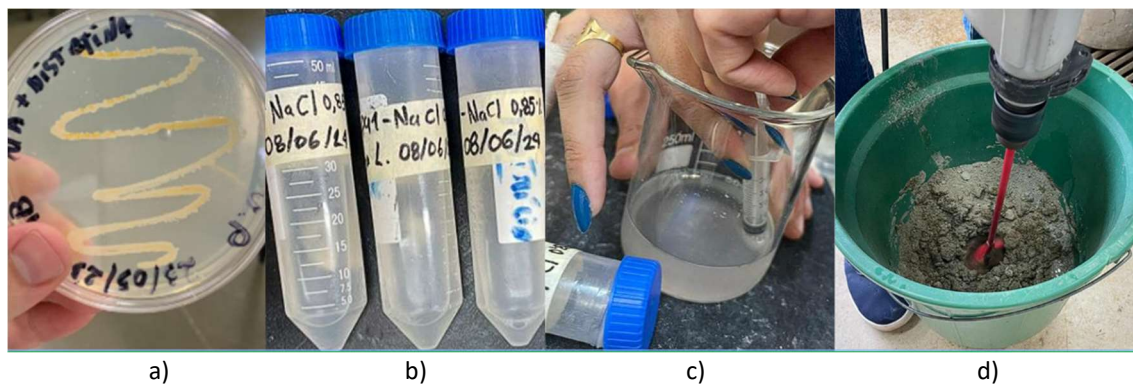
O preparo das bactérias foi realizado em parceria com o núcleo de Biotecnologia da UNILA, e quando finalizado as amostras esporuladas e quantificadas foram armazenadas em tubos de ensaio devidamente identificados (Figura 1 b) sob refrigeração. A aplicação das bactérias à matriz cimentícia ocorreu sete dias após a conclusão do processo de preparação.

2.2 Produção e preparação das amostras à base de cimento

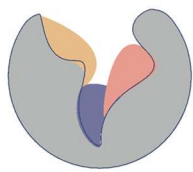
Esta etapa começou com a produção das argamassas de cimento, areia, água e dois tipos de bactérias incorporadas à água de mistura em matrizes com e sem aditivo incorporador de ar (figura 1 c e d), empregados conforme indicação do fabricante no teor de 0,1 % em relação à massa de cimento. A relação água/cimento (a/c) e a proporção cimento-areia foram determinadas com base no estudo de Ghellere et al., (2025), empregando-se a proporção de 1:3:048 (cimento, areia normal e água). O cimento Portland empregado foi o CPV ARI, com massa específica de 3,01 kg/dm³.

Foram moldadas amostras prismáticas de 4x4x16 cm destinadas à análise da autocicatrização das fissuras ao longo do tempo e de 5x10 cm para avaliação das propriedades de resistência à tração na flexão, compressão e absorção de água por capilaridade, em triplicata seguindo as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 1: Bactérias a) em placa de Petri b) armazenamento dos esporos c) adição à água de amassamento d) aplicação à mistura cimentícia



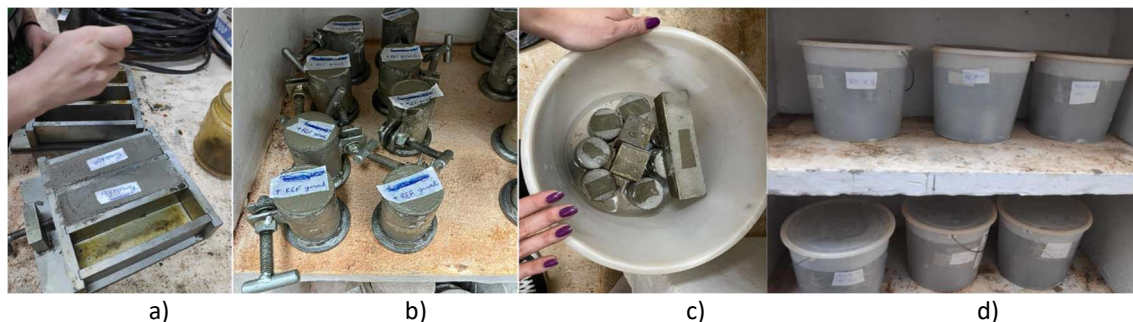
As amostras moldadas foram submetidas às condições de cura submersa ou envolta em manta geotêxtil, sendo removidas destes ambientes somente nas datas estipuladas para inspeção visual e outros ensaios (figura 2).



1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

Figura 2: produção das amostras a e b) moldagem c e d) cura.

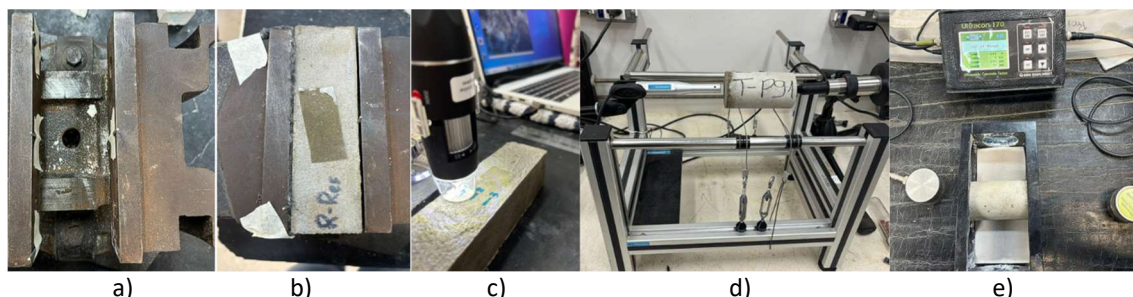


Fonte: Autores, 2025.

Semanalmente fazia-se a substituição da água de imersão das amostras de modo a simular as condições de renovação natural de água, que ocorrem em situações reais. Para as amostras envoltas em manta geotêxtil, uma vez na semana fazia-se a aspersão de água na envoltória, a fim de manter a amostra constantemente úmida.

Para abertura de fissuras nas amostras prismáticas, definiu-se um protocolo de fissuração com aplicação manual de carga, visto que as argamassas apresentam baixa resistência à tração, apresentando ruptura frágil. Para tal, utilizou-se de uma morsa e uma haste de arame, a fim de promover a fissura no centro da amostra (figura 3 a e b).

Figura 3: amostras a e b) abertura das fissuras c) análise visual d) TEI e) ultrassom



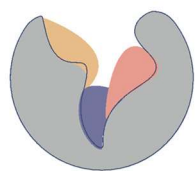
Fonte: Autores, 2025.

O processo de abertura de fissuras ocorreu sete dias após a produção das amostras de argamassas, que após leitura da abertura inicial da fissura (figura 3 c) retornavam à condição de cura (tabela 1).

2.3 Controle tecnológico e avaliação da autocicatrização

Para o controle tecnológico e de fissuras, foram confeccionadas 57 amostras, sendo 42 amostras íntegras (cilíndricas de 5x10 cm) e 15 fissuradas (prismáticas de 4x4x16 cm). Realizou-se ensaio de resistência à compressão axial e de velocidade de pulso por onda ultrassônica para as amostras íntegras, nas idades 28 e 63 dias. Para as amostras fissuradas fez-se medição de abertura de fissuras em estereomicroscópio, e avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica nas idades 7, 14 e 56 dias. O ensaio de ultrassom foi realizado pela transmissão direta (transdutores em faces opostas), com emprego de elemento

RAZENTE, Tamires Souza; FONTANA, Pamela Letícia dos Santos Bez; SILVA, Renato Henrique. POSSAN, Edna. **Autocicatrização de materiais à base de cimento devido à bioprecipitação de CaCO_3 : efeito da cura e do tipo de bactéria.** SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025.

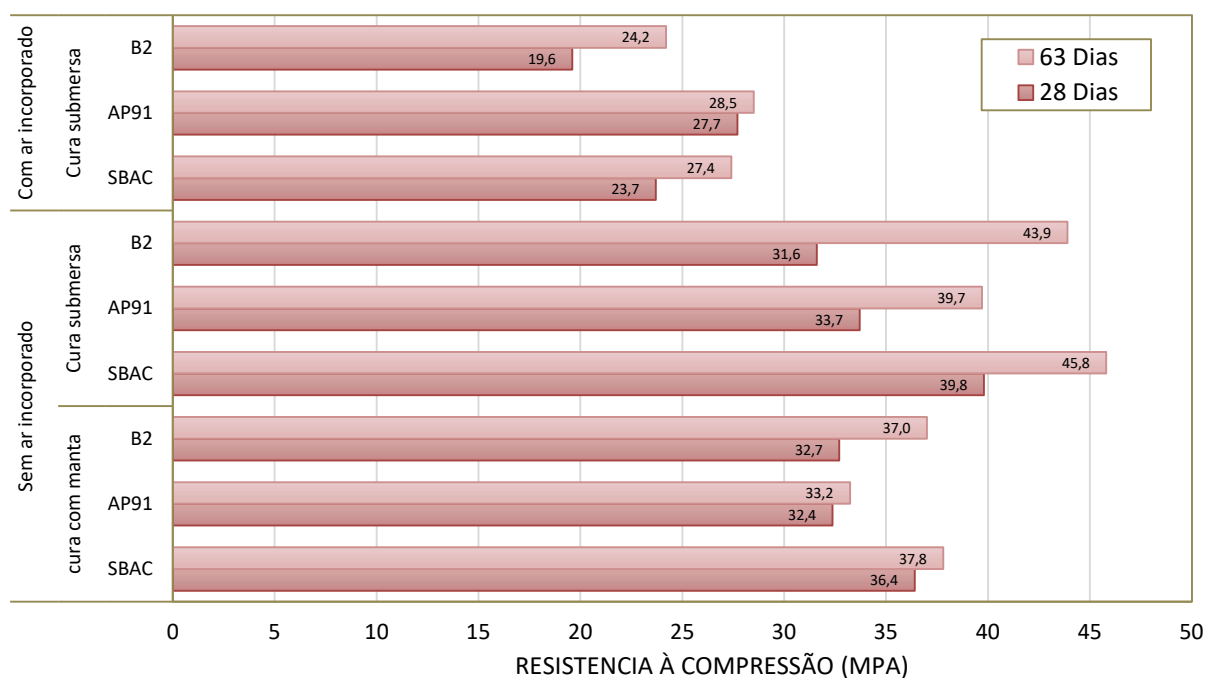


acomplante, junto no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA), de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para amostras íntegras, tem-se que a resistência à compressão aos 28 e 63 dias e a velocidade de propagação de onda ultrassônica (figuras 4 e 5), são afetadas pela presença de ar incorporado, tipo de cura e presença e tipo de bactéria. As amostras com ar incorporado apresentaram redução de até 38% na resistência à compressão aos 32 dias e 25% aos 63 dias. A cura com manta geotêxtil também causou redução na resistência à compressão das amostras, porém em menor escala que o ar incorporado, com redução média de 3,6% aos 63 dias. Verificou-se que a linhagem de bactérias altera os valores de resistência. As amostras sem adição de bactérias e ar obteve maior valor de resistência em consonância ao relatado por Xu e Wang (2018).

Figura 4: Resistência à compressão axial aos 28 e 63 dias em amostras íntegras.



Fonte: Autores, 2025.

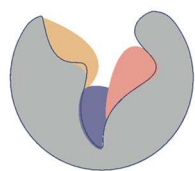
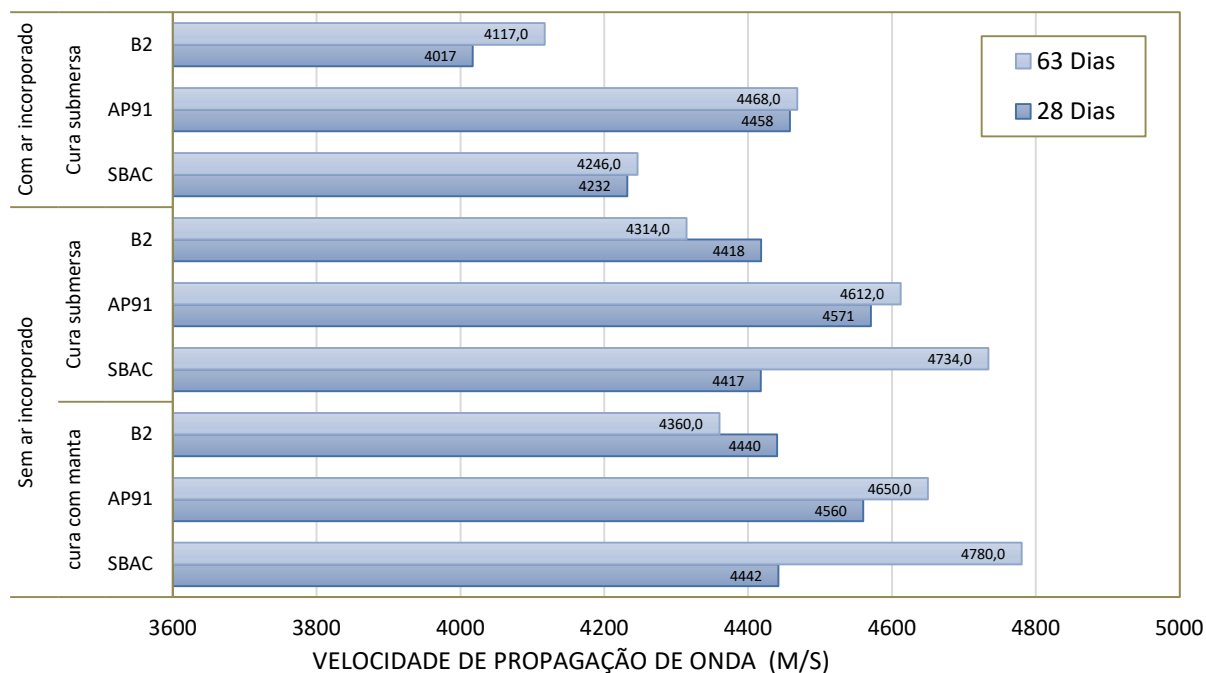


Figura 5: Velocidade de Onda Ultrassônica em amostras íntegras.



Fonte: Autores, 2025.

A Velocidade de propagação de pulso dada pelo tempo em que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova, sendo maior quanto maior a homogeneidade do corpo de prova. Constata-se que as amostras com ar incorporado apresentam velocidade de propagação de ondas ultrassônicas ligeiramente menor que as amostras sem ar incorporado, fato associado à qualidade da matriz cimentícia que apresenta maior porosidade com efeitos indesejáveis na resistência à compressão conforme figura 4. Contudo, para a mistura com a bactéria AP91 os resultados de propagação de ondas das amostras com ar incorporado foram mais elevados que outras composições do estudo sem ar incorporado, indicando que esse agente biológico pode ter atuado na densificação da matriz.

As leituras das amostras fissuradas (prismáticas 4x4x16 cm) ocorreram nas idades 7, 14, 28 e 63 dias após a moldagem dos corpos de prova. Na figura 6 são apresentadas imagens obtidas na região da fissura de três trechos localizados na região central de uma das amostras fissuradas (grids 1, 2 e 3). Constata-se que a abertura da fissura, nas três regiões de análise, foi sendo reduzida com o passar do tempo, indicando um processo de autocicatrização.

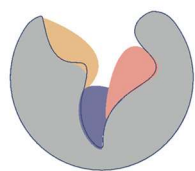
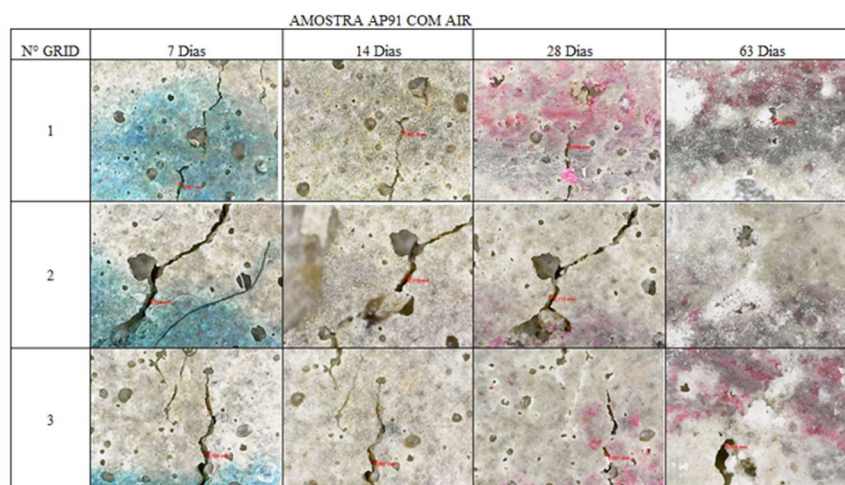


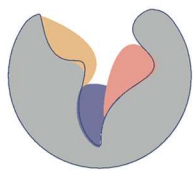
Figura 6: Fechamento das fissuras longo do tempo (bactéria AP91, cura submersa).



Fonte: Autores, 2025.

Além da fissura, alguns poros da amostra também foram totais ou parcialmente colmatados. Esse processo é decorrente da autocicatrização autóloga, devido à hidratação dos materiais a base de cimento assim como da autocicatrização autônoma conduzida pelos agentes adicionados à matriz. Segundo Jonkers e Schlangen (2008), a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) é potencializada pelos agentes biológicos adicionados à matriz. Ghellere et al., (2025) destacam que nas primeiras idades de análise tem-se certa dificuldade de visualização dos carbonatos formados no processo, mas com o passar do tempo, mais cristais são formados e depositados na região da fissura, conduzindo ao fechamento ou redução de sua abertura. Durante a análise do fechamento das fissuras, verificou-se que as larguras iniciais — tanto máximas quanto mínimas — influenciaram significativamente o processo de biorecuperação. Amostras com fissuras de abertura reduzida (inferiores a 0,5 mm) apresentaram melhores resultados de autocicatrização no período avaliado. As fissuras geradas nas amostras apresentaram variações de espessura entre 0,05 mm e 0,8 mm, o que reflete a dificuldade em obter fissuras de dimensões homogêneas durante o ensaio de indução de fissuração. Para reduzir a variabilidade nas larguras das fissuras, Hollmann (2020) recomenda a geração de um número elevado de amostras, possibilitando, posteriormente, a seleção daquelas que possuam fissuras com características dimensionais semelhantes.

As amostras fissuradas com incorporador de ar apresentaram resultados próximos aos de referência, indicando que a compensação dos vazios com o fechamento das fissuras foi eficaz. A precipitação de carbonatos na região da fissura das amostras de referência (sem bactéria) sugere que a recuperação pode ser atribuída tanto à cicatrização autônoma promovida pelas bactérias quanto à cicatrização autóloga resultante dos produtos de hidratação da matriz cimentícia.



4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais conduzidos, conclui-se que:

- a incorporação de agentes biológicos precipitadores de CaCO_3 à matriz cimentícia demonstra um potencial promissor para a autocicatrização de fissuras;
- a adição de bactérias à água de mistura, especialmente em amostras sob cura submersa, resultou em um maior potencial de recuperação de fissuras, devido ao ambiente favorável para o desempenho bacteriano;
- a linhagem bacteriana B2 conferiu resultados de resistência à compressão mais elevados em comparação com a AP91, enquanto a AP91 apresentou uma maior capacidade de autocicatrização, especialmente em amostras com ar incorporado;
- a presença de ar incorporado, embora tenha reduzido a velocidade de pulso e a resistência à compressão, contribuiu positivamente para a recuperação de fissuras.

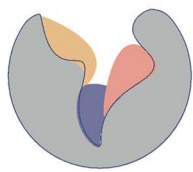
A tecnologia de incorporação de agentes biológicos na matriz cimentícia mostra-se promissora para aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto. No entanto, é necessário avançar nos estudos sobre tecnologias e procedimentos, incluindo a forma de incorporação das bactérias, sua alimentação e comportamento em diferentes ambientes, para desenvolver protocolos confiáveis e replicáveis que possam ser aplicados em obras mais resilientes e sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

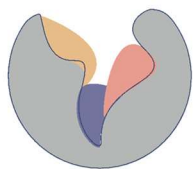
Agradecemos à Fundação Araucária pelo fomento à pesquisa e concessão de bolsa à primeira autora. Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica para o segundo e terceiro autor. Ao Dr. Michel Passarini e à Suzana Lotero pela valiosa contribuição com o preparo das bactérias.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
2. CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 2018. 295 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
3. Ghellere, _P., LENZ, S.K., PASSARINI, M. R. Z., POSSAN, E. Evaluation of different biological agents and application methods on the cracks self-healing in cement-based matrices. *Journal of Building Pathology And Rehabilitation*, v. 10, p. 1/87-13, 2025.
4. GHELLERE, P.; LENZ, S. K.; PASSARINI, M. R. Z.; POSSAN, E. Evaluation of different biological agents and application methods on the cracks self-healing in cement-based matrices. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2025.



5. GHELLERE, Polyana. **Seleção e avaliação de bactérias produtoras de caco3 na recuperação de fissuras dos materiais a base de cimento**. 2021. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.
6. HOLLMANN, C. F. **Avaliação da influência de aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.
7. JONKERS, H.M., SCHLANGEN, E. **Development of a bacteria-based self-healing concrete**, Proc. Int. FIB Symp. 2008 - Tailor Made Concr. Struct. New Solut. Our Soc, 425–430, 2008.
8. LENZ, S.K., POSSAN, E., PASSARINI, M.R.Z. GHELLERE, P. Influence of different bacterial strains on cracks self-healing in cement-based matrices with and without incorporated air. **J Build Rehabil** 8, 61 (2023).
9. LENZ, Sheila Karine. **Influência de diferentes linhagens bacterianas e nutrientes na autocicatrização de matrizes a base de cimento com e sem ar incorporado**. 2022. 168 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.
10. PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autorregeneração e autocicatrização do concreto**. 2020. 367 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.
11. ROIG-FLORES, M.; FORMAGINI, S.; SERNA. P. Self-healing concrete-What Is it Good For? **Materiales de Construcción**, Vol. 71, Issue 341, 2021.
12. SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. Effect of the addition of metakaolin on the carbonation of Portland cement concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 1, p. 1–18, fev. 2020.
13. TITTELBOOM, V., DE BELIE, K, N. Self-healing in cementitious materials - A Review. **Materials**, 6:2182–2217, 2023.
14. WONG, P. Y.; Mal, j.; Sandak, A.; Luo, L.; Jian,J.; Pradhan, N. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions, **Science of The Total Environment**, v. 947, 2024.
15. ZHANG, J. et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 610-617, set. 2017.
16. ZHANG, W. et al. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. **Composites Part B: Engineering**, v. 189, p. 107892.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS POR ENCAPSULAÇÃO DE BACTÉRIA EM AGREGADO LEVE

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.3>

Tiago Morilha Basso

Email: tiagomobasso@gmail.com

Bruna Carolina Gonçalves

Email: carolina.bgon@gmail.com

Nicole Schwantes-Cezario

Email: nicoleschwantes@uel.br

RESUMO

Esta pesquisa avalia a bioprecipitação de CaCO_3 em fissuras através da encapsulação da bactéria *Bacillus subtilis* CV16 em perlita expandida. Para isso, elaborou-se argamassas com diferentes concentrações de esporos, contudo, manteve-se igual o traço, relação a/c, a proporção de perlita expandida e adição de lactato de cálcio. Para conferir alterações nas propriedades, realizaram-se os ensaios de índice de consistência, massa específica, absorção de água, índice de vazios e análise visual de fechamento de fissuras em lupa. Como resultado, observou-se autocicatrização em diferentes taxas (de 46 a 67%) e nenhuma interferência significativa na absorção e índice de vazios (valores próximos à 10 e 19%, respectivamente).

Palavras-chaves: Autocicatrização, bactérias, encapsulação, perlita expandida.

ABSTRACT

This research evaluates the bioprecipitation of CaCO_3 in cracks through *Bacillus subtilis* CV16 bacteria encapsulation in expanded perlite. To this end, mortars were prepared with different concentrations of spores, while maintaining the same mixture ratio, water-to-cement ratio, proportion of expanded perlite and addition of calcium lactate. To analyze changes in properties, consistency index, weight density, water absorption, void ratio and visual analysis of crack healing under a magnifying lens were conducted. As a result, self-healing was observed at different rates (between 46 e 67%), with no significant interference in water absorption and void index (values close to 10 and 19%, respectively).

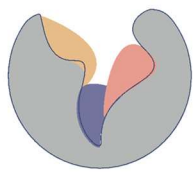
Palavras-chaves: Self-healing, bacteria, encapsulation, expanded perlite.

BASSO, Tiago Morilha; GONÇALVES, Bruna Carolina. SCHWANTES-CEZARIO, Nicole.

Autocicatrização de materiais cimentícios por encapsulação de bactéria em agregado leve.

SIBRACIC - 1° SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre

– RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025.



1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material manufaturado mais utilizado em todo o mundo^[1]. Além disso, estima-se que a produção global aumentará aproximadamente 12% a 23% até 2050, quando comparado à produção atual^[2].

Somado à esta perspectiva de crescimento, é notável que a indústria cimentícia global causa impactos ambientais severos, visto que este segmento industrial é responsável por 8% das emissões globais de gás carbônico^[3].

Porém, é possível diminuir a utilização de cimento procurando maior durabilidade e menor degeneração das estruturas. A deterioração do concreto armado com o tempo se dá principalmente pela corrosão das armaduras, normalmente ocasionada por fissuras que permitem o contato direto do aço com a água e gás carbônico^[4].

Alternativas para a solução do problema são necessários, visto que o consumo de cimento com o reparo de estruturas é alto, mas inevitável quando as manifestações patológicas aparecem. Uma alternativa encontrada é adicionar bactérias que fazem a bioprecipitação de carbonato de cálcio em materiais cimentícios e promovem o fechamento de fissuras, acentuando ganhos em durabilidade^[5].

Por sua vez, a bactéria de caverna denominada *Bacillus subtilis* “CV16” apresenta elevada taxa de bioprecipitação, inclusive superior a cepas utilizadas em pesquisas internacionais^[6]. Isso porque as bactérias isoladas de caverna se adaptaram à abundância de cálcio presentes nos locais em que se originaram e apresentam maior potencial de autocicatrização^[7].

Porém, até então a *Bacillus subtilis* “CV16” foi inserida na água de amassamento do concreto, método que pode inviabilizar parte dos esporos adicionados devido características desfavoráveis da matriz cimentícia, como o pH e tensões internas. Ao adicionar deste modo, os esporos conseguem sobreviver até 4 meses, porém, ao encapsular os esporos em agregado poroso, podem perdurar até 200 anos^[8].

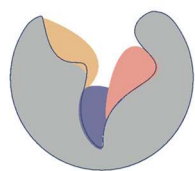
Neste procedimento, o agente autocicatrizante é imobilizado em agregado poroso anteriormente à adição durante a mistura. Quando o agregado se rompe e entra em contato com água ou o ar, os esporos germinam, iniciam sua atividade metabólica e, consequentemente, a autocicatrização^[5].

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a autocicatrização de fissuras de compósitos cimentícios frente a adição de bactéria isolada de caverna encapsulada em agregado leve através da análise de fechamento de fissuras em lupa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados para elaboração das argamassas foram os esporos de *B. subtilis* CV16, originalmente isolados da Caverna Pedra da Cachoeira por professores da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa); cimento CP V – ARI, escolhido por apresentar maior percentual de óxido de cálcio (CaO) em sua composição; perlita expandida (PE), pois a



elevada porosidade e absorção de água permitem uma adequada encapsulação de esporos bacterianos^[9] (massa específica de 295,87kg/m³ e dimensão máxima característica de 4,75mm); areia quartzosa natural (massa específica de 2663,12 kg/m³ e dimensão máxima característica de 2,36mm) e água potável.

2.2 Caracterização das argamassas

Foram elaboradas três argamassas com características diferentes: A_0, A_6 e A_7. O que varia é a concentração de esporos, sendo que a argamassa de referência (A_0) não possui adição bacteriana, A_6 possui 5,4×10⁶ esporos/g de cimento^[6] e A_7 segue a concentração de 1,8×10⁷ esporos/g de cimento^[9].

Porém, em todas o traço das argamassas foi de 1:3 (cimento : agregados miúdos), em que a PE substituiu 20% do volume da areia quartzosa^{[8][9]}. Por sua vez, a relação água-cimento utilizada foi fixada em 0,54 e foi adicionado como de fonte de cálcio o lactato de cálcio em 3% da massa de cimento^[6].

Além disso, realizou-se um ensaio não normatizado a fim de se obter o valor da absorção de água da PE quando submetida à vácuo, com objetivo de avaliar a absorção de água na mesma condição em que seria feita a encapsulação. Este ensaio será explicado na Seção 4 e através dele descobriu-se que a PE possui absorção de 331,86%, conseguindo determinar o volume da solução. A Tabela 1 sintetiza a quantidade de material utilizada para cada metro cúbico de argamassa.

Tabela 1 – Consumo por m³ de argamassa

	A_0	A_6	A_7
Cimento (kg/m ³)	530,2	530,2	530,2
Areia (kg/m ³)	1272,5	1272,5	1272,5
Perlita Expandida (kg/m ³)	19,5	19,5	19,5
Água (a/c) (L/m ³)	286,3	286,3	286,3
Solução Imobilizada (L/m ³)	75,58	75,58	75,58
Lactato de cálcio (g/m ³)	15,91	15,91	15,91
Esporos (10 ⁹ unidades/m ³)	0,00	3,129	43,46

2.3 Preparação dos esporos para aplicação nos materiais cimentícios

Foi preparado o meio de cultura DSM (*Difco Sporulation Medium*) composto por 3g/l de extrato de carne, 5g/l de peptona, 1g/l de cloreto de potássio (KCl) e 0,49g/l de sulfato de magnésio (MgSO₄.7H₂O). O meio foi utilizado na concentração 1x para os crescimentos das cepas e 2x para a produção de esporos^[10].

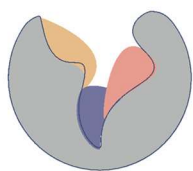
A cepa foi crescida em ágar nutriente e uma colônia foi inoculada em um Erlenmeyer contendo 50mL de DSM 1x. Logo após, foi feita incubação na temperatura de 37°C e 120rpm durante a noite. No outro dia, 5mL da cultura foi adicionada em um Erlenmeyer contendo 500mL de DSM 2x e incubada a 37°C e 120rpm por 48h.

BASSO, Tiago Morilha; GONÇALVES, Bruna Carolina. SCHWANTES-CEZARIO, Nicole.

Autocicatrização de materiais cimentícios por encapsulação de bactéria em agregado leve.

SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre

– RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025.



Depois da incubação, foi realizada uma centrifugação a 3000xg (3000 vezes maior que a força da gravidade) por 20min, em seguida o sobrenadante foi descartado e o pellet foi lavado com água destilada autoclavada. Então foi realizada uma nova centrifugação a 3000xg por 20min, o sobrenadante foi descartado e o pellet foi ressuspensionado em 50mL de água destilada autoclavada. Logo após, o material foi congelado a fim de obter apenas os endósporos após a morte das células germinativas.

Realizou-se, então, a estimativa da concentração de esporos liofilizados por meio de diluição e plaqueamento em ágar. Para a diluição seriada, foram adicionados 100µL da solução obtida em 900µL de solução salina 0,85% esterilizada, realizando a diluição seriada até a diluição -8.

Durante as três últimas diluições foram plaqueados em ágar nutriente com a ajuda de uma alça Drigalski. As placas foram incubadas a 37°C por 18h para contagem das colônias, resultando em solução de 50mL de concentração aproximada de $7,3 \times 10^9$ de endósporos. Sabendo o volume necessário para cada solução encapsulada, foi possível obter a concentração desejada por meio de cálculos de diluição de concentrações.

2.4 Encapsulação da solução na PE e produção das argamassas

Após a obtenção das soluções contendo os esporos, adicionou-se a ela o lactato de cálcio em 3% da massa de cimento. O procedimento escolhido foi a encapsulação com o auxílio de vácuo^[11]. Primeiro, a PE foi seca a 60 °C por três dias e depois mantida dentro da estufa desligada. Em seguida, a PE foi colocada em uma câmara acrílica pressurizada por bomba à vácuo de 75 kPa, devidamente selada.

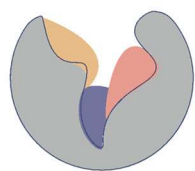
Após colocada a PE no recipiente, ele foi pressurizado por uma hora. Apenas após esse período o registro foi aberto, a solução entrou na câmara e a partir deste momento contou-se mais 30 minutos, assegurando que o nível do líquido estivesse no mínimo 2 centímetros acima do nível dos agregados^[11].

Passada 1h30min de experimento, a PE foi seca dentro da estufa desligada e o período que ela ficou secando variou de acordo com as datas de execução de ensaio. Não foi possível padronizar esse período porque não era realizável moldar mais de uma argamassa em um dia e o uso do laboratório era compartilhado. A argamassa A_0 secou por 4 dias, A_6 por 3 dias e A_7 por 6 dias.

As argamassas foram produzidas em misturador mecânico planetário, em seguida foram submetidas a ensaios no estado fresco e os corpos de prova foram moldados para a realização dos demais ensaios.

2.5 Cura e condição de exposição

A cura inicial foi realizada em submersão dos corpos de prova em água saturada de cal até a idade de 7 dias NBR 5739 (2018)^[12] e NBR 7215 (2019)^[13]. Logo após os 7 dias de cura, os corpos de prova prismáticos foram fissurados por meio do ensaio de flexão em três pontos^{[6][14]}.



Então foram submetidos à condição de exposição durante todo o período até a finalização dos ensaios. Sabe-se que a condição de ciclos úmidos e secos alternados é a que promove maior autocicatrização bacteriana^{[15][16]}, portanto todos os corpos de prova foram submetidos à submersão por 12 horas em água potável seguida de 12 horas de ciclo seco.

2.6 Ensaios executados

A argamassa, ainda em estado fresco, foi ensaiada quanto ao seu índice de consistência^[17] e massa específica^[18]. Por outro lado, após passarem pela cura e condição de exposição, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de absorção de água e índice de vazios^[19] e análise visual das fissuras em lupa Leica com auxílio do *software* LAZ^[6]. A Tabela 2 apresenta as informações detalhadas dos experimentos.

Tabela 2 – Ensaios executados

Ensaios no estado fresco		Norma		
Índice de consistência		ABNT NBR 13276 (2016)		
Massa Específica		ABNT NBR 9833 (2008)		
Ensaios no estado endurecido	Idades de ensaio (dias)	Corpos de prova (mm)	Nº de corpos de prova	Norma ou Equipamento
Absorção de água e índice de vazios	28	50 × 100	9	NBR 9778 (2009)
Análise visual em lupa	7, 21, 28 e 35	40 × 40 × 160	12	Lupa Leica

É importante destacar que as fissuras foram medidas a partir de fotos obtidas com a lupa Leica. Nas amostras, foi demarcada a escala com uma régua e com base nesta, foi possível determinar a barra de escala e, a partir dela, realizar as medições das fissuras com precisão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

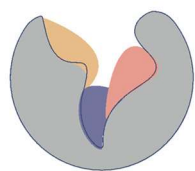
3.1 Ensaios no estado fresco

Os resultados dos ensaios de índice de consistência e massa específica, realizados por procedimentos normativos, estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios no estado fresco

Argamassa	Massa Específica (g/cm³)	Índice de Consistência Médio (mm)
A_0	2,12	208
A_6	2,07	277
A_7	2,1	211

É possível observar que argamassa A_6 obteve um valor divergente das demais, 33,2% maior que o da A_0. Isso pode ter acontecido porque o período de secagem da PE após a



encapsulação variou, logo a evaporação da água que compunha a solução com esporos e lactato de cálcio aconteceu em proporções diferentes entre as argamassas.

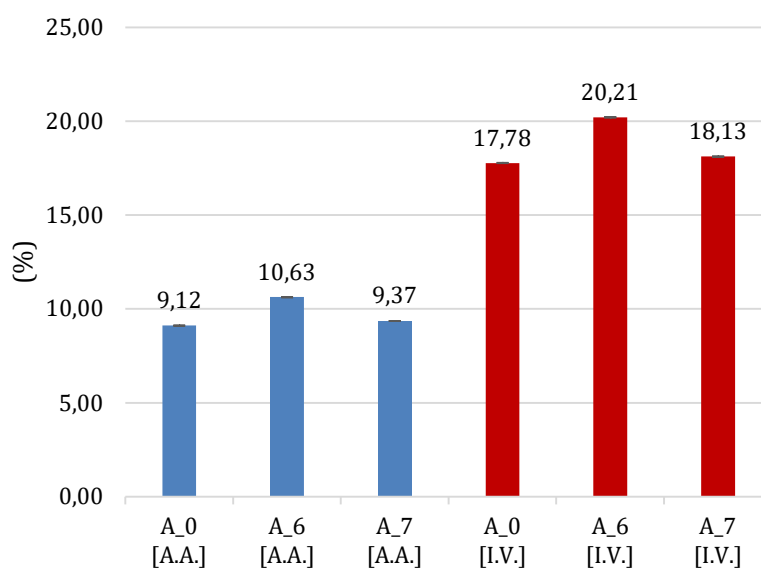
Ademais, mesmo com a PE sendo armazenada dentro da estufa desligada, ela ficou suscetível à umidade relativa do ambiente, o que ocasionou em mudanças de textura, possíveis de serem notadas apenas qualitativamente pelo tato.

Estes são possíveis indicativos de que, para a argamassa A_6, a PE ainda poderia ter água absorvida durante a mistura, provavelmente alterando a relação água/cimento da argamassa e ocasionando em um índice de consistência maior.

3.2 Absorção de água e índice de vazios

Os dados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água e índice de vazios foram plotados em gráfico e explicitados na Figura 1.

Figura 1 – Absorção de água [A.A.] e índice de vazios [I.V.] das argamassas, sendo A_0 sem adição dos esporos bacterianos, e A_6 e A_7 com adição de aproximadamente 10^6 e 10^7 esporos/g de cimento

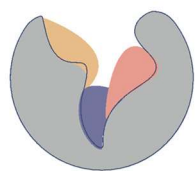


Fonte: Os autores

Além disso, foi realizado também o Teste Tukey para os valores obtidos.

Tabela 4 – Teste Tukey para absorção de água e índice de vazios

Tratamentos	Grupo estatístico
A_0	a
A_6	b
A_7	a



Como é possível observar no Teste Tukey, os valores de absorção de água e índice de vazio das argamassas A_0 e A_7 não apresentam diferença estatística entre si. Porém, a A_6 se diferencia das demais obtendo valores maiores para ambos. Isso acontece provavelmente porque a relação água/cimento de A_6 é maior que as demais, conforme apresentado anteriormente. Este fator levaria a um aumento do número de vazios e consequentemente, aumentaria também a absorção de água^[3].

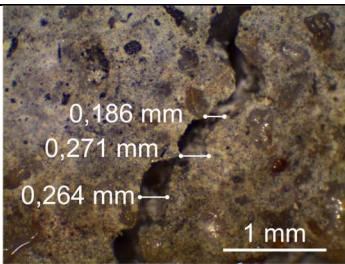
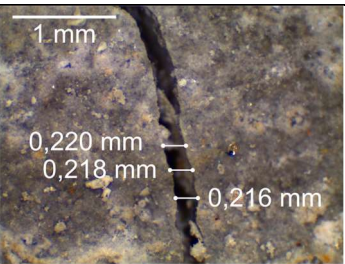
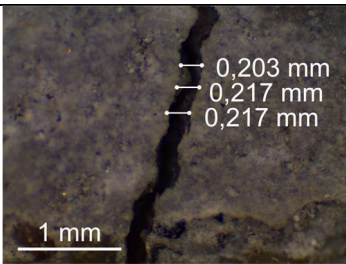
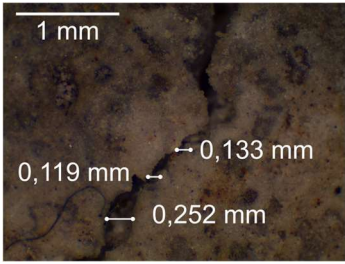
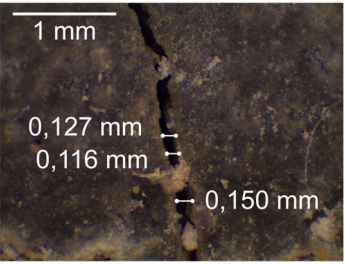
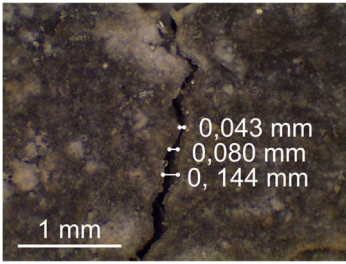
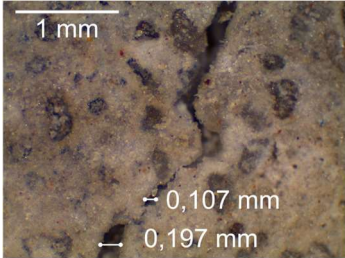
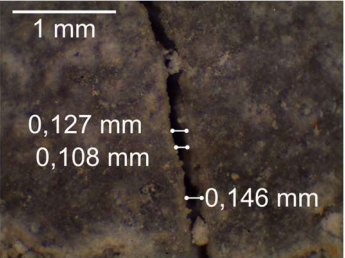
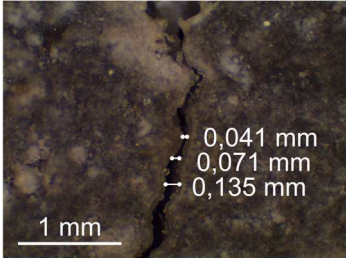
Indo de encontro com os resultados obtidos, pesquisadores também afirmaram anteriormente que a absorção de água e índice de vazio das amostras contendo adição bacteriana foi aproximadamente igual as amostras sem bactérias ao seguir o procedimento normativo^[20].

3.3 Análise de autocicatrização em lupa

Para realizar a análise qualitativa de fechamento de fissuras, foi selecionado um corpo de prova de cada argamassa baseado naqueles com espessura de fissura mais próximo. A Tabela 5 apresenta imagens da evolução no tempo das fissuras selecionadas da face superior de cada argamassa.

Tabela 5 – Imagens de lupa da face superior

(continua)

Idade (dias)	A_0	A_6	A_7
7			
21			
28			

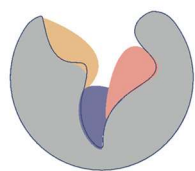
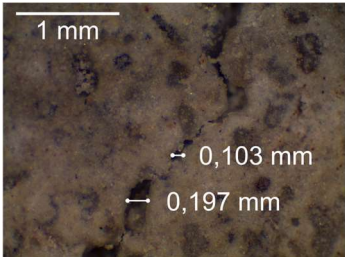
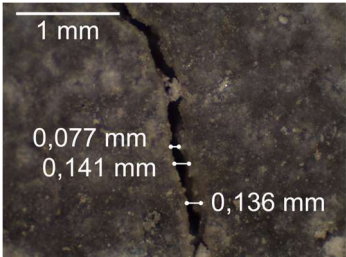
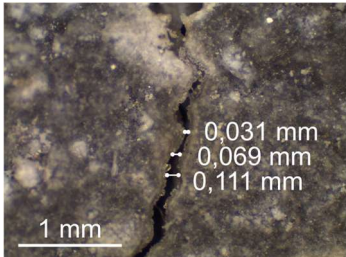


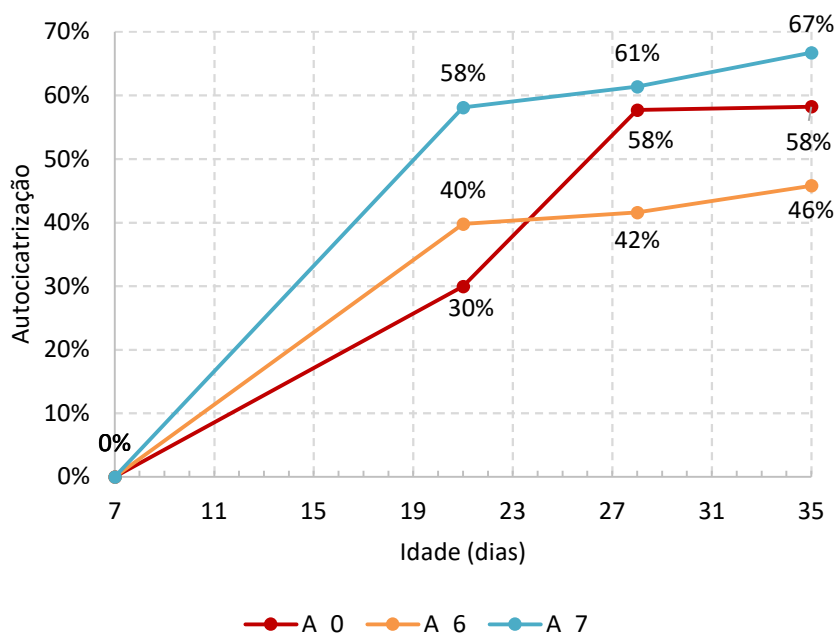
Tabela 6 – Imagens de lupa da face superior

(conclusão)

Idade (dias)	A_0	A_6	A_7
35			

A autocicatrização foi calculada por fórmula consolidada na literatura^[21] e seus valores foram sintetizados na Figura 2.

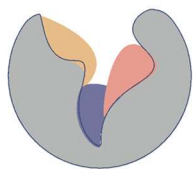
Figura 2 – Taxas de autocicatrização da face superior da argamassa sem adição dos esporos bacterianos (A_0), com adição de 10^6 (A_6) e 10^7 (A_7) esporos/g de cimento



Fonte: Os autores

Foi possível verificar autocicatrização também na argamassa A_0, sendo que um dos prováveis motivos é a hidratação de partículas que previamente não foram hidratadas, ocasionando a formação de cristais nos bordos das fissuras^[8].

Ademais, a argamassa A_7 foi a que obteve um melhor desempenho; a inclinação da reta entre as idades de 28 e 35 dias indicam que a taxa de autocicatrização se mantém maior com o tempo em A_7 e A_6 do que A_0 (que teve estabilidade no período) e aos 28 dias, é possível



perceber que a autocicatrização de A_6 se torna inferior às demais. Esse é mais um fator que corrobora com a informação de que a relação água/cimento nessa argamassa é maior que as demais, possivelmente indicando que havia menos partículas de cimento não hidratado na matriz cimentícia.

À título de comparação, pesquisadores obtiveram resultados variados quanto à argamassa de referência, podendo essa ter deposição parcial de cristais^[9] ou não^[22]. O consenso é que a adição de esporos encapsulados em PE potencializa o fechamento de fissuras^[9,22]. Além disso, os cristais precipitados, foram observados principalmente na parede da fissura e tinham aspecto opaco e esbranquiçado, o que corrobora com o apresentado na literatura^[6, 23]. De acordo com Yan et al., (2024)^[24], a medida que o tempo de cura aumenta, a superfície das fissuras é gradualmente preenchida com os cristais, que crescem e se tornam densos com o tempo.

4. CONCLUSÕES

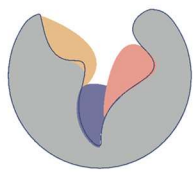
A eficiência do fechamento de fissuras a partir da bioprecipitação é mais conhecida nos métodos de adição bacteriana na água de amassamento do que utilizando o agregado-cápsula. A partir das delimitações dessa pesquisa, é possível concluir que a perlita expandida (PE) é um agregado de alta absorção de água em métodos que utilizam pressão negativa para realizar a encapsulação da solução com esporos e fonte de cálcio. Porém, este alto índice de absorção deixa a PE muito suscetível à umidade relativa do ar, o que necessita de controle assíduo principalmente durante o período de secagem após a encapsulação. Nesta pesquisa, este fator aumentou a relação água/cimento na argamassa A_6 se comparada com as demais, interferindo nos resultados obtidos.

No que tange a autocicatrização, ao analisar as fissuras da face superior de espessura inicial média de 0,240 mm de A_0 (sem adição de esporos); 0,218 mm de A_6 (com adição de $5,4 \times 10^6$ esporos/g de cimento) e 0,212 mm de A_7 (com adição de $1,8 \times 10^7$ esporos/g de cimento), conclui-se que:

- A_7 atingiu maior taxa de autocicatrização;
- A_7 e A_6 obtiveram maior fechamento de fissura entre 28 e 35 dias e
- A_6 possuiu o pior desempenho de autocicatrização devido os percalços na execução da argamassa.

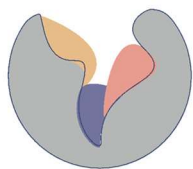
Porém, mais estudos precisam ser feitos para comprovar que esse aumento da autocicatrização realmente foi ocasionado apenas pela ação bacteriana, principalmente porque as fissuras são de espessura muito pequenas e foram comparadas espessuras muito variadas, devido à dificuldade em padronizar a indução de fissuras.

Por fim, a adição de esporos encapsulados não interferiu na absorção de água e índice de vazios das argamassas. Estatisticamente, A_0 e A_7 obtiveram valores semelhantes. No entanto, A_6 se diferenciou das demais principalmente devido à relação água/cimento.

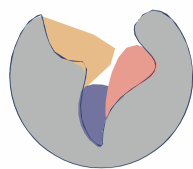


REFERÊNCIAS

1. PAVLU, T.; KOCÍ, V.; HÁJEK, P. **Environmental assessment of two use cycles of recycled aggregate concrete**. Sustainability (Switzerland), v. 11, n. 21, 1 nov. 2019.
2. JUNIANTO, I.; SUNARDI; SUMIARSA, D. **The Possibility of Achieving Zero CO2 Emission in the Indonesian Cement Industry by 2050: A Stakeholder System Dynamic Perspective**. Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 7, 1 abr. 2023.
3. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 4. ed. 2005.
4. ANDRADE, C. et al. RILEM TC 154-EMC: **“Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion” Recommendations Half-cell potential measurements-Potential mapping on reinforced concrete structures**. B. Elsener, Materials and Structures / Matériaux et Constructions.
5. ALTHOEY, F. et al. **Physical, strength, durability and microstructural analysis of self-healing concrete: A systematic review**. Case Studies in Construction Materials, v. 18, 1 jul. 2023.
6. SCHWANTES-CEZARIO, N. **Influência da adição de bactérias isoladas de caverna no fechamento de poros e fissuras em materiais cimentícios**. Tese de Doutorado. Londrina, 2021.
7. BANKS, E. D. et al. **Bacterial calcium carbonate precipitation in cave environments: A function of calcium homeostasis**. Geomicrobiology Journal, v. 27, n. 5, p. 444–454, jul. 2010.
8. SHIVANSHI, S. et al. **A study on bacterial self-healing concrete encapsulated in lightweight expanded clay aggregates**. Materials Today: Proceedings, 2023.
9. ALAZHARI, M. et al. **Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 160, p. 610–619, 30 jan. 2018.
10. MONTEIRO, S. M. et al. **A procedure for high-yield spore production by *Bacillus subtilis***. Biotechnology Progress, v. 21, n. 4, p. 1026–1031, jul. 2005.
11. ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. **Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 124, p. 910–921, 15 out. 2016.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.



14. TAN, L. et al. **Effect of carbonation on bacteria-based self-healing of cementitious composites**. Construction and Building Materials, v. 257, 10 out. 2020.
15. ZHANG, W. et al. **Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review**. Composites Part B: Engineering. Elsevier Ltd, 15 maio 2020.
16. DE BELIE, N. et al. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. Advanced Materials Interfaces**. Wiley-VCH Verlag, 7 set. 2018.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833. **Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
20. SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. **Mortars with the addition of bacterial spores: Evaluation of porosity using different test methods**. Journal of Building Engineering, v. 30, 1 jul. 2020.
21. XIAO, X.; HO, D. S. W.; YANG, E. H. **The use of low alkalinity MgO-SiO₂ formulation to encapsulate bacteria for self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 401, 19 out. 2023.
22. ZHANG, J. et al. **Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete**. Construction and Building Materials, v. 148, p. 610–617, 1 set. 2017.
23. YAN, Y. et al. **The influence of expanded perlite as a bio-carrier on the freeze-thaw properties of self-healing concrete**. Construction and Building Materials, v. 409, 9 nov. 2023.
24. YAN, Y. et al. **Mechanical properties and fros resistance of self-healing concrete based on expanded perlite with different particle size as microbial carrier**. Construction and Building Materials, v. 422, 14 mar. 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO INCORPORADO COM BACTÉRIAS DO GÊNERO BACÍLOS SUBTILIS PARA FINS DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.4>

Samuel Ângelo Santiago

Email: samuelsantiagosant@gmail.com

Edna Alves Oliveira

Email: ednaao@fumec.br

Gláucia Nolasco de Almeida Mello

Email: gnamello@pucminas.br

RESUMO

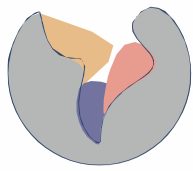
O concreto, propenso à fissuras, é vulnerável a agentes comprometedores da sua integridade estrutural, e o uso de bactérias no concreto para promover a autocura das fissuras tem se destacado mundialmente. Este estudo investiga a aplicação no concreto, para cicatrização de fissuras, de bactérias tipo *Bacillus subtilis* contidas em um probiótico já existente no mercado. Foram testados quatro traços de concreto, com base em estudos anteriores, incorporando uma solução bacteriana em argila expandida, substituindo-se 30% dos agregados graúdos e miúdos. Através das análises visuais foi possível perceber o fechamento parcial de fissura e pela análise microscópica foi evidenciado a presença de (CaCO₃), sugerindo eficácia da técnica.

Palavras-chaves: *Bacilo Subtililis*, autocura, concreto

ABSTRACT

Concrete, prone to cracking, is vulnerable to agents that compromise its structural integrity, and the use of bacteria in concrete to promote self-healing of cracks has gained global attention. This study investigates the application of *Bacillus subtilis*-type bacteria, contained in an existing probiotic product, in concrete for crack healing. Four concrete mixes were tested, based on previous studies, incorporating a bacterial solution in expanded clay, replacing 30% of the coarse and fine aggregates. Visual and microscopic analyses were conducted, which showed, respectively, partial crack closure and the presence of (CaCO₃), suggesting the effectiveness of the technique.

Palavras-chaves: *Bacillus Subtilis*, self-healing, concrete



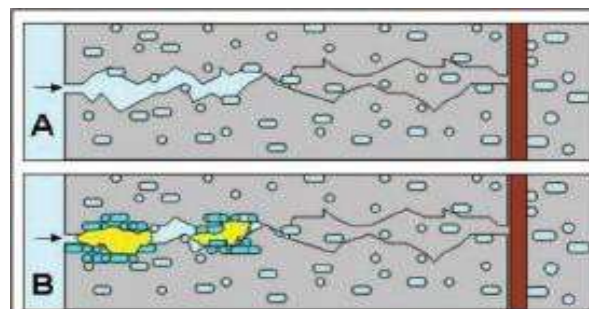
1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo de maior utilização cujo os principais motivos que o tornam um material comumente usado são o seu custo, facilidade de execução e seu ótimo desempenho (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 13)¹. No entanto, o concreto tem uma grande predisposição para formar fissuras. Devido à sua baixa resistência a tração, o concreto pode ser associado ao aço para melhorar o seu comportamento, formando o compósito concreto armado (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 13)¹. Segundo Krishnapriya et al. (2015)², além dessa baixa resistência a tração, o concreto possui outras características indesejáveis que podem comprometer a durabilidade da estrutura como, por exemplo, a alta porosidade e formação de microfissuras.

(THOMAS, 2020)³ destaca que entre os diversos problemas patológicos que uma edificação residencial, comercial ou institucional está sujeita, a trinca é o mais importante, devido há algumas particularidades tais como: o sinal de um possível problema mais sério para a estrutura, interferir no desempenho da obra em serviço e o desconforto psicológico que os usuários podem sofrer por causa da fissuração do edifício.

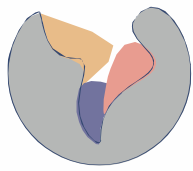
Na auto cicatrização, os esporos bacterianos, ficam inativos na matriz do concreto durante sua vida útil, e caso o concreto fissure, as bactérias poderão ser reativadas com a presença da água. Com esse procedimento, há precipitação do CaCO_3 , o que propicia a vedação das aberturas (JONKERS; SCHLANGEN, 2007)⁴. A Figura , ilustra o esquema da auto cicatrização do bioconcreto. A água penetra nas fissuras estimulando as bactérias presentes na superfície da fissura como ilustrado na parte A, e já em B, as bactérias vedam as fissuras protegendo o aço, representado pela barra marrom.

Figura 1 - Esquema de auto cicatrização em bioconcreto



Fonte: Arnold (2011, p. 41).

As bactérias do tipo *Bacillus subtilis* são bactérias que possuem a forma de bastonetes e são gram-positivas. Naturalmente são encontradas na vegetação e principalmente no solo e se mantém vivas a temperaturas entre 25 a 35 °C. Os *Bacillus subtilis* não são um tipo de bactérias patogênicas e, portanto, podem ser utilizadas para a auto cicatrização do concreto sem prejuízo para a saúde humana (JOSHI; KUMTHEKAR; GHODAKE 2016)⁵. Como o concreto tem como característica um alto pH interno, geralmente trabalha sob alta pressão e é um ambiente escasso de nutrientes, tornando-se hostil para as bactérias comuns, optam-se pelas bactérias *Bacillus subtilis*, que são produtivas e resistentes, permitindo assim SANTIAGO, S. A.; OLIVEIRA, E. A.; MELLO, G. N. de A. **Avaliação da microestrutura do concreto incorporado com bactérias do gênero bacilos subtilis para fins de cicatrização de fissuras.** SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025



sobreviver em condições extremas (PRADEEP et al. 2015)⁶.

Jonkers et al (2010)⁸, testou diversos compostos orgânicos para servirem de nutrientes para as bactérias, visto que após elas serem despertadas as mesmas necessitam de nutrientes para sobreviver e metabolizarem.

Dentre os compostos analisados por Jonkers et al (2010)⁸, o que teve melhor rendimento e melhores resultados referentes a resistência à compressão, foi o lactato de cálcio ($\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$), superando a amostra de controle. O composto $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$, no estado sólido, reage com o oxigênio (O_2) no interior da fissura, produzindo carbonato de cálcio (CaCO_3), no estado sólido, gás carbônico (CO_2) e água (H_2O) (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)⁷. Após essa reação, os produtos se tornam reagentes, o (CO_2) reage com ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na pasta do cimento, formando mais (CaCO_3) sólido e água.

A formação (CaCO_3), como produto da reação do lactato de cálcio com a bactéria *Bacillus subtilis* irá vedar as fissuras num processo químico de dentro para fora (EUZÉBIO; ALVES; FERNANDES, 2017)⁷.

A proposta dessa pesquisa é contribuir com o desenvolvimento na indústria da construção civil, com o objetivo de avaliar a utilização de microrganismos misturados ao concreto para fins de regenerar as fissuras através do método de biosedimentação de carbonato de cálcio por bactérias do tipo *Bacillus Subtilis* oriundas de um probiótico encontrado no mercado incorporadas à matriz cimentícia.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

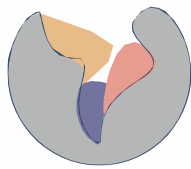
Essa investigação baseou-se nos estudos realizados por Mello e Santiago (2020)⁹ e na metodologia de Mors e Jonkers (2013)¹⁰ para o encapsulamento das bactérias bem como os produtos utilizados (probióticos contendo a bactéria, lactado de cálcio e uréia).

2.1. Produtos contendo bactérias e testes preliminares

De acordo com os estudos realizados por Mors e Jonkers (2013)¹⁰, o ideal seria cultivar as bactérias em laboratório e em seguida utilizá-las no concreto. Seguindo a mesma idéia de Mello e Santiago (2020)⁹, buscou-se no mercado um produto que já continha as bactérias, o probiótico de classe Fungicida Bactericida Microbiológico, com eficiência agrônômica comprovada para o cultivo de alface, cenoura, maçã, morango e uva, à base da bactéria *Bacillus Subtilis* QST 713, na concentração 13,68g/l, chamado Serenade, da fabricante Bayer de Mexico S.A.

2.2 Materiais utilizados

Foram utilizados os seguintes materiais para a realização do trabalho: cimento Portland CPV-ARI; água potável proveniente da rede de distribuição da COPASA de Belo Horizonte; fungicida bactericida microbiológico à base da bactéria *Bacillus subtilis* QST713, na concentração 13,68 g/L com mínimo de 1×10^9 UFC/g (unidade formadora de colônias/grama), denominado comercialmente de Serenade, do fabricante Bayer de Mexico S.A.; uréia – fertilizante mineral simples – natureza física granulada; lactato de cálcio; areia



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

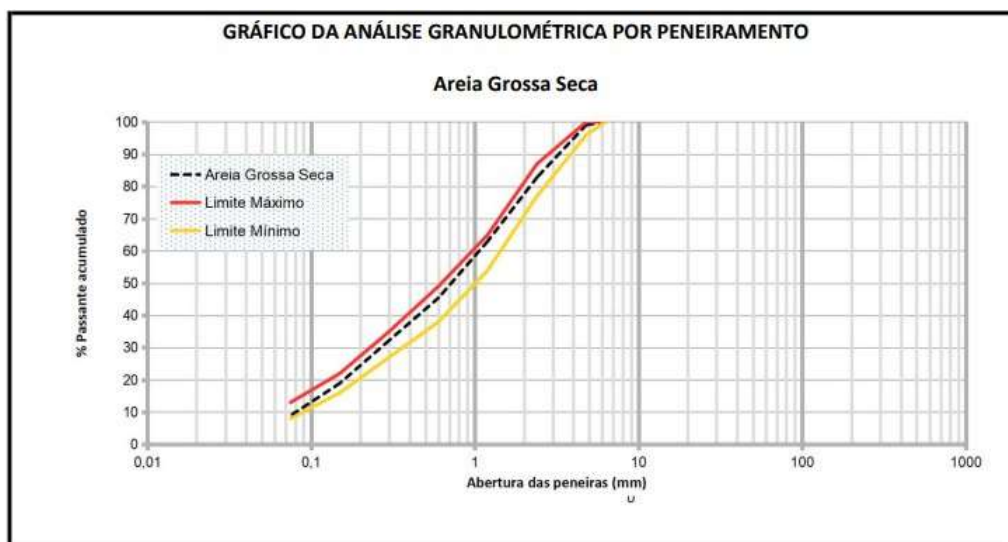
e brita (0) industrializadas e a análise granulométrica foram fornecidas por uma empresa da região. As análises granulométricas da areia e brita foram fornecidas pela indústria e apresentadas pelas Figuras 2 , 3, 4 e 5.

Figura 2 - Caracterização do agregado miúdo

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS									
Dados		Peneiras		Peso Retido	Porcentagem		Faixa de trabalho ML		
Empresa:	Construtora Martins Lanna	Nº	Abertura (mm)	(g)	Retido	Pass. Acum.	Retido Acum.	Abertura (mm)	Limite Máximo
Material:	Areia Grossa Seca	3"	75	0,00	0,00	100,00	0,00	6,3	100
Data coleta/ensaio:	17/10/2022 07:30	2.1/2"	63,5	0,00	0,00	100,00	0,00	4,8	96
Local coleta:	Silo	2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00	2,4	77
Responsável:	Maxwel	1.1/2"	38	0,00	0,00	100,00	0,00	1,2	65
Resultados		1.1/4"	32	0,00	0,00	100,00	0,00	0,6	49
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	2,58	1"	25	0,00	0,00	100,00	0,00	0,3	35
Dimensão Máxima (mm)	4,80	3/4"	19	0,00	0,00	100,00	0,00	0,15	22
Massa Específica (NBR-9776)	2,62	1/2"	12,5	0,00	0,00	100,00	0,00	0,075	13
Massa Unitária Seca (NBR-7251)	1,52	3/8"	9,5	0,00	0,00	100,00	0,00		8
Massa Unitária Úmida (NBR-7251)	1,23	1/4"	6,3	0,00	0,00	100,00	0,00		
Peso do Material Úmido (g)	490,8	4	4,8	0,68	0,91	99,09	0,91		
Peso do Material Seco (g)	483,1	8	2,4	78,62	16,28	82,81	17,19		
Umidade do Material (%)	1,61	16	1,2	95,60	19,79	63,02	36,98		
Material Fino (%)	9,68	30	0,6	85,05	17,61	45,42	54,58		
Impurezas Orgânicas (NBR-7220)	<300ppm	50	0,3	63,65	13,18	32,24	67,76		
Torções de argila (NBR-7216)	0,00	100	0,15	64,17	13,28	18,96	81,04		
Absorção água (NBR-9777)	-	200	0,075	48,50	10,04	8,92	91,08		
		Fundo		46,78	9,68	-0,77	100,77		
		Soma		483,05		-	-		

Fonte: Departamento de Engenharia da empresa Martins Lanna (2022)

Figura 3 - Análise granulométrica da areia por peneiramento



Fonte: Departamento de Engenharia da empresa Martins Lanna (2022)

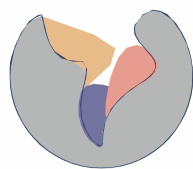
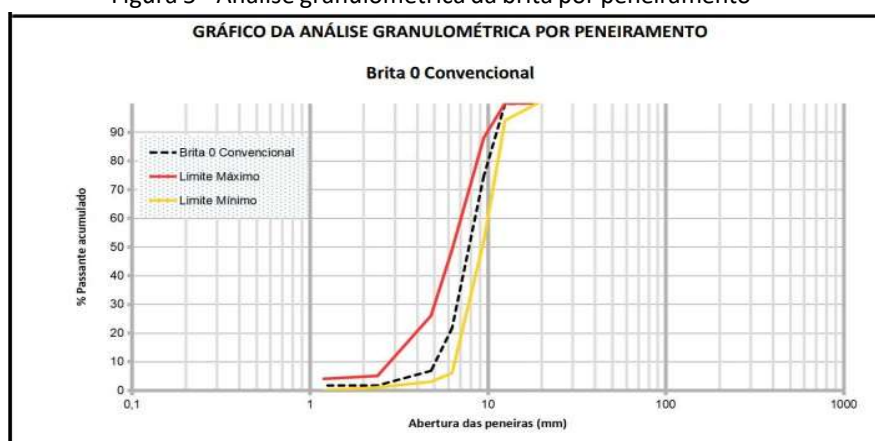


Figura 4 - Caracterização do agregado graúdo

LABORATÓRIO DE CONTROLE DE QUALIDADE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS									
Dados		Peneiras		Peso Retido	Porcentagem		Faixa de trabalho ML		
Empresa:	Construtora Martins Lanna	Nº	Abertura (mm)	(g)	Retido	Pass. Acum.	Retido Acum.	Abertura (mm)	Limite Máximo
Material:	Brita 0 Convencional	3"	75	0,00	0,00	100,00	0,00	19	100
Data coleta/ensaio:	26/10/2022 H: 07:30	2.1/2"	63,5	0,00	0,00	100,00	0,00	12,5	100
Local coleta:	Silo	2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00	9,5	88
Responsável:	Maxwel Mafra	1.1/2"	38	0,00	0,00	100,00	0,00	6,3	49
Resultados		1.1/4"	32	0,00	0,00	100,00	0,00	4,8	26
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,10	1"	25	0,00	0,00	100,00	0,00	2,4	5
Dimensão Máxima (mm)	12,50	3/4"	19	0,00	0,00	100,00	0,00	1,2	4
Massa Específica (NBR-9776)	2,62	1/2"	12,5	2,82	0,18	99,82	0,18		
Massa Unitária Seca (NBR-7251)	1,35	3/8"	9,5	401,28	25,16	74,67	25,33		
Massa Unitária Úmida (NBR-7251)	-	1/4"	6,3	845,28	52,99	21,67	78,33		
Peso do Material Úmido (g)	1598,94	4	4,8	237,64	14,90	6,78	93,22		
Peso do Material Seco (g)	1595,11	8	2,4	81,41	5,10	1,67	98,33		
Umidade do Material (%)	0,24	16	1,2	0,00	0,00	1,67	98,33		
Material pulverulento (%)	0,74	30	0,6	0,00	0,00	1,67	98,33		
Impurezas Orgânicas (NBR-7220)	N/A	50	0,3	0,00	0,00	1,67	98,33		
Torrões de argila (NBR-7216)	N/A	100	0,15	0,00	0,00	1,67	98,33		
Absorção água (NBR-9777)	0,46	200	0,075	14,84	0,93	0,74	99,26		
		Fundo		11,84	0,74	0,00	100,00		
		Soma		1.595,1	-	-	-		

Fonte: Departamento de Engenharia da empresa Martins Lanna (2022)

Figura 5 - Análise granulométrica da brita por peneiramento



Fonte: Departamento de Engenharia da empresa Martins Lanna (2022)

Baseado no trabalho realizado por Mello e Santiago (2020)⁹ e Mors e Jonkers (2013)¹⁰, adotou-se o traço em massa de 1 quilo de cimento para 3,38 quilos de areia, 1,44 quilos de brita e uma relação de água/cimento de 0,5 que pode ser expresso da seguinte forma: 1:3,38:1,44:0,5. A partir deste traço base fizeram-se quatro outros traços substituindo o agregado graúdo e miúdo por argila expandida impregnada com bactéria e argila expandida sem a impregnação da bactéria. Para moldagem dos corpos de prova com a presença da bactéria, tivemos dois traços sendo que no primeiro houve a substituição de 30% do agregado miúdo, e no segundo 30% do agregado graúdo foi substituído pela argila expandida impregnada com a bactéria. Analogamente ao traço utilizando a bactéria, os corpos de prova com a argila expandida sem a bactéria foram moldados utilizando-se dois traços, o primeiro substituindo 30% do agregado miúdo e o segundo substituindo 30% do agregado graúdo pela argila expandida sem a bactéria, conforme apresentado na Tabela 1.

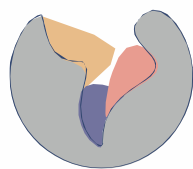


Tabela 1 - Traço utilizado para moldagem dos corpos de prova

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Argila expandida com bactéria (kg)	Argila expandida sem Bactéria (kg)
1	1	2,36	1,44	1,01	-
2	1	3,38	1,008	0,432	-
3	1	2,36	1,44	-	1,01
4	1	3,38	1,008	-	0,432

2.3 Impregnação das bactérias

Adotou-se a metodologia de impregnação em argila expandida conforme proposto por Mors e Jonkers (2013)¹⁰, uma vez que bactérias são muito sensíveis, principalmente à variação de temperatura, pH baixo e desgaste mecânico devido à rotação da betoneira. Sendo assim, se elas não estiverem acondicionadas em um local onde fique de forma inerte, podem morrer durante o processo. O procedimento foi demonstrado no fluxograma conforme Figura 6 abaixo:

Figura 6 - Sequência das etapas do procedimento realizado



Fonte: Departamento de Engenharia da empresa Martins Lanna (2022)

2.4 Confeção dos corpos de prova

Considerando os traço escolhidos, foram calculados os quantitativos de materiais para moldagem de todos os corpos de prova. Desse modo, inicialmente foram moldados 24 corpos de prova, destes, 12 com a argila impregnada com a bactéria, 12 com a argila sem a presença da bactéria. Os corpos de prova com a adição da bactéria foram moldados substituindo 30% do agregado graúdo e 30% do agregado miúdo pela argila expandida, como explicitado anteriormente. Os corpos de prova sem a presença da bactéria foram moldados de maneira que a argila substituísse 30% do agregado graúdo e miúdo. Foram adotados os pesos específicos fornecidos pelos fabricantes dos materiais adquiridos. O quantitativo dos materiais está apresentado na Tabela 2.

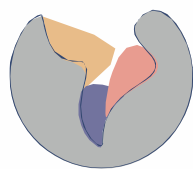


Tabela 2 - Quantitativo de material total

Cimento (kg)	24
Areia (kg)	68,88
Brita (kg)	29,38
Argila expandida (kg)	17,304
Quantidade de CP'S	3
	2

Para a produção dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: Brita 0 e areia industrializada fornecidas pela empresa Martins Lanna, cimento CPV ARI alta resistência, partículas de argila expandida com diâmetro de 1,18 a 4,75 mm. As partículas de argila expandida, sem impregnação de bactérias, foram saturadas por água por 30 minutos antes de serem inseridas na betoneira, pois sua alta taxa de absorção de água poderia afetar a hidratação da pasta de cimento. Além disso, a ausência de saturação poderia causar a flutuação dessas partículas no concreto fresco. Os corpos de prova foram utilizados para caracterização mecânica da resistência à compressão aos 7 e 28 dias, análise visual no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Após rompimento dos corpos de prova foram coletadas amostras fissuradas para acompanhamento da cicatrização de fissuras, à olho nu, por 120 dias.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Análise da resistência à compressão

O objetivo dessa pesquisa é analisar se as bactérias incorporadas ao concreto após o aparecimento de fissura no concreto endurecido serão capazes de reagir e produzir carbonato de cálcio de tal forma a proporcionar a cicatrização das fissuras. Sendo assim a análise da resistência mecânica não teve uma abordagem mais aprofundada nesta pesquisa. Os dados da resistência à compressão foram registrados na Tabela 3.

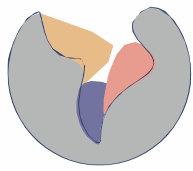
Tabela 3- Resultados do ensaio à compressão em Mpa aos 7 e 28 dias

Traço	Corpo de prova	Resistência a compressão aos 7 dias	Desvio padrão	Média	Coefficiente de variação	Corpo de prova	Resistência a compressão aos 28 dias	Desvio padrão	Média	Coefficiente de variação
1	CP-1	20,3	3,041	19,00	16,00%	CP-4	23,5	3,937	21,50	18,31%
	CP-2	21,9				CP-5	25			
	CP-3	14,8				CP-6	16			
2	CP-7	16,8	0,787	17,90	4,40%	CP-10	27	1,204	25,87	4,65%
	CP-8	18,3				CP-11	26,4			
	CP-9	18,6				CP-12	24,2			
3	CP-13	15,5	1,184	16,97	6,98%	CP-16	28,2	1,179	29,03	4,06%
	CP-14	17				CP-17	28,2			
	CP-15	18,4				CP-18	30,7			
4	CP-19	14,2	0,298	14,60	2,04%	CP-22	22,7	2,871	21,47	13,37%
	CP-20	14,7				CP-23	24,2			
	CP-21	14,91				CP-24	17,5			

Fonte: Autor (2023)

O traço 1 apresentou um coeficiente de variação de 16% aos 7 dias e 18,31% aos 28 dias. Este maior coeficiente de variação foi devido ao CP-3 ter apresentado uma resistência bem inferior ao do CP-1 e CP-2. Devido às limitações de quantitativos de materiais,

SANTIAGO, S. A.; OLIVEIRA, E. A.; MELLO, G. N. de A. **Avaliação da microestrutura do concreto incorporado com bactérias do gênero bacilos subtilis para fins de cicatrização de fissuras.** SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025



disponibilidade de armazenamento dos corpos de prova em laboratório não foi possível a realização de maior quantidade de corpos de prova. Para uma análise estatística mais aprofundada seria interessante ter um número de amostras mais representativa. Já os outros corpos de prova não teve muita discrepância nos valores dos coeficientes de variação.

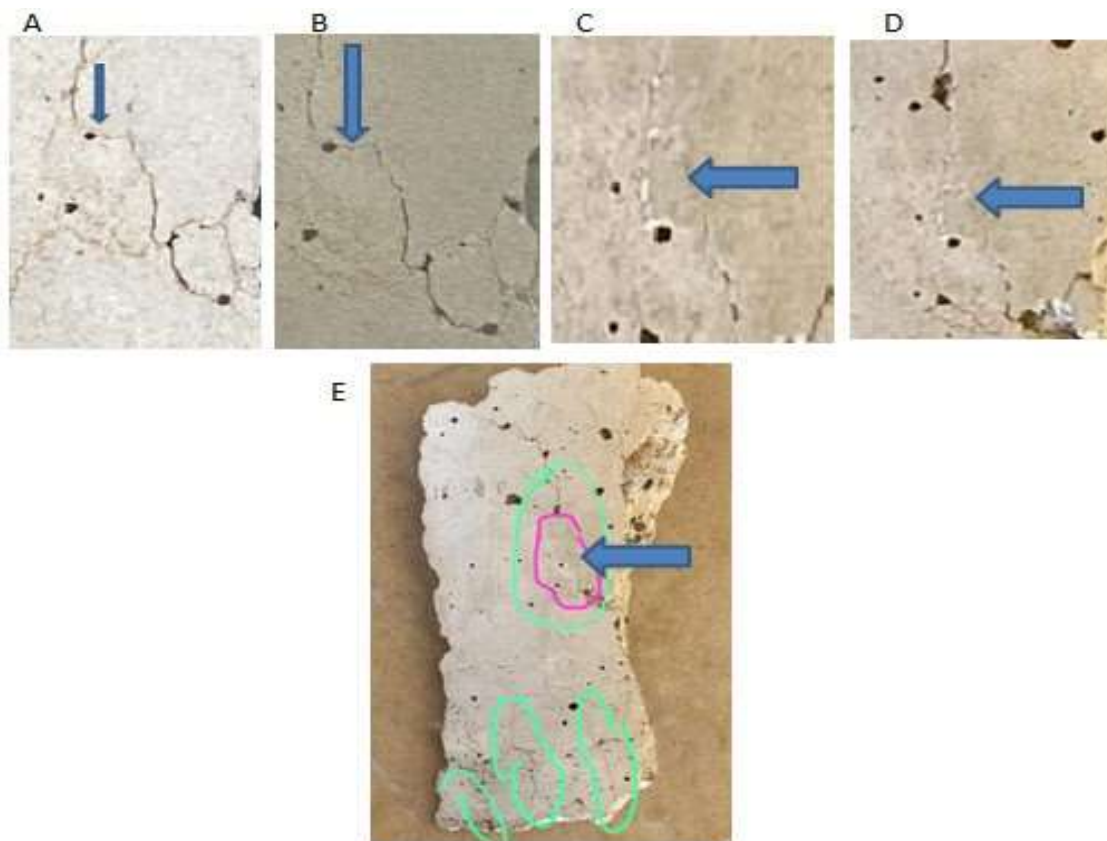
3.2. Verificação da cicatrização das fissuras

Após o rompimento dos corpos de prova, algumas amostras foram colhidas para fins de acompanhamento da possibilidade de fechamento de fissuras. Elas foram observadas diariamente por um período de 120 dias. Foram selecionados fissuras dentro da faixa de 0,1 mm a 0,8 mm já que nessas larguras a probabilidade de cicatrização é mais eficiente e não consta na literatura fechamentos em fissuras maiores que 0,8 mm.

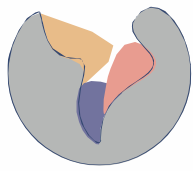
As amostras ficaram expostas ao mesmo ambiente para evitar interferência do meio. Visualmente não foram observados cicatrização de fissuras nas amostras do traço 2.

A amostra do traço 1 foi a que apresentou pontos brancos na região da fissura característicos de formação de CaCO_3 , como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Análise de possível fechamento de fissuras ao longo do tempo



Fonte: Autor (2023)

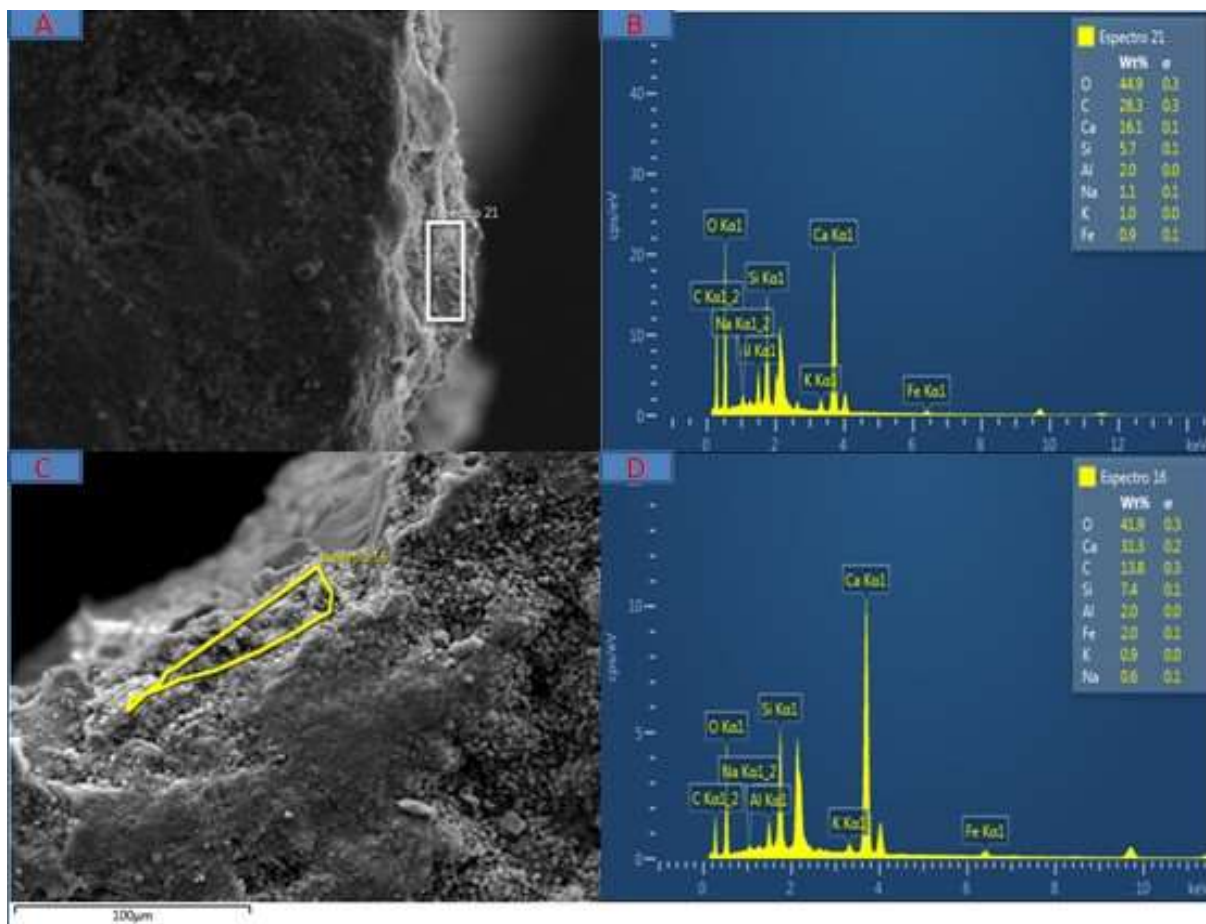


A Figura 2, mostra em A, B, C e D, conforme indicado pela seta, uma fissura aos 15 dias após o rompimento, aos 30 dias, aos 100 e 120 dias após o rompimento, respectivamente. Foi observado aproximadamente aos 100 dias que na mesma região apareceram dentro da fissura e ao longo da mesma pontos brancos característicos de formação de carbonato de cálcio. Em E, mostra outros pontos que também foram analisados porém não foi observada possibilidade de fechamento nas demais fissuras.

3.3. Análise das fissuras por microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

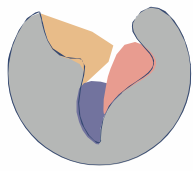
A amostra do traço 1 foi analisada no MEV após 120 dias para examinar a microestrutura e possíveis sinais de precipitação de calcita, como resultado de atividade microbiana. Desta amostra foi retirada testemunhos de dimensões que pudessem ser analisadas no microscópio devido às limitações do aparelho. A Figura 8 exibe análise da microestrutura do concreto com bactérias.

Figura 3 – Micrografia obtidas do MEV do testemunho do traço 1 de concreto com bactérias aos 120 dias após o rompimento e ampliação de 500x



Fonte: Autor (2023)

Foram analisadas regiões das bordas das fissuras e pôde ser observado a presença abundante de minerais, que provavelmente são precipitados de CaCO_3 , cuja formação pode ser pela metabolização bacteriana do lactado de cálcio. Em B e D, da Figura 3, análise do SANTIAGO, S. A.; OLIVEIRA, E. A.; MELLO, G. N. de A. **Avaliação da microestrutura do concreto incorporado com bactérias do gênero bacilos subtilis para fins de cicatrização de fissuras.** SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025



EDS, confirma a possível presença do CaCO_3 ao evidenciar maiores valores para Ca, O e C.

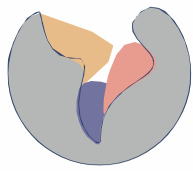
A presença da Silícea (Si) em maior proporção em ao Oxigênio (O), apresentado em D, pode ser devido a concentração de areia.

4. CONCLUSÕES

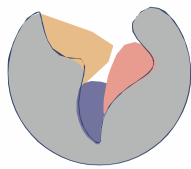
Ficou mostrado que as bactérias incorporadas ao produto utilizado, SERENADE, incorporadas juntamente com o lactato de cálcio e uréia, representa um agente cicatrizante através da precipitação do carbonato de cálcio, capazes de fechar fissuras. As bactérias funcionam como catalisadores biológicos, especialmente quando misturadas em nutrientes rico em cálcio é incorporado à matriz cimentícia. A análise visual ao longo de 120 dias do rompimento foi importante, pois os fechamentos das fissuras ocorreram de forma lenta. Alguns fatores interferem na análise tais como, retirada de testemunhos com fissuras de aberturas dentro do limite da literatura (até 0,8 mm), homogeneidade das partículas de argila expandida contendo bactérias. Foi possível perceber aos 120 dias um fechamento da fissura na amostra do traço 1 e comprovado através das imagens do MEV a presença de CaCO_3 , possível afirmar a precipitação do composto pela presença das bactérias. Para trabalhos futuros seria interessante a realização de estudos variando a concentração do produto SERENADE relacionando com o tempo para fechamento de fissuras, análises de outros traços, confecção de um número maior de corpo de prova de maneira que seja possível obter amostras mais representativas com a finalidade de uma análise estatística mais aprofundada.

REFERÊNCIAS

1. PORTO, THIAGO BOMJARDIM; FERNANDES, DANIELLE S. G. Curso básico de concreto armado: conforme NBR 6118/2014. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
2. KRISHNAPRIYAA, S. et al. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. Microbiological Research, v.174, Pages 48-55, May 2015. Disponível em <https://ac.els-cdn.com/S0944501315000506/1-s2.0-S0944501315000506-main.pdf?_tid=432ba59f-1f82-4b88-9de4-66e7629b4eec&acdnat=1541532452_5dd23e596fbe2f662167ceb41c9449b6>. Acesso em: 15 out. 2018.
3. THOMAZ, ERCIO, Trincas em edifícios : causas, prevenção e recuperação / Ercio Thomaz. -- 2. ed. rev. e ampl. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2020.
4. JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. Crack repair by concrete-immobilized bacteria. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELF HEALING MATERIALS, 1, Noordwijk aan Zee, 2007. Proceedings... Springer, 2007. p. 1-7.
5. KOUSTUBH A. et al. *Bacillus subtilis* bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). v. 03 Issue: 05, May 2016. Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V3/i5/IRJET-V3I5252.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.



6. PRADEEP, KUMAR. A. et al. An experimental work on concrete by adding bacillus subtilis. International Journal of Emerging Technologies and Engineering (IJETE), v. 2 Issue 4, April 2015. Disponível em <<http://www.ijete.org/wp-content/uploads/2015/04/140251.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.
7. EUZÉBIO, L.A.; ALVES, T.R.; FERNANDES, V.A. BIOCONCRETO Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e ureia. Goiás, 2017.
8. JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecol. Eng. 36, 230e235. 2010. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>>. Acesso em: 15 out. 2018
9. MELLO, G. N. A.; SANTIAGO, S. A. Avaliação da microestrutura e da resistência à compressão do concreto com incorporação de bactérias do gênero *Bacillus subtilis*. In: OLIVEIRA, E. A.; BRANCO, L. A. M. N. (Eds.). . Tecnologia
10. MORS, R M; JONKERS, H M. Abordagem prática para a produção de agregados de baixo peso contaminados com agentes bacterianos para possibilitar a auto cura do concreto. 240–243, 2013.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

BIOCONCRETO COM *BACILLUS SUBTILIS*: AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.5>

Luiza Helena Julich

Email: luizajulich@gmail.com

Adriane de Assis Lawisch Rodriguez

Email: adriane@unisc.br

Maria Viviane Gomes Muller

Email: mmuller@unisc.br

Carlos Pérez Bergmann

Email: bergmann@ufrgs.br

RESUMO

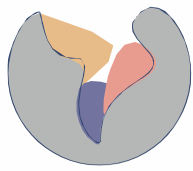
A bactéria *Bacillus subtilis* foi esporulada e imobilizada em óxido de ferro III e adicionada junto de um precursor, lactato de cálcio, ao concreto no estado fresco. Foram moldados corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão axial e diametral aos 7 e 28 dias, nos quais foram obtidas resistências maiores que 55 MPa e 3,3 MPa, aos 28 dias. Fissuras de até 0,65 mm foram autocicatrizadas, com a precipitação de carbonato de cálcio dentro delas.

Palavras-chaves: bioconcreto, *Bacillus subtilis*, imobilização em Fe_2O_3 , resistência a compressão, fechamento de fissuras.

ABSTRACT

The bacteria *Bacillus subtilis* was sporulated, immobilized in iron (III) oxide, and added with the precursor, calcium lactate, to the fresh mixture. Cylindrical specimens were cast and submitted to compressive strength and splitting tensile strength at 7 and 28 days, achieving resistances higher than 55 MPa and 3,3 MPa, respectively, at 28 days. Cracks up to 0.65 mm were healed over time, with calcium carbonate forming inside the cracks.

Palavras-chaves: self-healing concrete, crack healing, *Bacillus subtilis*, iron (III) oxide immobilization, compressive strength.

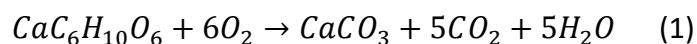


1. INTRODUCTION

Concrete is used worldwide, with annual production estimated at 6 million cubic meters ^[1]. This significant amount is due to the material's wide applicability, since, once combined with steel, it forms a system known as reinforced concrete with high performance while low cost and easy execution ^[2]. Most reinforced concrete structures are designed for a service life of 50 years. However, despite being well-designed, they all deteriorate slowly over time ^[3]. Deterioration mechanisms damage the structure and may be caused by many different agents. The most common causes are loading damage, extreme temperature, chemical attacks, cracks, freeze and thaw cycles, and reinforcement corrosion ^[4]. Microcracks do not cause significant losses on reinforced concrete resistance capacity. However, they allow degenerative agents such as acids, chlorides, carbonates, and sulfates into the structure matrix, causing steel corrosion and concrete deterioration ^[1].

Standard crack and fissure repair techniques are passive, as they depend on monitoring, detection, and repair. Repair agents are applied from outside, which works well with larger gaps. However, with small and deep ones, not so much due to difficult access ^[5-7]. Biomineralization involves chemical reactions promoted by living organisms that generate mineral precipitation. This phenomenon is known as Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP), in which calcium carbonate precipitation occurs by biological means. There are different metabolic pathways to generate CaCO_3 , such as sulfate reduction, photosynthesis, ammonification, denitrification, ureolysis, and organic acid conversion. These processes differ with the type of bacteria ^[8].

Bacillus subtilis is a bacterium with great industrial application. It is already used to produce antibiotics, enzymes such as protease, lipases, amylases, cellulases, and vitamins such as B2. The organic acids *Bacillus subtilis* use are converted into intermediate compounds of the Krebs cycle, glycogenesis, and pentose-phosphate cycles to generate energy and obtain cellular metabolic precursors ^[9]. Equation 1 demonstrates the reaction conducted by bacteria to convert calcium lactate ($\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$) into calcium carbonate (CaCO_3), consuming oxygen (O_2) and generating carbon dioxide (CO_2) and water (H_2O) as byproducts ^[10].

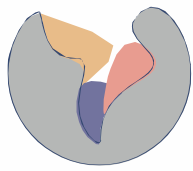


This research aimed to produce and immobilize the bacteria *Bacillus subtilis* in iron (III) oxide to analyze the self-healing performance within the concrete matrix. Mechanical properties were evaluated through compressive and tensile strength at both 7 and 28 days. The remaining resistance capacity was also tested after 56 days of self-healing.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Bacteria growing method and immobilization

The species of bacteria used in this study is *Bacillus subtilis*, and they were made available by the microbiology laboratory at the University of Santa Cruz do Sul. Two culture mediums were used for growth and sporulation, both adapted from the methodology applied by Shaheen *et al.* ^[11]. The immobilization process was also based on the method applied by Shaheen *et al.* ^[11]



and Seifan *et al.* ^[12], differing by using an analytical standard iron oxide and a dispersant agent, sodium silicate, to promote the dispersion of Fe_2O_3 particles in water ^[13].

Before immobilizing the bacteria, the iron (III) oxide granulometry was done. The iron (III) oxide was weighed and fractionated in an Erlenmeyer flask with the subsequent addition of sodium silicate in a ratio of 1% mass of Fe_2O_3 . The total amount of deionized water required was added to the Erlenmeyer flasks at 4.5% (v/v) to immobilize the spores. The Erlenmeyer flasks were placed in an ultrasonic bath for 2 minutes to disperse the iron III oxide particles, followed by spores by pipetting. The flasks were closed with plastic film and kept at 30°C for 30 min while agitated at 145 rpm to immobilize the spores.

2.2 Mix proportions and concrete casting process

The mixture proportion used was adapted from the methodology applied by Shaheen *et al.* ^[11]. The Portland cement used in this study was the CP II F – 40, both cement and plasticizer were provided by the local concrete batching plant Conpasul. The concrete mixture was executed following ABNT NBR 12655 ^[14] in a stationary concrete mixer under conditions classified as A, using cement, aggregates, admixture, and water. All compounds were calculated and measured in mass for both samples, control, and with bacteria. The materials and the amounts used in the concreting process of both types of concrete with bacteria and control are exposed in Table 1.

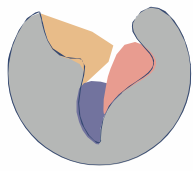
Table 1 – Materials, mix proportion, and quantities used in the concrete

Materials	Mix Proportion	Concrete w/Bacteria	Mix Proportion	Control Concrete
Cement	1	10,56 kg	1	10,56 kg
Sand	1,9	20,24 kg	1,9	20,24 kg
Coarse aggregate	2,2	23,10 kg	2,2	23,10 kg
Total water	0,45	4,75 L	0,45	4,75 L
Remain water	0,19	2,00 L	-	-
Immobilization water	0,26	2,75 L	-	-
Iron (III) oxide	0,017	180 g	-	-
Sodium silicate	0,00017	1,80 g	-	-
Bacteria	0,012	130 mL	-	-
Calcium lactate	0,0167	176 g	-	-
Admixture	0,015	158 g	0,01	105,60 g

Fonte: Autor (2025)

2.3 Concrete specimens casting and mechanical tests

The specimen casting was carried out as specified in ABNT NBR 5738 ^[15], using cylindrical molds with a diameter of 10 cm and a height of 20 cm. The curing process was done as stated by ABNT NBR 5738 ^[15]. The samples remained for 144h (6 days) inside the molds, being demolded a day before the 7 days compressive and tensile strength tests. The humid cure was performed in water tanks filled with CaO. The axial compression tests of cylindrical specimens



were executed as specified by ABNT NBR 5739 ^[16]. The diametral compression tests for tensile strength measurement were done according to ABNT NBR 7222 ^[17] for the control and with bacteria samples at ages 7 and 28 days in a universal mechanical testing machine Instron-EMIC, with a loading rate of 0,47 MPa/s.

2.4 Healing cracks procedure and strength recovery

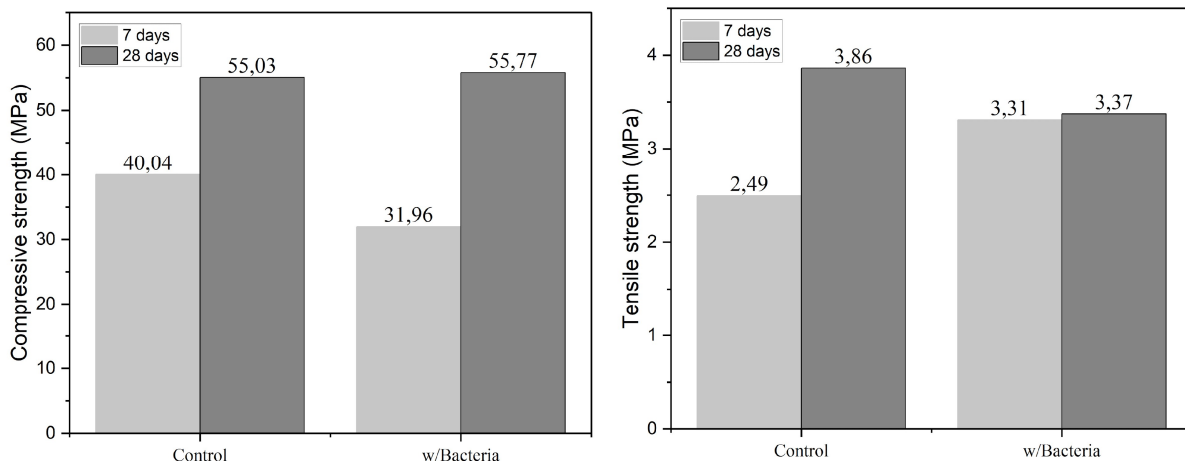
The specimens were submerged in water and monitored weekly for 56 days after rupturing. To verify the strength recovery after the self-healing process, the specimens were subjected to the splitting tensile strength test again, according to the ABNT NBR 7222 ^[17]. The cracks' width measurement was performed with a crack width gauge.

3.RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Compressive and tensile strength test

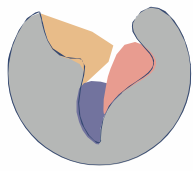
Six concrete mixtures were performed, three of each control and with bacteria, and over 100 samples were cast in 10x20cm molds. The mixture used and the materials guaranteed high resistance to the concrete for both specimens: control and with bacteria, surpassing the expected resistance of 28 MPa, proposed by Shaheen *et al.* ^[11] for this same mix of proportions. The results in Figure 1 demonstrate that both specimens achieve a compressive strength higher than 55 MPa at 28 days, even though there was an initial difference of 8 MPa between the control and the bacteria specimens at 7 days.

Figure 1 – Compressive and tensile strength results at 7 and 28 days



Fonte: Autor (2025)

The concrete with biological addition and immobilization with iron III oxide made by Shaheen *et al.* ^[11] obtained 34 MPa and 37 MPa, at 7 and 28 days, respectively, and the control concrete obtained 26 MPa and 32 MPa for the respective ages, demonstrating that this study obtained better results. As seen in Figure 1, the specimens with bacteria reached, at 7 days, greater tensile strength compared to the control concrete. However, in 28 days, the control concrete reached a resistance that's 0.49 MPa higher than the concrete with bacteria. The maximum

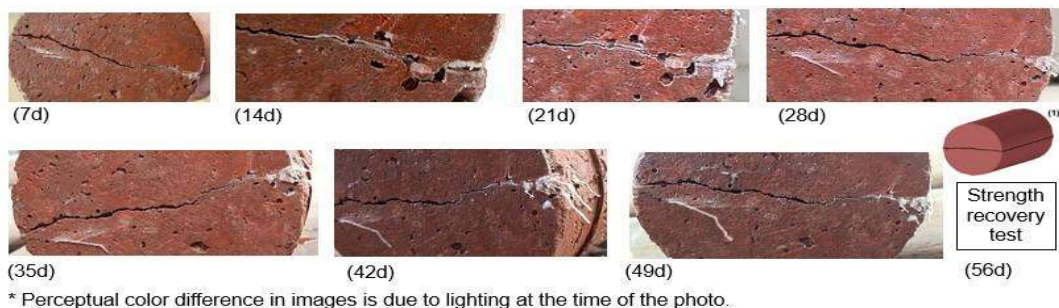


resistance obtained, at 28 days, by Shaheen *et al.* ^[11] was 3.16 MPa for control concrete and 3.39 MPa for concrete with bacteria.

3.2 Crack healing process

Within a week, the specimens showed signs of crack regeneration. The flowcharts presented in Figure 3 and Figure 4 demonstrate the weekly progress, over 49 days, of the specimens, focusing on the cracks at both ends of the specimen. The maximum crack width completely closed was 0.5 mm (Figure 2) and 0.4 mm (Figure 3).

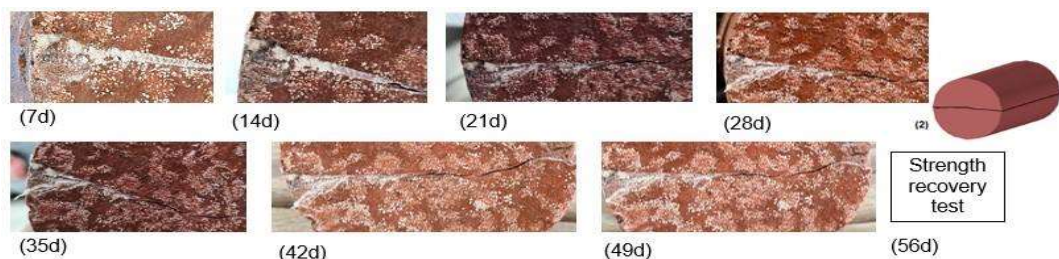
Figure 2 – Healing process (1)



* Perceptual color difference in images is due to lighting at the time of the photo.

Fonte: Autor (2025)

Figure 3 – Healing process (2)



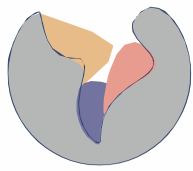
* Perceptual color difference in images is due to lighting at the time of the photo.

Fonte: Autor (2025)

Wang *et al.* ^[18] and Xu and Wang ^[19] healed cracks of 1 mm wide in a period of 3 to 4 weeks, while Shaheen *et al.* ^[11] achieved the regeneration of a 1.2 mm crack in 28 days. In this work, the maximum width closed was 0.5 mm because there weren't cracks much wider than that. Other authors, such as Feng *et al.* ^[20] and Wang, De Belie, and Verstraete ^[6] did not reach widths greater than 0.3 mm.

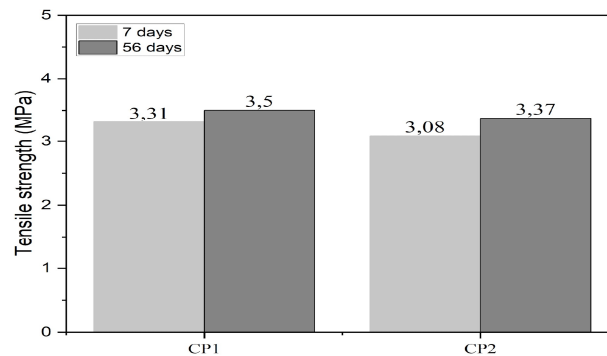
3.3 Splitting tensile strength after the healing process

As shown in Figure 4, two specimens were tested, post-cracking and self-healing processes. They showed resistance to a greater load than the one applied in the first test, demonstrating that biological addition constantly recovered the splitting tensile strength. Shaheen *et al.* ^[11] managed to recover around 85% of the initial strength after the cracking and regeneration



process, while Xu and Wang ^[19] recovered only 20%. The present study recovered 105.8% and 109.4% of the initial concrete strength.

Figure 4 – Splitting tensile strength test after the healing process



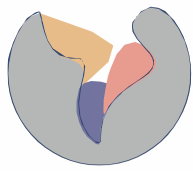
Fonte: Autor (2025)

4. CONCLUSIONS

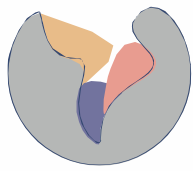
Pathologies such as cracks and fissures are often inevitable and very present in all buildings, which is why self-healing concrete has been researched for years. This research completed the main objective of evaluating cracks' recovery and concrete's compressive strength. Both specimens with bacteria and control reached axial and diametral compression strengths above 55 MPa and 3.3 MPa, respectively, at 28 days. The pre-cracked samples with bacteria began to show regeneration after 7 days, having maximum healed widths of 0.50 mm, proving how effective and fast the bacterial regenerative process is. The process of closing cracks by the bacteria prevents fissures from becoming more extensive and exceeding the 0.4 mm established by the Brazilian standard ABNT NBR 6118 ^[21]. The evaluation of the tensile strength, of the specimens after the self-healing process, proved to be good, considering that in 56 days, there was an increase in the resistance by 105.8% and 109.4% compared to the initial results. The characterization test of the material formed in the cracks was also positive, demonstrating.

REFERENCES

1. NGUYEN, T. H. et al. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103340, 1 nov. 2019.
2. PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso Básico de Concreto Armado: Conforme NBR 6118/2014**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
3. ALEXANDER, M.; BEUSHAUSEN, H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 17–29, 1 ago. 2019.



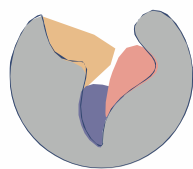
4. DANISH, A.; MOSABERPANAH, M. A.; SALIM, M. U. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 6883–6899, 1 maio 2020.
5. WANG, J. et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 532–540, 1 jan. 2012.
6. WANG, J. Y.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 4, p. 567–577, 1 abr. 2012.
7. XU, J. et al. Self-Healing of Concrete Cracks by Ceramsite-Loaded Microorganisms. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 1–8, 24 jun. 2018.
8. SEIFAN, M.; BERENJIAN, A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, n. 12, p. 4693–4708, 2019.
9. SCHILLING, O. et al. Transcriptional and Metabolic Responses of *Bacillus subtilis* to the Availability of Organic Acids: Transcription Regulation Is Important but Not Sufficient To Account for Metabolic Adaptation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 73, n. 2, p. 499–507, 15 jan. 2007.
10. KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 349–357, 15 jan. 2016.
11. SHAHEEN, N. et al. Synthesis and characterization of bio-immobilized nano/micro inert and reactive additives for feasibility investigation in self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 492–506, nov. 2019.
12. SEIFAN, M. et al. Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles. **Applied Microbiology and Biotechnology** 2018 102:10, v. 102, n. 10, p. 4489–4498, 25 mar. 2018.
13. SCIREA, R. F. et al. Otimização reológica de suspensões aquosas de óxido de ferro (III). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, 2015.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
18. WANG, J. Y. et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 139–152, 1 fev. 2014.
19. XU, J.; WANG, X. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 1–14, jun. 2018.
20. FENG, J. et al. Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. **Construction and Building Materials**, v. 280, p. 122460, 19 abr. 2021.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

BIODEPOSIÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO POR BACTÉRIAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: UMA MINIREVISÃO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.6>

Polyana Ghellere

Email: p_ghellere@hotmail.com

Sheila Karina Lenz

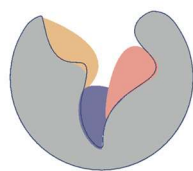
Email: sheila_lenz@icloud.com

Edna Possan

Email: epossan@gmail.com

RESUMO

A fissuração no concreto torna-se um caminho preferencial para o acesso de agentes agressivos, para o interior de uma estrutura ou edificação, o que não é desejável do ponto de vista de durabilidade, tendo em vista a redução da vida útil e/ou o aumento dos custos associados à manutenção e recuperação dos sistemas construtivos. A bioprecipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) por agentes biológicos ^[1,2], vem se tornando uma alternativa biotecnológica para a recuperação de fissuras de materiais cimentícios ^[3], com diversos estudos publicados nos últimos anos. Visando avaliar o estado da arte sobre este processo, pela análise de 65 trabalhos experimentais publicados na base Scopus entre 2010 e 2019, este trabalho apresenta uma mini revisão da literatura quanto às condições experimentais necessárias para a ocorrência da biomineralização, avaliando linhagens bacterianas, quantidade de bactérias, meio de cultura, nutrientes e mecanismos de incorporação das bactérias em matrizes cimentícias. Constatou-se que a argamassa foi material a base de cimento mais utilizado para análise de reparação de fissuras utilizada em 57% dos trabalhos, possivelmente pela maior facilidade de execução de estudos experimentais. As principais linhagens de bactérias empregadas nos estudos de autocicatrização em materiais à base de cimento (fig. 1A) são do gênero *Bacillus* ^[3], não havendo convergência sobre a necessidade de emprego de nutrientes ^[4]. Os estudos avaliados usaram meios nutricionais padrão contendo caldo nutritivo, extrato de levedura, extrato de carne, peptona e glicose, onde o padrão nutricional indica alta preferência por meios proteicos (fig. 1B). A ureia é a fonte de cálcio mais utilizado, presente em 50% dos estudos analisados (fig. 1C), relacionado ao uso de bactérias ureolíticas capazes de precipitar CaCO_3 pela conversão de ureia em amônia e carbonato. Estes cristais precipitados podem assim preencher as fissuras ^[5]. Os principais métodos de incorporação das bactérias aos materiais cimentícios são conduzidos maiormente por três métodos: direto; imersão e aspersão. O primeiro decorre da incorporação direta à água de mistura, o segundo da suspensão de células bacterianas na água de cura e, por fim, pela pulverização de células bacterianas aplicadas na superfície das fissuras das amostras, sendo empregados respectivamente em 72, 19 e 9% dos estudos analisados. Há divergência em relação à quantidade de esporos bacterianos empregada nos materiais à base de cimento necessárias para a remediação de suas fissuras, mostrando uma variação entre 10^5 a 10^{10} .



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE BACTÉRIAS ISOLADAS DE CAVERNA PARA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS E REDUÇÃO DA POROSIDADE

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.7>

Nicole Schwantes-Cezario

Email: nicoleschwantes@uel.br

Avacir Andreello Casanova

Email: acandrello@uel.br

Lucca Vieira Cremasco

Email: luccacremascouel@gmail.com

Berenice Martins Toralles

Email: toralles@uel.br

RESUMO

Este estudo avaliou o impacto da adição de bactérias isoladas de cavernas na autocicatrização de fissuras e fechamento de poros em materiais cimentícios. Bactérias foram incorporadas em diferentes concentrações ($0, 10^5, 10^6$ e 10^7 esporos/mL) em argamassas (traço 1:3 e relação a/c de 0,54), as quais foram testadas quanto a autocicatrização, porosidade e resistência à compressão. Os resultados obtidos demonstraram que 10^7 células/mL foi a melhor concentração, promovendo a maior autocicatrização, sem afetar as propriedades mecânicas. Análises em MEV e EDS confirmaram a formação de cristais de calcita, varita e aragonita, sugerindo um potencial promissor para aumentar a durabilidade de materiais cimentícios.

Palavras-chaves: Bactérias isoladas de caverna, autocicatrização, porosidade, CaCO_3 , materiais cimentícios.

ABSTRACT

This study evaluated the impact of adding cave-isolated bacteria on the self-healing of cracks and pore closure in cementitious materials. Bacteria were incorporated at different concentrations (0, 10^5 , 10^6 , and 10^7 spores/mL) into mortar samples (1:3 mix ratio and water-to-cement ratio of 0.54), which were tested for self-healing, porosity, and compressive strength. The results demonstrated that a concentration of 10^7 spores/mL was optimal, promoting the highest degree of self-healing without compromising mechanical properties. SEM and EDS analyses confirmed the formation of calcite, varite, and aragonite crystals, suggesting a promising potential for enhancing the durability of cementitious materials.

Palavras-chaves: Cave-isolated bacteria, self-healing, porosity, CaCO_3 , cement-based materials.



1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, métodos promissores para restauração ecológica de materiais cimentícios ganharam foco nas pesquisas, dentre os quais destaca-se o uso de bactérias precipitadoras de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) para a autocicatrização de fissuras ^{[1]–[3]}. Essa adição busca melhorar a vida útil dos materiais e tornou-se um tema de pesquisa com atuação de diversas áreas do conhecimento ^[1]. As bactérias são adicionadas aos materiais cimentícios a fim de reduzir a porosidade e fechar fissuras ^{[4], [5]}.

A fissuração é um problema inerente à maioria dos materiais de construção à base de cimento ^[6]. Mesmo que o dimensionamento de estruturas de concreto permita fissuras de pequenas aberturas (até 0,4mm a depender da classe de agressividade) ^[7] e as microfissuras não afetem significativamente a resistência do concreto ^[8], estas permitem a penetração de água, cloretos, sulfatos e ácidos que podem resultar na degradação do material ^{[5], [9]}.

Desta forma, para evitar a degradação precoce do material iniciada pelo processo de fissuração, as bactérias podem ser aplicadas à matriz cimentícia. Diversos estudos utilizando bactérias exibem seu potencial de utilização ^{[10]–[12]}. Bactérias do gênero *Bacillus* são as mais estudadas, porém pesquisas recentes apontam que bactérias isoladas de ambientes naturais, como cavernas, rios e solos podem apresentar um maior potencial de bioprecipitação e consequentemente de autocicatrização ^{[13], [14]}.

Dois estudos foram encontrados na literatura buscando a autocicatrização de fissuras por adição de bactérias isoladas de caverna. O aumento da resistência mecânica e uma diminuição da absorção de água a partir da adição de uma bactéria isolada da caverna Yixing Shanjuan (China), do gênero *Acinetobacter*, foi observado ^[15]. A bactéria *Lysinibacillus macroides*, isolada da caverna Jomblang (Indonésia), impregnada em cinzas vulcânicas, também foi capaz de fechar fissura de até 0,3mm em concretos com 60 dias de cura. Entretanto, esta adição gerou uma diminuição na resistência à compressão ^[13].

Além disso, bactérias isoladas de caverna apresentaram um potencial superior a precipitação de CaCO_3 *in vitro*, quando comparada a outras cepas bacterianas ^[14]. Diante do exposto observa-se que há um potencial para adição destes microrganismos em materiais cimentícios para autocicatrização. Entretanto, muitos parâmetros ainda precisam ser estudados, tais como a concentração da bactéria adicionada, que pode influenciar na autocicatrização e nas propriedades mecânicas do material ^[10].

Frente a isso, o objetivo desta pesquisa consiste em estudar a adição de diferentes concentrações de uma bactéria isolada de caverna da região amazônica em argamassas, definindo a concentração que apresente uma maior autocicatrização e fechamento de poros, sem prejudicar a resistência à compressão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das bactérias para aplicação nos materiais cimentícios

Para esse estudo selecionou-se uma bactéria oriunda de uma caverna na região amazônica, pelo seu potencial de precipitação de CaCO_3 e autocicatrização de fissuras. A cepa, identificada



como *B. subtilis* isolado CV16^[14], foi crescida no meio B4^[16] sem a adição de fonte de cálcio, utilizando uma incubadora Shaker SL 222 durante 48 horas, sob agitação constante de 120 rpm a temperatura de $37 \pm 2^\circ\text{C}$.

Posteriormente, armazenou-se as bactérias em câmara fria, à temperatura de 10°C por 48 horas para que ocorresse a esporulação. Em seguida, as amostras foram centrifugadas e liofilizadas^[14]. A quantificação dos esporos foi realizada utilizando um espectrofotômetro com leitura de 600 nm e a Equação 1^[17].

$$X = 8,59 \times 10^7 \times Y^{1,3627} \quad (1)$$

Sendo X a concentração de esporos/mL e Y a absorbância lida em espectrofotômetro.

2.2. Produção das Argamassas

As argamassas foram produzidas utilizando cimento CP V – ARI e areia natural (massa específica de $2,64\text{g/cm}^3$ e dimensão máxima característica de 4,8mm). As concentrações dos esporos bacterianos adicionados na água de amassamento das argamassas foram de 0 (REF) 10^3 (A_3), 10^5 (A_5) e 10^7 (A_7) esporos liofilizados/mL. É importante destacar que não foi adicionado meio de cultivo ou ureia na solução.

Vale ressaltar que se estudou autocicatrização em argamassas por razões de escala. O traço escolhido foi de 1:3^[18]. As proporções de mistura são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Proporção de mistura para 4 L de argamassa

Argamassas	Cimento (g)	Areia (g)	Água (mL)	Esporos liofilizados (g)
REF	2.252	6.756	1.216	0
A_3	2.252	6.756	1.216	0.0000168
A_5	2.252	6.756	1.216	0.00168
A_7	2.252	6.756	1.216	0.168

2.3. Ensaios realizados

Foram moldados corpos de prova para análises de capacidade de autocicatrização de fissura, porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), absorção de água e resistência à compressão. Os corpos de prova foram armazenados em recipientes de água saturada com cal até as idades de ensaio. Além disso, análises em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) foram realizadas para a caracterização do material precipitado na fissura por ação bacteriana. Os detalhes dos ensaios realizados podem ser visualizados na Tabela 2.



Tabela 2 – Ensaios realizados

Ensaios no estado fresco				
Índice de consistência	ABNT NBR 13276 [19]			
Massa específica	ABNT NBR 9833 [20]			
Ensaios no estado endurecido				
Ensaios	Dimensão do corpo de prova (mm)	Idades de ensaio (dias)	Nº de corpos de prova por idade	Normas/ Equipamentos
Resistência à compressão	50x100	7, 28, 63 e 168	5	NBR 7215 ^[21]
Absorção de água e índice de vazios	50x100	28, 63 e 168 dias	3	NBR 9778 ^[22]
Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)	10x10x10 ¹	7 e 168	1	Porosímetro Micromeritics Autopore IV
Análise de poros em lupa	40x40x40	28 e 168	1	Lupa Leica
Fechamento de fissura	40x40x160 ²	7, 28, 63 e 168	1	Câmera Canon Eos R100
MEV e EDS do material precipitado na fissura	Amostra retirada da fissura por raspagem ³	168	1	Microscópio Eletrônico de Varredura (FEI Quanta 200)

¹ As amostras foram retiradas de corpos de prova cilíndricos (50x100mm), os quais foram rompidos por tração na compressão diametral para a retirada das amostras da parte central, com o uso de um martelo e pontalete.

² O mesmo corpo de prova foi analisado em todas as idades.

³ As amostras foram obtidas por meio de raspagem, utilizando um bisturi [23].

2.3.1. Fissuração

A fissuração foi realizada por meio do ensaio de flexão em três pontos^[24] e o acompanhamento das fissuras foi realizado por análise fotográfica até a idade de 168 dias. Após essa idade, as fissuras foram raspadas e o seu material foi encaminhado para análise em MEV e (EDS).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios no estado fresco

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados de massa específica e de índice de consistência das argamassas.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios em estado fresco

Argamassas	REF	A_3	A_5	A_7
Índice de consistência (mm)	250	250	255	270
Massa específica (g/cm ³)	2,21	2,20	2,22	2,20

A massa específica das argamassas foi de 2,21±0,1 g/cm³ e foi possível observar que com o aumento da concentração de esporos bacterianos houve um aumento no índice de consistência, em 5 mm para A_5 e em 20 mm para A_7. Este resultado corrobora com a

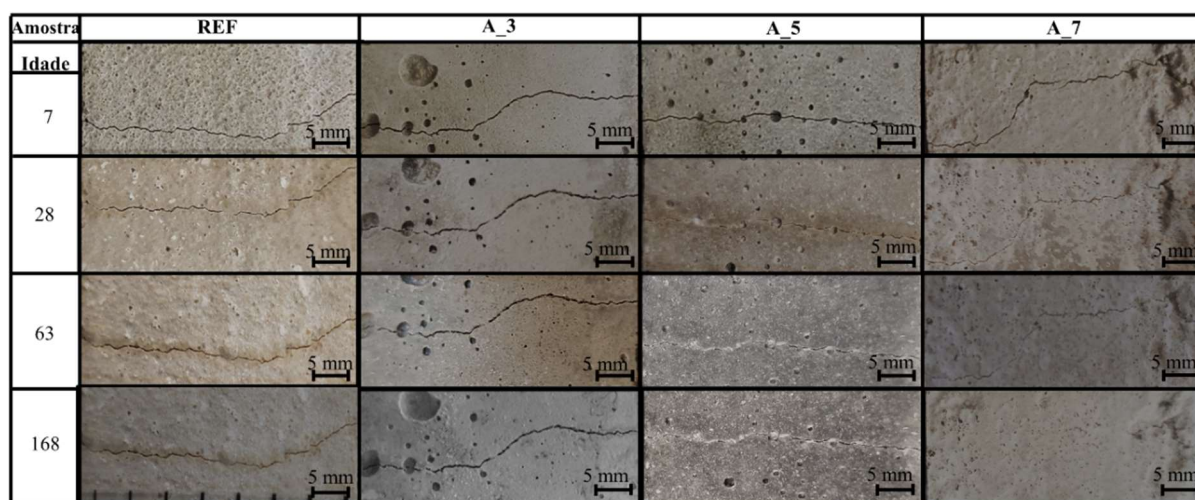


literatura [25], onde pesquisadores observaram um aumento no valor da consistência a partir da adição de bactérias.

3.2. Autocicatrização de fissuras

As fissuras foram produzidas aos 7 dias a partir da realização do ensaio de flexão em três pontos. O acompanhamento da autocicatrização da fissura foi realizado por fotografia (Figura 1), sendo que as fissuras possuíam de 0,2 a 0,3mm de espessura.

Figura 1 – Fotografias das fissuras ao longo das idades



Analisando a sequência de imagens na amostra de referência (REF) e de adição de 10^3 esporos/mL (A_3) é possível observar uma pequena alteração no tamanho da fissura, decorrente a autocicatrização autógena. De qualquer forma, a capacidade de autocicatrização autógena dos materiais cimentícios é limitada, a qual pode ocorrer pela reidratação de partículas de cimento não hidratadas ou insuficientes hidratadas e ainda assim o fechamento de fissura é limitado a aberturas de 0,15 a 0,20mm [3], [26].

Para as argamassas com adição de bactérias nas concentrações de 10^5 e 10^7 esporos/mL, estas apresentaram resultados mais efetivos. Contudo, apenas a argamassa A_7 apresentou fechamento completo da fissura aos 168 dias. É possível observar uma maior evolução da autocicatrização até os 63 dias e uma diminuição desta após essa idade. Tal resultado pode ser justificado pela bactéria consumir o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia nas primeiras idades, pois o hidróxido de cálcio é uma fonte de cálcio utilizada pelas bactérias na precipitação de CaCO_3 [27].

Porém, o hidróxido de cálcio é uma fonte finita no material e pesquisadores verificaram que em amostras previamente carbonatadas, sem a adição de uma fonte suplementar de cálcio, a autocicatrização não foi efetiva. Apontando uma atuação limitada da bactéria caso não haja uma fonte de cálcio para que a bioprecipitação ocorra [3], [28] e corroborando com os resultados apresentados. Além disso, tem-se que conforme o CaCO_3 é formado na fissura, o acesso da água e de oxigênio se torna cada vez mais limitado no local, diminuindo a autocicatrização ao longo do tempo [3].



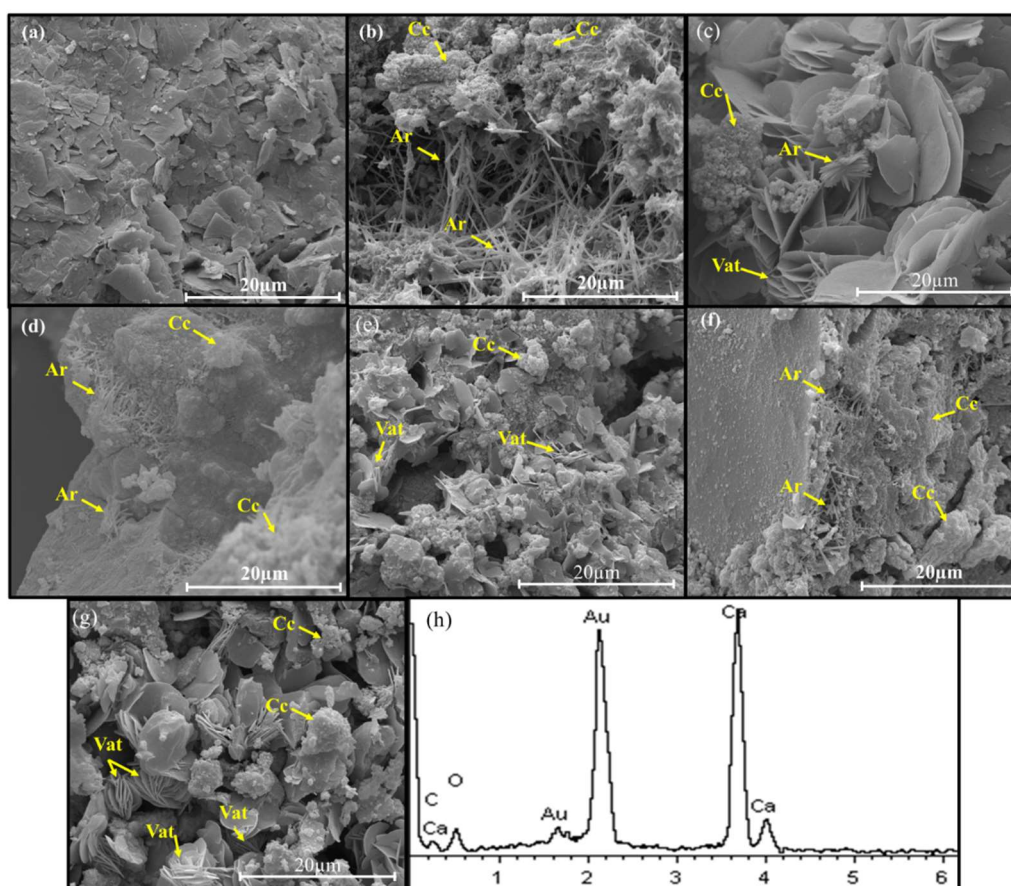
3.2.1. MEV e EDS do material precipitado

Após os 168 dias de análise, o material precipitado nas fissuras foi encaminhado para análise em Microscópio Eletrônico de Varredura. As imagens obtidas estão apresentadas na

Figura 2, na qual as setas apontam para morfologias típicas de cristais de calcita (Cc), aragonita (Ar) e varita (Vat), ambos polimorfismos de CaCO_3 , encontrado apenas nas amostras com adição bacteriana.

A autocicatrização de fissuras por adição de bactérias é resultado da precipitação de CaCO_3 [29]. A morfologia dos cristais corrobora com o apresentado na literatura por vários pesquisadores [30]–[35]. No EDS (Figura 2h) verifica-se picos de cálcio, carbono e oxigênio, quando foram visualizadas morfologias típicas de cristais de CaCO_3 .

Figura 2 – MEV do material retirado das fissuras das amostras REF (a), A_3 (b e c), A_5 (d e e) e A_7 (f e g), com ampliação de 6.000 vezes. Em (h) está apresentado o EDS típico das amostras de CaCO_3

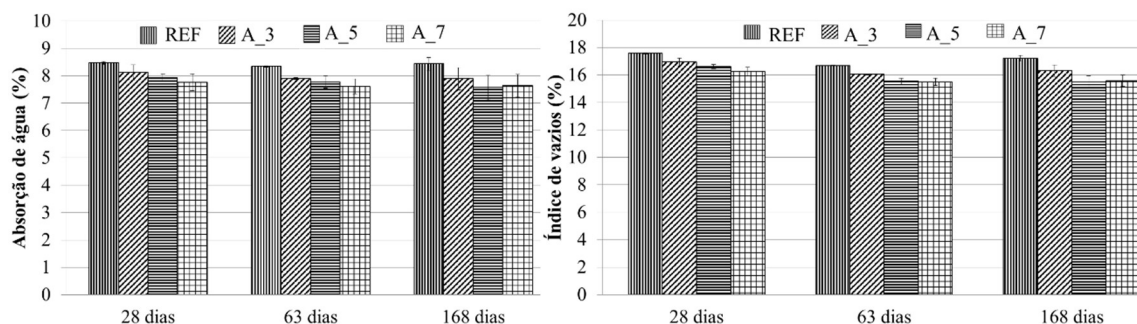


3.3. Absorção de água e índice de vazios

Os resultados de absorção de água e índice de vazios são apresentados na Figura 3.



Figura 3 – Absorção de água e índice de vazios

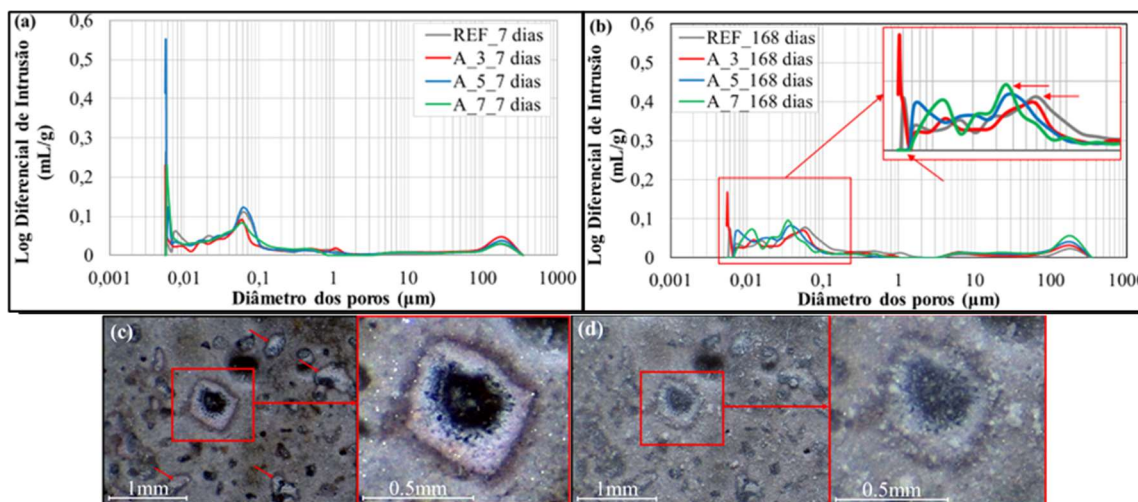


Os resultados condizem com a literatura, que aponta que o aumento da concentração de bactérias diminui a absorção de água e os vazios por meio da precipitação de cristais de CaCO_3 , principalmente em maiores concentrações [36]. As argamassas A_5 e A_7, por sua vez, se apresentaram diferentes estatisticamente da referência em todas as idades. Porém, para as idades de 63 de 168 dias todas as argamassas não apresentaram mudanças significativas neste parâmetro estudado, provavelmente pela ausência de uma fonte complementar de cálcio na mistura.

3.4. Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

A distribuição dos poros na idade de 7 dias foi semelhante entre as amostras (Figura 4a), com exceção da amostra de 10^5 esporos/mL, na qual uma intrusão maior foi observada nos poros de $0,006 \mu\text{m}$. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de um poro maior estar conectado a um poro capilar. Nesta situação, frente a aplicação de pressão, o mercúrio acessa o poro de maior dimensão através de um poro capilar, contabilizando este poro maior como um poro capilar [37].

Figura 4 – Diâmetro dos poros versus log diferencial de intrusão das argamassas aos 7 dias de todas as amostras (a) e aos 168 dias (b). Imagem dos poros da A_7 aos 28 dias (c) e 168 dias (d), com setas apontando para os poros de pequena dimensão já fechados aos 28 dias





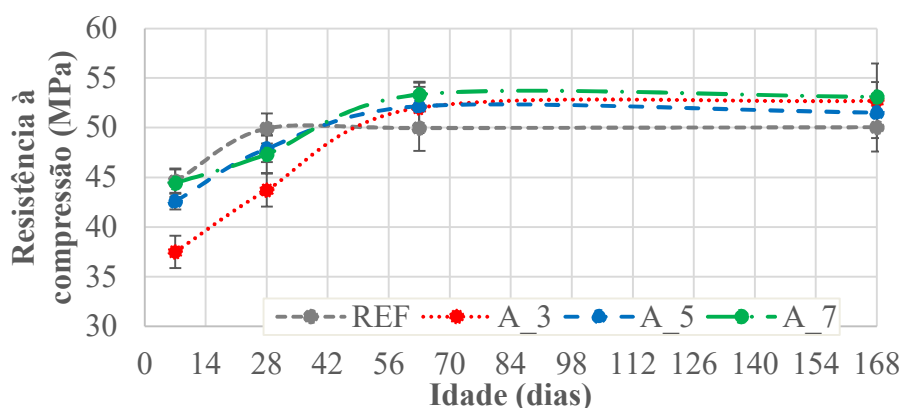
Para os resultados de 168 dias (Figura 4b) já é possível notar a diferença na distribuição de poros das argamassas. Para poros maiores que $0,3\ \mu\text{m}$ a distribuição aparenta uma mesma tendência. Já para poros menores que $0,3\ \mu\text{m}$, observa-se um deslocamento das curvas, evidenciado principalmente para as argamassas com A_5 e A_7, onde a curva se desloca para a esquerda, ilustrando uma diminuição no tamanho dos poros comparados a referência, possivelmente devido a bioprecipitação de CaCO_3 . Esse resultado foi corroborado por uma análise em lupa, ilustrada na Figura 4 (c-d), com cristais depositados na superfície do poro, diminuindo seu diâmetro.

Além disso, detalhe ampliado na Figura 4(b) exibe também que para as argamassas A_5 e A_7 os menores poros analisados, em torno de $0,006\ \mu\text{m}$, não foram visualizados. Comparativamente, na Figura 4(a) esta faixa de poros foi quantificada, podendo dizer que a ação das bactérias possibilitou o fechamento destes poros ao longo do tempo de análise. Desta forma os resultados corroboram com a literatura, que afirma que a adição de bactérias pode modificar a estrutura dos poros pela biodeposição de CaCO_3 [3].

3.5. Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão podem ser visualizados na Figura 5. É possível notar a evolução da resistência à compressão dos 7 para os 28 dias, devido à hidratação do cimento. Entretanto, pelas características do cimento utilizado (CP V – ARI), o maior ganho de resistência ocorre nos primeiros dias de cura, o que acarreta a diminuição no ganho de resistência entre os 7 e 28 dias e nenhum ou pouco aumento de resistência após 28 dias. Porém, observa-se um aumento na resistência das amostras com adição de bactérias, entre os 28 e 63 dias, fato não observado na referência. O que leva a crer que as amostras apresentaram ganho de resistência pelo fechamento de poros devido a ação bacteriana, mas que esse não foi eficiente após os 63 dias de idade, possivelmente pela falta de uma fonte de cálcio para que a precipitação de CaCO_3 continuasse a ocorrer.

Figura 5 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo



Além disso, ao adicionar 10^3 esporos/mL nas argamassas houve uma diminuição na resistência aos 7 e aos 28 dias. Estudos apontam que esta concentração não apresenta melhorias significativas na resistência à compressão [38], [39]. Porém, para as idades de 63 e 168 dias, há



um aumento de resistência considerável e que, estatisticamente, não se diferencia em comparação as demais argamassas com maior concentração.

4. CONCLUSÕES

A cepa de *B. subtilis* CV16, proveniente de uma caverna da região amazônica foi capaz de precipitar CaCO_3 sem o contato com uma fonte de ureia, fazendo com que a precipitação ocorresse de forma involuntária, pela oxidação de compostos orgânicos, sendo essa uma solução mais sustentável e que não traz prejuízos as propriedades do material.

Dentre as concentrações estudadas, as de 10^5 de 10^7 esporos/mL apresentaram resultados semelhantes quanto a absorção de água, índice de vazios e PIM, entretanto a concentração de 10^7 esporos/mL foi a que apresentou maior autocicatrização. Além disso, observou-se a necessidade da adição de uma fonte de cálcio suplementar para que a autocicatrização seja eficaz por períodos maiores, sendo que fissuras de até 0,3mm foram fechadas durante o tempo de análise pela atuação bacteriana.

REFERÊNCIAS

1. M. Alazhari, T. Sharma, A. Heath, R. Cooper, and K. Paine, "Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 610–619, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.086.
2. H. Rong *et al.*, "Influence of bacterial concentration on crack self-healing of cement-based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118372, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118372.
3. S. Luhar, I. Luhar, and F. U. A. Shaikh, "A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete: Mechanisms, Strength, Durability, and Microstructural Properties," *J. Compos. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–35, 2022, doi: 10.3390/jcs6010023.
4. H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, and E. Schlangen, "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete," *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 230–235, 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.
5. M. Nodehi, T. Ozbakkaloglu, and A. Gholampour, "A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties," *J. Build. Eng.*, vol. 49, no. November 2021, p. 104038, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104038.
6. H. Kalhori and R. Bagherpour, "Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 249–260, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.074.
7. ABNT, "NBR 6118:2014 Design of concrete structures — Procedure," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 238, 2014.



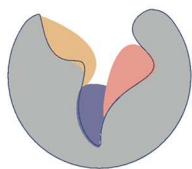
8. R. Mors and H. M. Jonkers, "Bacteria-based self-healing concrete: evaluation of full scale demonstrator projects," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 4, no. 2019, pp. 138–144, 2020, doi: 10.21809/rilemtechlett.2019.93.
9. T. H. Nguyen, E. Ghorbel, H. Fares, and A. Cousture, "Bacterial self-healing of concrete and durability assessment," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, no. May, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103340.
10. S. Jena, B. Basa, K. C. Panda, and N. K. Sahoo, "Impact of Bacillus subtilis bacterium on the properties of concrete," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.129.
11. T. Van Mullem, E. Gruyaert, R. Caspeele, and N. De Belie, "First large scale application with self-healing concrete in belgium: Analysis of the laboratory control tests," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/ma13040997.
12. A. Ansari *et al.*, 14. *Effect of self-healing on zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites*. Elsevier Inc., 2020.
13. A. Nugroho *et al.*, "Self-Healing Concrete Using Bacteria Calcification from Karst Cave Environment," *J. Kim. Terap. Indones.*, vol. 21, no. 1, pp. 7–13, 2019, doi: 10.14203/jkti.v21i1.411.
14. N. Schwantes-Cezario *et al.*, "Potential of cave isolated bacteria in self-healing of cement-based materials," *J. Build. Eng.*, vol. 45, p. 103551, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103551.
15. M. Li, C. Fang, S. Kawasaki, M. Huang, and V. Achal, "Bio-consolidation of cracks in masonry cement mortars by Acinetobacter sp. SC4 isolated from a karst cave," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 141, no. November 2017, pp. 94–100, 2019, doi: 10.1016/j.ibiod.2018.03.008.
16. M. Marvasi, Y. C. Davila-Vazquez, and L. C. Martinez, "Laboratory Activity to Effectively Teach Introductory Geomicrobiology Concepts to Non-Geology Majors," *J. Microbiol. Biol. Educ.*, vol. 14, no. 2, pp. 206–212, Jan. 2013, doi: 10.1128/jmbe.v14i2.578.
17. S. K. Ramachandran, "Remediation of Concrete Using Micro ..Organisms," no. 98, pp. 3–9, 2001.
18. J. Xu and W. Yao, "Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent," *Cem. Concr. Res.*, vol. 64, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.06.003.
19. ABNT, "Fresh concrete - Determination of bulk density and of air content by gravity test - Method of test," pp. 3–5, 2009.
20. A. B. de N. Técnicas, "Abnt Nbr 13276," *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, 2016.
21. N. 7215, "NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão," pp. 1–8, 1997.



22. ABNT, “NBR 9778 - Hardened cement mortar and concrete - Determination of water absorption by immersion - Borehole index and bulk density - Method of test,” *Dom. Post*, p. A6, 2009, [Online]. Available: <http://ezproxy.massey.ac.nz/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=anh&AN=TDP080411A00616367292-CF&site=eds-live&scope=site>.
23. C. Stuckrath, R. Serpell, L. M. Valenzuela, and M. Lopez, “Cement & Concrete Composites Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 50, pp. 10–15, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.02.005.
24. L. Skevi, B. Reeksting, S. Gebhard, and K. Paine, “Bacteria based self-healing of later-age cracks in concrete,” pp. 1–10, 2021.
25. M. Luo and C. Qian, “Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 659–663, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.075.
26. J. Zhang, C. Zhao, A. Zhou, C. Yang, L. Zhao, and Z. Li, “Aragonite formation induced by open cultures of microbial consortia to heal cracks in concrete: Insights into healing mechanisms and crystal polymorphs,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 224, pp. 815–822, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.129.
27. I. Justo-Reinoso, A. Heath, S. Gebhard, and K. Paine, “Aerobic non-ureolytic bacteria-based self-healing cementitious composites: A comprehensive review,” *J. Build. Eng.*, vol. 42, no. June, p. 102834, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102834.
28. L. Tan, B. Reeksting, V. Ferrandiz-Mas, A. Heath, S. Gebhard, and K. Paine, “Effect of carbonation on bacteria-based self-healing of cementitious composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119501.
29. T. K. Sharma, M. Alazhari, A. Heath, K. Paine, and R. M. Cooper, “Alkaliphilic *Bacillus* species show potential application in concrete crack repair by virtue of rapid spore production and germination then extracellular calcite formation,” 2017, doi: 10.1111/jam.13421.
30. K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, and W. Verstraete, “Use of bacteria to repair cracks in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 157–166, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.025.
31. S. J. Park, J. M. Park, W. J. Kim, and S. Y. Ghim, “Application of *Bacillus subtilis* 168 as a multifunctional agent for improvement of the durability of cement mortar,” *J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 22, no. 11, pp. 1568–1574, 2012, doi: 10.4014/jmb.1202.02047.
32. N. Kaur and D. M. Sudhakara, “*Bacillus megaterium* mediated mineralization of calcium carbonate as biogenic surface treatment of green building materials,” pp. 2397–2406, 2013, doi: 10.1007/s11274-013-1408-z.



33. N. Schwantes-Cezario, L. P. Medeiros, A. G. De Oliveira, G. Nakazato, R. Katsuko Takayama Kobayashi, and B. M. Toralles, "Bioprecipitation of calcium carbonate induced by *Bacillus subtilis* isolated in Brazil," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 123, pp. 200–205, 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2017.06.021.
34. N. Schwantes-Cezario *et al.*, "Mortars with the addition of bacterial spores: Evaluation of porosity using different test methods," *J. Build. Eng.*, vol. 30, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101235.
35. N. SCHWANTES-CEZARIO, M. F. PORTO, G. F. B. SANDOVAL, G. F. N. NOGUEIRA, A. F. COUTO, and B. M. TORALLES, "Effects of *Bacillus subtilis* biocementation on the mechanical properties of mortars," *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 31–38, 2019, doi: 10.1590/s1983-41952019000100005.
36. S. Mondal and A. D. Ghosh, "Investigation into the optimal bacterial concentration for compressive strength enhancement of microbial concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 183, pp. 202–214, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.176.
37. N. Alderete, Y. Villagrán, A. Mignon, D. Snoeck, and N. De Belie, "Pore structure description of mortars containing ground granulated blast-furnace slag by mercury intrusion porosimetry and dynamic vapour sorption," *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 157–165, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.245.
38. N. Chahal and R. Siddique, "Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 161–174, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.023.
39. N. Chahal, R. Siddique, and A. Rajor, "Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 351–356, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

INVESTIGAÇÃO DE BACTÉRIAS INDÍGENAS PARA A PROMOÇÃO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.8>

Vinícius Müller

Email: vmullerm1@gmail.com

Henrique dos Santos Kramer

Email: henriquekramer@edu.unisinos.br

Fernando Pacheco

Email: fernandapache@unisinos.br

Hinoel Zamis Ehrenbring

Email: hzamis@unisinos.br

Roberto Christ

Email: rchrist@unisinos.br

Victor Valiati

Email: valiati@unisinos.br

Regina Célia Espinosa Modolo

Email: reginaem@unisinos.br

Bernardo Fonseca Tutikian

Email: bftutikian@unisinos.br

RESUMO

As bactérias para cicatrização de fissuras em matrizes cimentícias estão em diversos ambientes, sendo essencial sua identificação para avaliar a viabilidade técnica. Neste estudo, bactérias indígenas foram coletadas de solos expostos ao cimento, identificadas e aplicadas em argamassas com 18% de ar incorporado. A cicatrização foi analisada por microscopia óptica e difração de raios X. Todas as bactérias precipitaram CaCO_3 , mas apenas *Bacillus* e *Pseudomonas* foram viáveis para uso em matrizes cimentícias autocicatrizantes. *Cronobacter* e *Citrobacter* são potencialmente patogênicas, dificultando seu uso em concretos e argamassas.

Palavras-chaves: bactérias indígenas; argamassa; autocicatrização.

ABSTRACT

Bacteria for crack healing in cementitious matrices exist in various environments, requiring identification for technical viability assessment. In this study, indigenous bacteria were collected from cement-exposed soils, identified, and applied in mortars with 18% incorporated air. Healing was analyzed via optical microscopy and X-ray diffraction. All bacteria precipitated CaCO_3 , but only *Bacillus* and *Pseudomonas* were viable for self-healing cementitious matrices. *Cronobacter* and *Citrobacter* pose pathogenic risks, limiting their use in concrete and mortars.

Palavras-chaves: indigenous bacteria; mortar; self-healing.



1. INTRODUÇÃO

Com a demanda crescente por edificações sustentáveis, a preocupação com sua durabilidade se torna imprescindível. Para as argamassas e concretos, materiais fundamentais nas construções, as fissuras são um dos principais problemas que podem comprometer a durabilidade desses compostos. Isto se deve pelas fissuras aumentarem a permeabilidade dos revestimentos e das estruturas, facilitando a entrada de agentes agressivos e de umidade para o interior das estruturas⁽¹⁾.

Para que a durabilidade seja mantida, o reparo das fissuras deve ser realizado⁽²⁾, porém os tratamentos podem ser oneroso e, as vezes temporários^(3,4). Alguns autores⁽³⁾ apontam a autocicatrização como um caminho promissor. A sua diferença em relação aos outros métodos de tratamentos se dá por não requerer intervenções manuais e por poder agir já no início da formação das fissuras⁽⁵⁾.

As matrizes cimentícias de cimento Portland são materiais com a capacidade autocicatrização, pois, com o passar do tempo, pode ocorrer a hidratação de grãos de cimento anidro ou a carbonatação do hidróxido de cálcio (CaOH_2), colmatando as fissuras⁽⁶⁾. Esse processo é conhecido como autocicatrização autógena e possui a inconveniência de ser limitado ao fechamento de fissuras de até 0,1 mm⁽⁷⁾, além de necessitar a presença de água nas fissuras, dificultando sua precisão. Outra opção é a autocicatrização autônoma bacteriana⁽⁸⁾, em que bactérias inseridas no concreto colmatam as fissuras com carbonato de cálcio (CaCO_3) oriundo de seus metabolismos. O desempenho deste método pode ser até quatro vezes maior que a autocicatrização autógena no preenchimento de fissuras^(7,9,10).

Na literatura a maioria dos trabalhos relatam a utilização de bactérias industriais⁽¹¹⁻¹⁴⁾ e poucas bactérias indígenas⁽¹⁵⁻¹⁸⁾. As bactérias indígenas são microrganismos naturalmente presentes no ambiente de estudo, sendo isoladas e/ou identificadas em laboratório. A pesquisa com essas bactérias amplia o conhecimento sobre espécies potencialmente aplicáveis na autocicatrização de matrizes cimentícias, além de possibilitar o desenvolvimento de bio-concretos mais acessíveis e duráveis.

Dada a problemática exposta, neste trabalho investigou-se e caracterizou-se bactérias oriundas de solos em contato com cimento Portland, bem como os produtos resultantes de seus metabolismos em matrizes cimentícias.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas: prospecção das bactérias indígenas, preparação das amostras, indução da cicatrização e caracterização dos produtos formados. Cada uma das etapas e os materiais utilizados serão expostos a seguir.

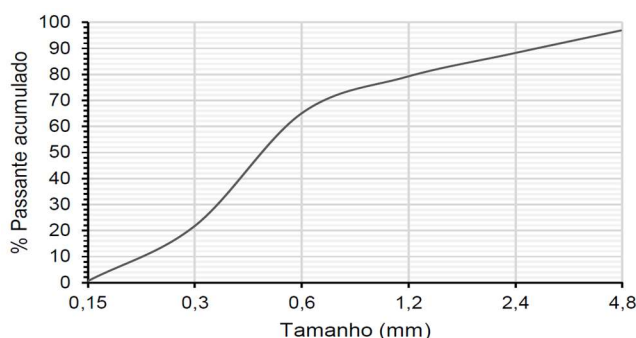
2.1. Materiais

O ligante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), pois este tipo de cimento não possui adições pozolânicas, prevenindo que não ocorra a autocicatrização



autônoma devido a reações pozolânicas. As bactérias utilizadas foram selecionadas conforme relatado no item 3.1. Como agente protetor das bactérias, foi utilizado o aditivo incorporador de ar *Centrament Air 200®*. Sua escolha baseou-se em resultados de outras pesquisas que indicaram sua viabilidade⁽¹¹⁾ e ausência de limitações quando aplicado em larga escala, ao contrário de outros métodos de encapsulamento⁽¹⁹⁾. O agregado utilizado foi areia quartzosa, proveniente de cava, com massa específica de 2,59 g/cm³ e módulo de finura de 3,49. A distribuição granulométrica da areia está apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição granulométrica do agregado utilizado



Fonte: Autores

2.2. Proporcionalamento dos materiais

O traço utilizado já foi avaliado em outros trabalhos^(20,21) desenvolvidos no grupo de pesquisa em que os autores fazem parte. O traço unitário em massa está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Traço unitário em massa para a produção das argamassas

Cimento	Areia	Relaçã o a/c*	Aditivo incorporador de ar (em relação a massa de cimento)	Teor de ar incorporado**	Consumo de cimento
1,0	1,0	0,4	0,35	18%	708,9 kg/m ³

* Todo conteúdo de água foi substituído pela solução bacteriana

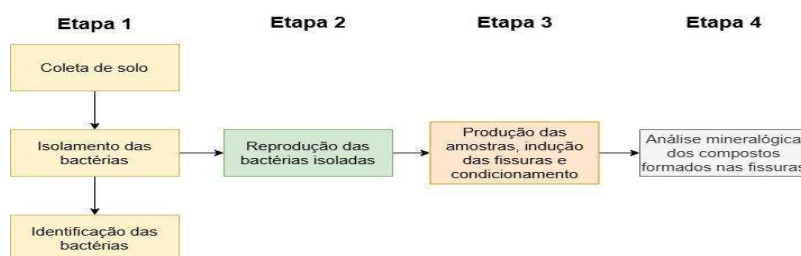
** Aferido pelo método da ABNT NBR 16887, 2020⁽²¹⁾.

2.3. Métodos

O programa experimental foi dividido em quatro etapas, conforme apresentado no fluxograma da Figura 2. A seguir, são descritas as atividades desenvolvidas em cada etapa.



Figura 2 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autores

2.4. Bioprospecção de bactérias

Para a seleção de bactérias foi realizado o procedimento de isolamento dos microrganismos a partir do solo, adaptado de outro trabalho⁽²²⁾. A coleta de solos de ambientes expostos ao cimento facilita o encontro de bactérias que provavelmente possuem resiliência para o ambiente alcalino da matriz cimentícia^(23,24). Cinco amostras de solo foram coletadas em dois ambientes industriais expostos ao cimento Portland para a realização deste estudo. O primeiro ambiente (A) corresponde a um solo de textura arenosa, situado nas proximidades do silo de cimento de uma indústria de estruturas pré-moldadas em concreto, localizada em Porto Alegre, Brasil. O segundo ambiente (B) apresenta solo de textura argilosa e está situado junto ao estoque de agregados graúdos de uma usina de concreto em Novo Hamburgo, Brasil. As amostras foram coletadas a uma profundidade de 5 cm, seguindo um protocolo sistemático de amostragem adaptado de outro trabalho⁽²³⁾. Cada ponto de coleta foi identificado por um código alfanumérico, onde a letra representa o ambiente de amostragem (A ou B) e o numeral subsequente (I, II, III, IV ou V) indica a sequência da perfuração. A localização dos pontos de amostragem está ilustrada na Figura 3.

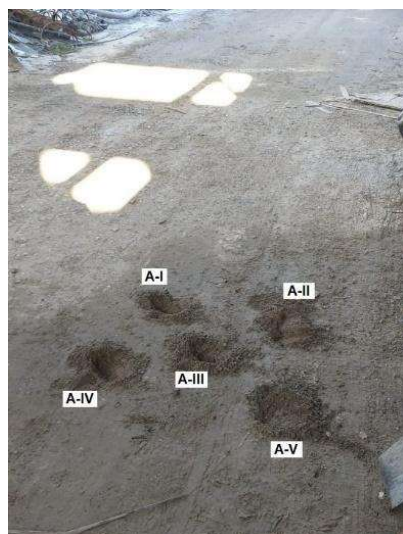
Figura 3 – Localização geográfica (a) e detalhada (b,c) dos pontos de coleta de solo





1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto



(b)



(c)

Fonte: Autores

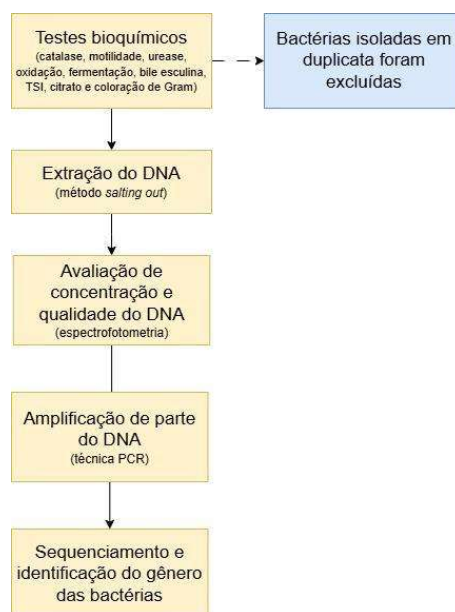
Após a coleta das amostras, uma quantidade de 2 g de cada foi individualmente suspensa em 25 mL de meio de cultura à base de lactato de cálcio, incubado a 37 °C por um período de 24 horas, favorecendo o desenvolvimento bacteriano. A escolha dessa solução baseou-se em resultados positivos obtidos em pesquisas anteriores^(19,25), permitindo uma primeira triagem das bactérias presentes. O meio foi preparado com água deionizada, contendo 8 g/L de lactato de cálcio e 1 g/L de extrato de levedura.

Na sequência, foi realizado o plaqueamento em estrias para dar início ao isolamento das bactérias. Para esse procedimento, utilizou-se ágar com lactato de cálcio, com composição idêntica ao meio líquido, acrescido de 16 g/L de ágar. As placas foram incubadas a 37 °C por 24 horas, permitindo a observação macroscópica da morfologia das colônias⁽¹⁶⁾. O processo de plaqueamento foi repetido diversas vezes até que se obtivessem colônias bacterianas isoladas.

Após a obtenção dos isolados, iniciou-se a segunda etapa do estudo, voltada para a identificação das bactérias⁽²⁶⁾. Os passos a seguir estão resumidos no fluxograma apresentado na Figura 4.



Figura 4 – Fluxograma da identificação das bactérias



Fonte: Autores

Primeiramente, foram aplicados diversos testes bioquímicos, incluindo catalase, motilidade, urease, oxidação, fermentação, bile esculina, TSI e citrato. Posteriormente, utilizou-se a coloração de Gram para separar as bactérias com parede celular espessa⁽²⁷⁾. Amostras com resultados idênticos nos testes bioquímicos e na coloração de Gram tiveram suas duplicatas descartadas.

Em seguida, procedeu-se à extração do DNA pelo método de salting out, conforme o protocolo Wizard Genomic DNA Purification Kit® Promega. A avaliação da concentração e qualidade do DNA genômico foi realizada por espectrofotometria UV Nanodrop™ (Thermo Scientific™, Wilmington, DE, EUA). O DNA extraído foi empregado na amplificação da região do gene 16S rRNA, produzindo um fragmento de aproximadamente 1200 pb, utilizando a técnica de PCR com os primers forward 27F (5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') e reverse MHR1 (5' CCTTGTTACGACTTCACCC 3'), acrescido de uma citocina (C) na extremidade 5'⁽²⁸⁾.

A mistura da reação de PCR incluiu 1 µL do DNA extraído, 4 µL da solução Master Mix Fire Pool (Ludwig Biotech Ltda.), 1 µL de cada primer e 13 µL de água ultrapura. A amplificação foi conduzida em um termociclador sob as seguintes condições: desnaturação inicial a 94 °C por 4 minutos, seguida de 38 ciclos de desnaturação a 94 °C por 1 minuto, anelamento a 55 °C por 40 segundos e extensão a 72 °C por 90 segundos, finalizando com uma extensão final a 72 °C por 5 minutos.

A quantificação dos produtos amplificados foi feita por espectrofotometria UV Nanodrop™ (Thermo Scientific™, Wilmington, DE, EUA), enquanto a verificação dos produtos esperados foi realizada por eletroforese em gel de agarose a 1 %, submetida a 90 V por 45 minutos, corada com o corante fluorescente GelRed (Biotium, Hayward, CA, EUA) e utilizando um



marcador de peso molecular (100 bp DNA Ladder Invitrogen™). A visualização ocorreu sob luz ultravioleta em um transluminador.

Os produtos da PCR foram purificados com as enzimas Shrimp Alkaline Phosphatase (SAP) e exonuclease I (New England Biolabs, Ipswich, MA, EUA), empregando 0,3 µL de Exo I e 0,8 µL de SAP para cada 10 µL do produto de PCR. A reação ocorreu a 37 °C por 20 segundos, seguida por inativação a 85 °C por 15 minutos e manutenção a 12 °C até o momento da retirada do termociclador. O sequenciamento foi conduzido pela empresa Advancing through Genomics MACROGEN, sediada na Coreia do Sul, sendo cada amostra analisada em ambas as direções (senso e anti-senso).

Para cada isolado sequenciado, a sequência consenso foi montada a partir das leituras senso e anti-senso utilizando o software Staden Package 2.0 (<http://staden.sourceforge.net/>). A qualidade das sequências foi verificada visualmente nos cromatogramas através do software ChromasPro (<http://www.techneysium.com.au>). Cinco sequências consenso foram geradas e alinhadas automaticamente pelo ClustalW, integrado ao MEGA 7⁽³⁰⁾, com edições subsequentes no BioEdit 5.0.9⁽³¹⁾. Após o alinhamento, cada sequência do gene 16S rRNA foi utilizada como consulta no banco de dados GenBank do NCBI, utilizando a ferramenta BLAST. Em todos os casos, os resultados do BLAST indicaram correspondência com sequências de 16S rRNA de bactérias, apresentando cobertura superior a 80% e identidade acima de 98%, confirmando que as sequências obtidas pertencem à região 16S do genoma bacteriano.

2.5. Produção das amostras

Previamente à produção das amostras de argamassa, as bactérias isoladas foram inoculadas separadamente em caldo de lactato de cálcio. Os inóculos foram cultivados em shaker a 165 rpm e 37 °C, por 24 horas⁽¹⁹⁾. Após o crescimento bacteriano foi utilizado em substituição a água de amassamento, sem realização de contagem de microrganismos ou diluições.

As argamassas foram produzidas em misturador mecânico seguindo as orientações da ABNT NBR 7215:2019⁽³¹⁾. Após a mistura, as argamassas foram postas e adensadas manualmente em moldes de 4 x 4 x 16 cm, produzindo um corpo de prova por bactéria isolada.

Após as moldagens, os corpos de prova foram mantidos em ambiente controlado com temperatura de 23 ± 2°C e a umidade relativa (UR) superior a 95% até os 7 dias de idade.

2.6. Indução das fissuras e cicatrização

As fissuras foram induzidas mecanicamente por meio do ensaio de tração na flexão por três pontos. O carregamento foi de 100 N/s até ser formada pelo menos uma fissura visível. A fissuração aconteceu aos 7 dias após sua moldagem. Na Figura 5 está apresentado um corpo de prova com uma fissura induzida.

Figura 5 – Corpo de prova com uma fissura induzida



Fonte: Autores

Em seguida, todos os corpos de prova foram realocados em ambiente controlado. As condições estabelecidas para o processo de autocicatrização seguiram o protocolo adotado por outros autores⁽³²⁾, assumindo-se que as bactérias incorporadas à matriz permanecem em contato simultâneo com oxigênio e água. Essa configuração favorece a atividade metabólica dos microrganismos, potencializando sua capacidade de autocicatrização, conforme já demonstrado na literatura⁽³³⁾.

2.7. Caracterização dos produtos formados

A caracterização mineralógica dos compostos formados nas fissuras foi avaliada utilizando difração de raios-x (DRX). Para isso, aos 28 dias de idade, utilizando uma agulha esterilizada, o material foi coletado das fissuras. O equipamento utilizado é da marca PANanalytical, modelo Empyrean, com configuração de intervalo de ângulo de 5 a 75 °, tempo de 1 segundo e passo de 0,05.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão discutidos os resultados da bioprospecção de bactérias, além dos produtos de cicatrização formados.

3.1. Bioprospecção de bactérias

Verificou-se que todas as amostras de solo coletadas possuíam bactérias capazes de crescerem no meio de lactato de cálcio e posteriormente ao isolamento, foram encontradas 10 bactérias distintas para análise. Após a seleção pelos testes bioquímicos e exclusão de duplicatas, restaram 5 isolados para a introdução na matriz cimentícia. A identificação molecular dos isolados até o nível de gênero e seus locais de coleta estão apresentados na Tabela 2. A não determinação específica das 5 bactérias é resultado da alta similaridade genética entre algumas espécies de cada um dos gêneros.



Tabela 2 – Identificação molecular

Isolado	Solo	Filo	Classe	Ordem	Família	Gênero
1	A-II	<i>Proteoc</i> <i>eria</i>	<i>Gammaproteo</i> <i>acteria</i>	<i>Enterobacterales</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Cronobacter</i>
2	A-V	<i>Proteoc</i> <i>eria</i>	<i>Gammaproteo</i> <i>acteria</i>	<i>Enterobacterales</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Cronobacter</i>
3	B-I	<i>Firmicute</i> <i>s</i>	<i>Bacilli</i>	<i>Bacillales</i>	<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i>
4	B-II	<i>Proteoc</i> <i>eria</i>	<i>Gammaproteo</i> <i>acteria</i>	<i>Enterobacterales</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Citrobacter</i>
5	B-IV	<i>Proteoc</i> <i>eria</i>	<i>Gammaproteo</i> <i>acteria</i>	<i>Pseudomonadales</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Pseudomonas</i>

Em relação aos gêneros *Cronobacter* (isolados 1 e 2) e *Citrobacter* (isolado 4), ambos pertencem à família *Enterobacteriaceae*, são comumente encontrados no intestino humano e de outros animais e estão ligadas a infecções. Possivelmente a presença desse gênero no solo está associada a contaminação por alguma fonte animal, como urina e fezes. Tais fatos tornam sua utilização menos atrativa como agente cicatrizante, o que de fato é observado pela falta de publicações estudando-as.

Dentre os gêneros identificados, *Bacillus* (isolado 3) é amplamente reconhecido por incluir espécies formadoras de esporos, estruturas dormentes altamente resistentes a condições ambientais adversas, como variações extremas de temperatura, pH e disponibilidade de nutrientes. Essas características tornam esse gênero particularmente adequado para aplicações em matrizes cimentícias^(34,35). Corroborando essa afirmação, diversos estudos já empregaram bactérias do gênero *Bacillus* como agentes de autocicatrização em concretos e argamassas^(19,32,36-41).

O gênero *Pseudomonas* (isolado 5) é frequentemente encontrado em ambientes úmidos⁽⁴²⁾ e apresenta um metabolismo altamente diversificado, permitindo sua adaptação a diferentes nichos ecológicos⁽²⁷⁾. Seu metabolismo quimiorganotrófico possibilita a utilização de uma ampla variedade de fontes de carbono, o que justifica seu crescimento na presença de lactato de cálcio⁽⁴³⁾. Assim como *Bacillus*, o gênero *Pseudomonas* já foi investigado no contexto de materiais cimentícios autocicatrizantes, com evidências de sua eficácia na cicatrização de fissuras^(44,45).

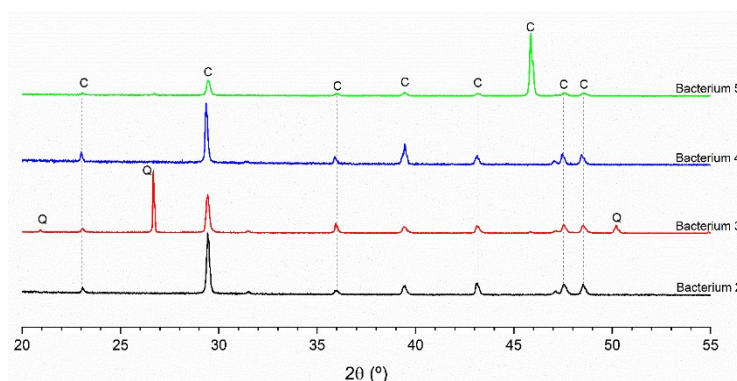
Por outro lado, os gêneros *Cronobacter* (isolados 1 e 2) e *Citrobacter* (isolado 4), ambos pertencentes à família *Enterobacteriaceae*, são comumente encontrados no trato intestinal de humanos e outros animais e estão associados a infecções^(46,47). A presença dessas bactérias no solo pode estar relacionada à contaminação por fontes orgânicas, como urina e fezes⁽⁴⁸⁾. Devido a esses fatores, sua aplicação como agentes de autocicatrização é menos atrativa, o que se reflete na escassez de estudos abordando seu uso em materiais cimentícios.

3.2. Composição mineralógica de cicatrização

Na Figura 6, estão apresentados os difratogramas dos materiais coletados nas fissuras. As amostras produzidas com a bactéria 1 não produziram produtos de cicatrização visíveis, logo, não houve material para ser coletado.



Figura 6 – Difratomogramas dos produtos formados nas fissuras



Fonte: Autores

Todas as amostras apresentaram picos característicos de calcita ($2\theta \approx 29,5^\circ, 39,5^\circ$ e 46°), em conformidade com dados reportados na literatura^(49,50). Este composto foi observado em outros estudos⁽⁴⁹⁾ que utilizaram bactérias para a reparação de fissuras, indicando que as bactérias 2 a 5 possuem capacidade de produzir CaCO_3 e colmatar as fissuras.

No entanto, apenas a amostra contendo a bactéria 3 exibiu picos característicos de quartzo, mineral presente na areia utilizada como agregado miúdo. Esse resultado pode estar associado a uma possível contaminação durante o processo de coleta da amostra⁽⁵⁰⁾.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou o uso de bactérias indígenas, isoladas de solos em contato com cimento Portland, para aplicação na autocicatrização de matrizes cimentícias. Os resultados demonstraram a presença de bactérias dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*, previamente descritas na literatura como agentes capazes de induzir a autocicatrização em compósitos cimentícios. Além desses gêneros, foi identificado *Cronobacter*, uma bactéria associada a doenças em humanos.

No que diz respeito à caracterização mineralógica, todas as bactérias isoladas demonstraram a capacidade de precipitar CaCO_3 como resultado da metabolização do lactato de cálcio. No entanto, em uma análise inicial, as bactérias 3 e 5, pertencentes aos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*, destacam-se como as opções mais tecnicamente viáveis, pois não apresentam riscos à saúde humana. Esse fator é crucial para a aplicação segura na produção de matrizes cimentícias autorregenerantes.

Assim, os resultados deste estudo destacam o potencial da prospecção de bactérias indígenas, oriundas de solos expostos ao cimento Portland, para o desenvolvimento de matrizes cimentícias autocicatrizantes. No entanto, ainda se faz necessária a realização de investigações adicionais, incluindo a análise das propriedades mecânicas e da durabilidade dessas matrizes. Além disso, estudos futuros devem avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso dessas bactérias em escala industrial, garantindo sua aplicação eficiente e sustentável na construção civil.



REFERÊNCIAS

1. THONGCHOM, C. et al. Evaluation of encapsulated *Bacillus subtilis* bio-mortars for use under acidic conditions. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 25947, 29 out. 2024.
2. ZHANG, B. et al. Modified cement-sodium silicate material and grouting technology for repairing underground concrete structure cracks. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 22, p. 680, nov. 2019.
3. HERMAWAN, H. et al. Understanding the Impacts of Healing Agents on the Properties of Fresh and Hardened Self-Healing Concrete: A Review. **Processes**, v. 9, n. 12, p. 2206, 7 dez. 2021.
4. ISSA, C. A.; DEBS, P. Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 157–163, jan. 2007.
5. RAZA, A. et al. Sustainability assessment, structural performance and challenges of self-healing bio-mineralized concrete: A systematic review for built environment applications. **Journal of Building Engineering**, v. 66, p. 105839, maio 2023.
6. AMRAN, M. et al. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. **Materials**, v. 15, n. 9, p. 3214, 29 abr. 2022.
7. REINHARDT, H.-W.; JOOSS, M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 981–985, jul. 2003.
8. NODEHI, M.; OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A. A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. **Journal of Building Engineering**, v. 49, p. 104038, maio 2022.
9. FAHIMIZADEH, M. et al. Multifunctional, Sustainable, and Biological Non-Ureolytic Self-Healing Systems for Cement-Based Materials. **Engineering**, v. 13, p. 217–237, jun. 2022.
10. MELLO, V.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B. F. Técnicas e Metodologias de Biomineralização na Cicatrização de Fissuras do Concreto. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 8, n. 2, p. 164, 30 dez. 2019.
11. JUSTO-REINOSO, I. et al. Air-entraining admixtures as a protection method for bacterial spores in self-healing cementitious composites: Healing evaluation of early and later-age cracks. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126877, abr. 2022.
12. QU, Z. et al. A simple method to create hydrophobic mortar using bacteria grown in liquid cultures. **Construction and Building Materials**, v. 297, p. 123744, ago. 2021.
13. FAHIMIZADEH, M. et al. Biological Self-Healing of Cement Paste and Mortar by Non-



- Ureolytic Bacteria Encapsulated in Alginate Hydrogel Capsules. **Materials**, v. 13, n. 17, p. 3711, 22 ago. 2020.
14. ROSSI, E. et al. Assessment of Functional Performance, Self-Healing Properties and Degradation Resistance of Poly-Lactic Acid and Polyhydroxyalkanoates Composites. **Polymers**, v. 14, n. 5, p. 926, 25 fev. 2022.
 15. ACHAL, V.; MUKERJEE, A.; SUDHAKARA REDDY, M. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1–5, nov. 2013.
 16. ALGAIFI, H. A. et al. Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new *B. pseudomycoides* species. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 967–981, 2021.
 17. CHAERUN, S. K.; SYARIF, R.; WATTIMENA, R. K. Bacteria incorporated with calcium lactate pentahydrate to improve the mortar properties and self-healing occurrence. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.
 18. JOSHI, S.; GOYAL, S.; SUDHAKARA REDDY, M. Bio-consolidation of cracks with fly ash amended biogrouting in concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124044, 2021.
 19. XU, H. et al. Self-Healing Concrete Using Rubber Particles to Immobilize Bacterial Spores. **Materials**, v. 12, n. 14, p. 2313, 19 jul. 2019.
 20. MULLER, V. et al. Analysis of cementitious matrices self-healing with bacillus bacteria. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 4, p. 1–17, 2022.
 21. PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. Tese de Doutorado—São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.
 22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16887: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. 2020.
 23. AMER ALGAIFI, H. et al. Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119258, 2020.
 24. JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230–235, 2010.
 25. LEE, Y. S.; PARK, W. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 7, p. 3059–3070, 2018.



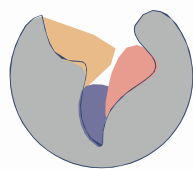
26. ZHANG, J. et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 610–617, 2017.
27. ANDALIB, R. et al. Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, n. August, p. 180–193, 2016.
28. MADIGAN, M. T. et al. **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Grupo A Educação S.A., 2016.
29. RECHE, M. H. L. R. et al. Diversity of culturable Gram-negative bacteria isolated from irrigation water of two rice crop regions in Southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 6, 2016.
30. KUMAR, S.; STECHER, G.; TAMURA, K. MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for Bigger Datasets. **Molecular Biology and Evolution**, v. 33, n. 7, p. 1870–1874, 1 jul. 2016.
31. HALL, T. A. Bioedit: A User Friendly Biological Sequence Alignment Editor and Analysis Program for Windows 95/98/NT. **Nucleic Acid Symposium Series**, n. 41, p. 95–98, 1999.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.
33. PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. [s.l.] Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.
34. TZIVILOGLOU, E. et al. Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. **Construction and Building Materials**, 2016.
35. JENSON, I. *Bacillus*: Introduction. Em: BATT, C. A.; TORTORELO, M. LOU (Eds.). **Encyclopedia of Food Microbiology**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2014. v. 1p. 111–117.
36. JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. **Frankfurter Afrikanistische Blätter**, v. 8, n. 1, p. 49–79, 2011.
37. SHAHEEN, N. et al. Synthesis and characterization of bio-immobilized nano/micro inert and reactive additives for feasibility investigation in self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 492–506, 2019.
38. NIELSEN, S. D. et al. Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 1, p. 365–375, 2020.
39. KHUSHNOOD, R. A. et al. Bio-inspired self-healing and self-sensing cementitious mortar using *Bacillus subtilis* immobilized on graphitic platelets. **Construction and Building**



Materials, v. 316, n. August 2021, p. 125818, 2022.

40. EHRENBRING, H. Z. **Desenvolvimento de Engineered Cementitious Composites (ECC) autocicatrizantes com diferentes fibras poliméricas e agentes de cicatrização**. [s.l.] Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.
41. QIAN, C. et al. Bio-mineralization induced by *Bacillus mucilaginosus* in crack mouth and pore solution of cement-based materials. **Materials Science and Engineering C**, v. 126, n. March, p. 112120, 2021.
42. ZHANG, J. L. et al. Screening of bacteria for self-healing of concrete cracks and optimization of the microbial calcium precipitation process. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 15, p. 6661–6670, 2016.
43. IGLEWSKI, B. H. *Pseudomonas*. Em: BARON, S. (Ed.). **Medical Microbiology**. 4. ed. Galveston: [s.n.].
44. DODD, C. E. R. *Pseudomonas*: Introduction. Em: BATT, C. A.; TORTORELO, M. LOU (Eds.). **Encyclopedia of Food Microbiology**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2014. v. 3p. 244–247.
45. RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of Concrete Using Micro-Organisms. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 1, p. 3–9, 2001.
46. ERŞAN, Y. Ç. et al. Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 159–170, 2016.
47. PATEL, A. K. et al. Enterobacteriaceae, Coliforms and E.Coli: Introduction. Em: BATT, C. A.; TORTORELO, M. LOU (Eds.). **Encyclopedia of Food Microbiology**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2014. v. 1p. 659–666.
48. OLSTEIN, A. et al. Paradigm diagnostics salmonella indicator broth (PDX-SIB) for detection of salmonella on selected environmental surfaces. **Journal of AOAC International**, v. 96, n. 2, p. 404–412, 2013.
49. KOUTSOUMANIS, K. P.; LIANOU, A.; SOFOS, J. N. Food Safety: Emerging Pathogens. Em: **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**. [s.l.] Elsevier Inc., 2014. v. 3p. 250–272.
50. YUAN, H. et al. Application of zeolite as a bacterial carrier in the self-healing of cement mortar cracks. **Construction and Building Materials**, v. 331, n. March, p. 127324, 2022.
51. XU, J.; WANG, X.; WANG, B. Biochemical process of ureolysis-based microbial CaCO_3 precipitation and its application in self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 7, p. 3121–3132, 2018.

MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS



AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM AMBIENTES COM SEVERA AGRESSIVIDADE POR ATAQUE DE CLORETO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.9>

Leonardo Otto Coutinho

Email: leonardo.coutinho@alchemco.com.br

Luiz Otávio Ribeiro Squillace

Email: luiz.otavio@alchemco.com.br

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo apresentar a utilização do concreto autocicatrizante regenerativo no aumento da durabilidade de estruturas e concreto armado, visto que a sua deterioração principalmente em ambientes de severa agressividade causa enormes custos de manutenção, sendo um dos desafios mais críticos na engenharia civil. Nesse contexto, tecnologias inovadoras, como o uso de concretos autocicatrizantes, surgem como alternativas promissoras para mitigar os impactos desses agentes. Esse artigo apresentará e discutirá os resultados protetivos contra a penetração de íons cloreto, obtidos através da comparação entre corpos de prova de referência e de corpos de prova em que o silicato modificado por enzimas (autocicatrização regenerativa) ensaiados segundo ASTM C1202.

Palavras-chaves: ataque de íons cloreto, aumento de durabilidade, concreto autocicatrizante regenerativo, mitigação das manifestações patológicas.

ABSTRACT

This article aims to present the use of regenerative self-healing concrete to increase the durability of structures and reinforced concrete, especially in severely aggressive environments, causes enormous maintenance costs, being one of the most critical challenges in civil engineering. In this context, innovative technologies, such as the use of self-healing concrete, emerge as promising alternatives to mitigate the impacts of these agents. This article will present and discuss the protective results against chloride ion penetration, obtained through the comparison between reference specimens and specimens in which the silicate is modified by enzymes (regenerative self-healing) tested according to ASTM C1202.

Palavras-chaves: chloride ion attack, increased durability, regenerative self-healing concrete, mitigation of pathological manifestations.



1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado são amplamente utilizadas na indústria da construção civil sendo através de empreendimentos residenciais, comerciais, industriais e de infraestrutura devido à sua versatilidade, resistência e custo-benefício. No entanto o sucesso desses empreendimentos está diretamente relacionado aos custos necessários para manter o desempenho de serviço dessa estrutura ao longo de sua vida útil de projeto e esses custos estão intimamente ligados aos cuidados e precauções e considerações estipuladas no seu projeto, na sua execução e nas manutenções preventivas, a fim de mitigar os custos de manutenção, maximizando o custo-benefício desses empreendimentos.

Em casos bastante comuns e frequentes no Brasil, essas estruturas de concreto armado se localizam em ambientes com severa agressividade ambiental e esse tipo de ambiente potencializa o desgaste e abrevia a vida útil dessas estruturas, principalmente se não possuírem um plano de monitoramento periódico e um planejamento de manutenções. Dentre os ambientes mais agressivos têm-se o ambiente marinho que será objeto desse estudo, onde a durabilidade dessas estruturas de concreto armado está intimamente ligada à proteção das armaduras de aço contra agentes agressivos, tais como cloretos e dióxido de carbono, que tem um grande potencial de acelerar o processo de corrosão, impactando diretamente no desempenho em serviço da estrutura e na sua vida útil.

SITTER (1984) introduziu uma teoria fundamental sobre a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado, através de um modelo que dentre outros fatores, considera a degradação por corrosão de armaduras devido à penetração de cloretos ou carbonatação. Seu modelo divide a vida útil em duas fases principais: período de iniciação, durante o qual agentes agressivos, como cloretos, penetram na matriz cimentícia até atingir a armadura, e período de propagação, onde a corrosão efetiva compromete o desempenho estrutural. O mesmo autor destacou que a proteção adicional pode atrasar significativamente o período de iniciação, reduzindo os custos associados a reparos e reabilitações.

Portanto, um dos principais fatores a serem analisados visando manter pelo maior período de tempo possível a integridade estrutural, é como a estrutura irá se comportar no ambiente agressivo onde se encontra e como sistemas adicionais de proteção poderão beneficiar na redução das manutenções e no aumento da vida útil em serviço desse empreendimento. Somente calculando a relação entre os custos relacionados à utilização de uma proteção adicional à estrutura de concreto armado versus a redução dos custos de manutenção, recuperação estrutural e dos custos indiretos em essa estrutura não estar sendo utilizada, é possível verificar se o investimento de proteção adicional irá realmente compensar em médio e longo prazo.

Sendo assim, o entendimento da importância de sistemas adicionais de proteção, como possuir um concreto mais denso (com menor porosidade, menor índice de vazios) ou a utilização de revestimentos, tratamentos superficiais ou barreiras físicas, é essencial para prolongar a vida útil dessas estruturas e, consequentemente, aumentar a rentabilidade do investimento ao longo do tempo, melhorando de sobremaneira o custo-benefício do empreendimento para o investidor. TUUTTI (1982) apresenta um modelo de degradação,



com ênfase na relação entre o ambiente de exposição e a velocidade de deterioração da estrutura de concreto armado. Outros estudiosos corroboram a relevância de estratégias de durabilidade para gestão de ativos, visando prever a durabilidade da estrutura no ambiente em que se encontra. METHA E MONTEIRO (2006) discutem que concretos com baixa permeabilidade e adições minerais, aliados a proteções extras, podem mitigar a penetração de agentes agressivos. NEVILLE (1995) complementa que a durabilidade é uma propriedade crítica para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental dos projetos de engenharia. Investidores de todos os setores podem beneficiar-se da aplicação dessas estratégias de proteção, já que a redução dos custos de manutenção ao longo da vida útil de uma estrutura está diretamente associada à mitigação de danos causados por processos de corrosão. A implementação de uma gestão proativa de durabilidade, combinando soluções técnicas e boas práticas construtivas, representa um diferencial competitivo, assegurando maior confiabilidade e sustentabilidade ao empreendimento. Desta forma, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre corpos de prova de referência e corpos de prova com a utilização do aditivo modificado por enzimas, e determinar a eficácia dessa tecnologia na mitigação da migração dos íons cloreto dentro da matriz cimentícia, aumentando assim a durabilidade da estrutura de concreto armado.

2. CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO MODIFICADO POR ENZIMAS

Primeiramente é importante diferenciar a relação entre aditivo e adição nas estruturas de concreto. Essa diferença está relacionada à forma de uso, composição e finalidade de cada material no processo de mistura e produção do concreto. No caso dos aditivos, são produtos químicos adicionados geralmente em pequenas quantidades (em relação a massa de cimento), a fim de alterar suas propriedades no estado fresco ou endurecido, permitindo melhorar a trabalhabilidade (plastificantes ou superplastificantes), reduzir o consumo de água (redutores de água) retardar ou acelerar o tempo de pega (aceleradores ou retardadores de pega), reduzir a permeabilidade e aumentar a durabilidade, controlar a expansão e retração do concreto. Já as adições, são materiais minerais finamente divididos incorporados ao concreto em quantidades relativamente maiores (em relação a massa de cimento), com o objetivo de melhorar algumas características específicas, como resistência, durabilidade e sustentabilidade, tais como as pozolânicas (sílica ativa, metacaulim), as cimentícias (escória de alto-forno) e as inertes (calcário moído).

Desta forma, o aditivo modificado por enzimas, também conhecido como aditivo autocicatrizante regenerativo, segundo o fabricante do material, foi inventado em Dakota do Norte nos Estados Unidos da América pelo químico Curtis Nelson em 1975. A base química desse aditivo modificado por enzimas é de silicatos modificados por enzimas, tecnologia esta que permite a formação de gel C-S-H hidroreativo dentro dos poros vazios e capilares da estrutura de concreto armado e as enzimas presentes na composição química desse material, mantém o gel C-S-H hidroreativo em estado de gel, não permitindo que ele se cristalice como ocorre na reação química de outros silicatos no concreto. Esse material é comercializado em estado líquido e é aplicado por pulverização no concreto endurecido, normalmente após a cura do concreto. Essa tecnologia que se mantém em estado de gel dentro da matriz cimentícia, proporcionando diversos benefícios à estrutura de concreto armado, ressaltados



principalmente em ambientes de severa agressividade, onde a porosidade, a interconectividade entre os poros, vazios e capilares e a permeabilidade do concreto são os fatores decisivos no impacto em que o meio ambiente agressivo irá degradar as estruturas de concreto armado.

De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, essa característica singular na permanência da reação química do silicato modificado por enzimas com o concreto em estado de gel C-S-H hidroreativo nos vazios da matriz cimentícia, permite que diversas das características físico-químicas do concreto sejam melhoradas, entre elas, aumento de resistência à compressão, proteção contra ataque de íons cloreto, carbonatação, eflorescência, ataque de sulfato, ataque de ureia, dentre outras agressividades ambientais. Permanecendo em estado de gel C-S-H hidroreativo, esse material acompanha as dilatações térmicas da estrutura e continua reagindo toda vez que entra em contato com a umidade ou com a água, e as enzimas presentes no material, mantém o mesmo com capacidade de continuar expandindo caso haja novos vazios na estrutura de concreto armado com a limitação de fissuras passivas de até 0,4mm, limitação essa normatizada na NBR 6118 (2024), em seu capítulo 13.4, informa que a abertura máxima característica das fissuras pode variar de 0,2mm a 0,4mm dependendo da agressividade ambiental em que a estrutura de concreto armado se encontra, sem que haja um desgaste significativo na corrosão das armaduras. Além dessa capacidade de acompanhar o trabalho da estrutura de concreto armado e continuar selando fissuras passivas futuras de até 0,4mm, segundo o fabricante, esse material é inodoro, incolor e atóxico, possui atestado de potabilidade e também possui um PH alcalino igual a 11,7, portanto auxilia na manutenção do PH elevado do concreto, protegendo assim a passivação das armaduras.

2. ENSAIO ASTM 1202 C-18

O ensaio ASTM C 1202-18, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, é amplamente utilizado na avaliação da durabilidade do concreto em relação à penetração de íons cloreto, que são um dos principais agentes causadores de corrosão nas armaduras de estruturas de concreto armado.

Esse ensaio consiste na determinação da resistência elétrica do concreto à penetração de íons cloreto, fornecendo um indicativo indireto da permeabilidade do concreto através da carga elétrica passante na amostra analisada. Esse indicativo indireto é um parâmetro fundamental em demonstrar qual será durabilidade dessa estrutura de concreto armado mediante a agressividade ambiental em que se encontra. Portanto, esse parâmetro é essencial para prever a durabilidade e vida útil de estruturas sujeitas a ambientes de severa agressividade.

O ensaio segundo a ASTM C 1202-18, mede a quantidade de carga elétrica (em Coulombs) passante por um corpo de prova cilíndrico (geralmente com 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro) de concreto saturado com água, as extremidades do corpo de prova são expostas a soluções diferentes: sódio (NaCl) de um lado e hidróxido de sódio (NaOH) do outro. Após esse procedimento, o corpo de prova cilíndrico é submetido a uma diferença de potencial constante de 60 V durante 6 horas, onde a carga elétrica total que atravessa o concreto durante o ensaio é calculada. Obtém-se então um resultado do valor de Coulombs,



que é a carga elétrica total passante no corpo de prova cilíndrico e esse resultado apresenta uma classificação em categorias de permeabilidade com relação a penetração dos íons cloreto na estrutura de concreto armado, de acordo com a Tabela 1, a saber : agressividade ambiental desprezível menor que 100 Coulombs, agressividade ambiental muito baixa de 100 a 1.000 Coulombs, agressividade ambiental baixa de 1.000 a 2.000 Coulombs, agressividade ambiental moderada de 2.000 a 4.000 Coulombs e agressividade ambiental elevada acima de 4.000 Coulombs.

Tabela 1 – Classificação do concreto quanto à penetrabilidade a íons cloreto.

Carga passante, em Coulombs (C)	Classificação do concreto quanto à penetrabilidade a íons cloreto, de acordo com a ASTM C 1202 (ASTM, 2018)
>4000	Elevada
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
<100	Desprezível

Portanto através desse ensaio é possível avaliar o concreto em projetos sujeitos a ambientes marinhos, além de realizar um controle de qualidade em concretos com diferentes aditivos ou adições e também é possível determinar uma estimativa do tempo de vida útil até que haja o início da corrosão das armaduras.

Sendo assim, o fabricante disponibilizou um ensaio realizado sob a ASTM 1202 C-18, a Tabela 2 apresenta os ensaios dos corpos de prova realizados, onde a identificação das amostras 306-19-REF, se refere as amostras de referência, e a identificação das amostras 306-19 se refere as amostras com a aplicação do silicato modificado por enzimas, comparativo de material proposto por esse artigo.

As amostras foram moldadas com traço de 1:2,44:2,14:1,43:0,6 (cimento:areia:brita 1:brita 2:água), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Traço para a moldagem das amostras.

Material	Proporção	Kg/m ³
Cimento	1	280,00
Areia	2,44	683,20
Brita 1	2,14	599,20
Brita 2	1,43	400,40
Água	0,6	168,00

Após a sua moldagem, os corpos de prova foram curados por 28 dias e, após a cura, as amostras foram secas por 34 dias. Separou-se os corpos de prova de referência (306-19 REF) e aplicou-se o silicato modificado por enzimas de forma pulverizada a uma taxa de 200 mL/m² nos corpos de prova 306-19, após a aplicação do silicato modificado por enzimas, fez-se a hidratação desses corpos de prova por três dias e colocou-se as amostras por mais 28 dias de



cura úmida, com umidade de 100% e temperatura ambiente de, aproximadamente, 22 °C, antes de realizar o ensaio ASTM 1202 C-18. Todos os corpos de prova (306-19 REF e 306-19) foram submetidos aos mesmos procedimentos de preparação, a única diferença entre aos corpos de provas foi a aplicação do silicato modificado por enzimas nos corpos de provas 306-19.

O resultado do ensaio da ASTM 1202 C-18 é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistência à penetração de íons cloreto, carga+w elétrica passante (Coulombs)

Identificação das amostras	Resultados, em Coulombs (C)		
	Ensaio A	Ensaio B	Média
306-19-REF	6292	6307	6300
306-19	3502	2305	2904

A Tabela 3 apresenta que os corpos de prova de referência, com a identificação de amostra 306-19 REF tiveram em média uma passagem de carga elétrica de 6.300 Coulombs, ou seja analisando esse valor na Tabela 1, o a agressividade ambiental em que essa amostra se encontra é de elevada agressividade (elevada agressividade > 4.000 Coulombs). Quando o mesmo ensaio é realizado nas amostras 306-19, o resultado médio que é obtido é de 2.904 Coulombs, ou seja 46% menor que o obtido nas amostras 306-19 REF, portanto, analisando novamente a Tabela 1, é possível identificar que a agressividade ambiental em que esses corpos de provas (306-19) estariam seria de moderada agressividade (2.000 Coulombs < moderada agressividade > 4.000 Coulombs), de acordo com a ASTM 1202 C-18.

Essa redução na passagem de carga elétrica obtida através desse ensaio, decorre da formação do gel C-S-H hidrossolúvel que o silicato modificado por enzimas realizou com a estrutura de concreto armado, preenchendo os seus poros, vazios e capilares, que foi capaz de impedir 46% da carga elétrica passante nos corpos de prova com a aplicação do silicato modificado por enzimas, amostras 306-19.

3. CONCLUSÃO

Os resultados protetivos do silicato modificado por enzimas ou aditivo autocicatrizante regenerativo são bastante claros. De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, o gel C-S-H hidrossolúvel formado internamente na matriz cimentícia, proporciona uma monolitividade maior à estrutura de concreto armado, possuindo uma penetração de até 2,0cm de profundidade. O gel C-S-H hidrossolúvel formado cria uma barreira física na passagem de carga elétrica passante, capaz de impedir fisicamente a passagem de íons cloretos conforme resultados apresentados no ensaio da ASTM 1202 C-18. Sua capacidade hidrossolúvel chama bastante a atenção pois segundo o fabricante, o material continua reagindo por toda a vida útil da estrutura de concreto armado, portanto traz um benefício de proteção muito significativo na manutenção da integridade estrutural e na redução de custos de manutenção.

Além disso, com relação ao ataque de cloreto, três fatores são fundamentais para que ocorra



o processo de corrosão das armaduras, a saber: íons cloreto, oxigênio e água, sem um desses fatores, a reação eletroquímica não ocorre. Helene (1993), afirma que para que ocorra a corrosão das armaduras em concreto armado, há a necessidade da presença simultânea de três fatores, a saber: íons cloreto, oxigênio e umidade. É possível verificar então que as estruturas de concreto armado submersas não corroem, pois não existe a presença de oxigênio nos casos de estruturas submersas. Já nas estruturas expostas ao ambiente, quanto mais próximas ao mar ou tenham um impacto de maresia (devido ao vento) muito grande, maior será a deterioração da estrutura e maior será a necessidade de manutenções.

Outro aspecto que o silicato modificado por enzimas proporciona dentro da estrutura de concreto armado, é que esse material reage com a água até 2,0cm dentro do concreto, toda vez que entrar em contato com a água ou umidade, e o gel C-S-H hidreoreativo que já está dentro dos poros vazios e capilares da estrutura de concreto armado, não permite que a água penetre mais profundamente na estrutura, portanto, como o cobrimento nominal mínimo de 25mm para lajes e de 30mm para vigas e pilares para estruturas de concreto armado inseridas em um ambiente de moderada agressividade (ambiente urbano), classe de agressividade II de acordo com as Tabelas 6.1, 7.1 e 7.2 da NBR 6118 (2024). Já empreendimentos inseridos em ambiente marinho ou ambiente industrial, ambientes de forte agressividade, classe de agressividade III, devem possuir o cobrimento nominal mínimo de 35mm para lajes e de 40mm para vigas e pilares nas suas estruturas de concreto armado de acordo com as Tabelas 6.1 e 7.2 da NBR 6118 (2024).

Desta forma, a aplicação do o silicato modificado por enzimas, formando o gel C-S-H hidreoreativo nos primeiros 2,0cm da superfície de concreto, que ao impedir que a água passe por esse gel C-S-H hidreoreativo, não permitirá que a água encontre a armadura na estrutura de concreto armado, sendo assim, é um fator fundamental para impedir o processo de corrosão na estrutura, mantendo a sua integridade estrutural.

É fundamental realizar outros ensaios a fim de se analisar o impacto da utilização do silicato modificado por enzimas em outras características físico-químicas das estruturas de concreto armado, pois uma vez que o gel C-S-H hidreoreativo, não permite o ingresso mais profundo da água na estrutura de concreto armado, diversas outras manifestações patológicas podem ser mitigadas ou evitadas, uma vez que a porosidade e a presença de água dentro da matriz cimentícia são dois fatores fundamentais para que essas manifestações ocorram e esse gel C-S-H hidreoreativo entra como uma solução que preenche esses vazios com o gel e impede a penetração de água na estrutura de concreto armado.

REFERÊNCIAS

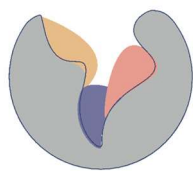
1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C1202 – **Standard test method** for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Washington, 2018.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

3. HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado** (Tese de Livre-Docência). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
4. METHA, P. K., & Monteiro, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill Education, 2014.
5. NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete (4ª ed.)**. Pearson Education, 1995.
6. SITTER, H. **Service life prediction of concrete structures under different environmental conditions**. In Proceedings of the International RILEM Symposium on Durability of Concrete. Stockholm, Sweden, 1984.
7. TUUTTI, K. E. **Corrosion of Steel in Concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete. Research Institute, 1982.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

CHARACTERIZATION OF THE RECOVERY OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PRODUCED BY AUTOGENOUS HEALING

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.10>

Sidiclei Formagini

Email: sidiclei.foragini@ufms.br

Marta Roig-Flores

Email: roigma@uji.es

Hesam Doostkami

Email: hedoo@doctor.upv.es

Pedro Serna Ros

Email: pserna@cst.upv.es

RESUMO

A cicatrização autógena é um potencial intrínseco dos materiais cimentícios que torna possível o auto reparo parcial ou total das propriedades iniciais. Este trabalho avalia o efeito da cura autógena medida por meio de recuperação das propriedades mecânicas (tensão e rigidez) em prismas de 100x100x500mm de concretos fibroso convencional e de alto desempenho. Os prismas foram pré-fissurados para ter uma abertura de fissura de $200 \pm 50 \mu\text{m}$ e recarregados após um período de cura especificado sob diferentes condições: imersão em água por 28 e 56 dias. Os resultados mostram que os efeitos da cura autógena são detectáveis com a metodologia seguida, mas a extensão da recuperação obtida é pouco significativa Independente do tempo de cura.

Palavras-chaves: cicatrização autógena, autocicatrização, recuperação.

ABSTRACT

Autogenous healing is an intrinsic potential of cementitious materials to regain initial properties, partially or totally. This work evaluates the effect of the autogenous healing measured by means of the recovery of mechanical properties (stress and stiffness) in prisms of 100x100x500 mm of a ordinary and a high-performance concrete. Prisms were pre-cracked to have a crack width of $200 \pm 50 \mu\text{m}$ and then reloaded after a specified healing period under different conditions: 28 and 56 days in water immersion. The results show that autogenous healing effects are detectable with the methodology followed, but the extent of the recovery obtained is low significant.

Palavras-chaves: autogenous healing, self-healing, recovery.



1. INTRODUCTION

Reinforced concrete structures are widely used around the world, mainly in foundation elements, sub-pressure slabs, water reservoirs, channels in contact with groundwater, rainwater or wastewater. During the construction phase, cracks can appear on concrete surface, and their size can grow with the increase in mechanical stress and become a critical problem in terms of durability in aggressive environments [1]. Cracks occur at early ages due to tensile stresses resulting from temperature, shrinkage, or internal matrix-aggregate restrictions [2], as well as a decrease on long-term performance of concrete structures due to the application of mechanical stresses (bending or shear) that exceed their tensile strength. Under service conditions, cracks are not common in the compressed region of structural elements because the compression effect tends to close them.

Once concrete is cracked, its mechanical properties, durability, and working life can be decreased [3,4]. To mitigate these losses, concrete healing can be a way of reducing the cost of loss of properties due to damage and restoring them. Concrete has a natural self-healing capability able to seal small cracks, named autogenous healing, that is mainly produced by continuing hydration and carbonation [4, 5]. However, this self-healing capability is limited, and therefore, it is typically disregarded in the design of concrete structures. Recent studies have attempted to surpass the limitations of autogenous healing in two ways. The first way is developing concrete compositions to improve autogenous healing or designing specific products to achieve self-healing, also known as autonomous self-healing. The latter self-healing products include, among others: crystalline admixtures, micro- or macro-encapsulated agents, and even the use of calcium carbonate-precipitating bacteria. The second way is autonomous healing, which is promoted by the addition of materials designed for this purpose, such as crystalline admixtures, superabsorbent polymers (SAP), bacteria, etc. Regardless of the mechanism, self-healing of concrete can occur at different levels in a crack depending on the filling capacity of the deposition by products of the healing reaction.

A complete healing process should aim to recover not only water tightness but also mechanical recoveries of the damaged and healed zone. Regarding the recovery of mechanical properties, different test setups have been proposed in the literature, and flexural tests are one of the most common. In general, a specimen, usually a prism, is loaded, and the test is stopped at a certain crack width opening or displacement, which will decrease after unloading. Afterward, specimens are left to heal in certain conditions, depending on the self-healing mechanism, and they are tested again. Therefore, assessing the recovery of mechanical properties of concrete involves comparing load-displacement curves of pre-cracked elements with crack opening control to reload-displacement curves after cracks have healed.

Since concrete properties are time-dependent, in order to discern the healing effect from maturing, the choice of the reference property is of high importance, especially for early-age cracking and healing. Different criteria for quantifying mechanical recovery have been considered in the literature, such as the comparison between the initial and final properties of the same specimen or the introduction of accompanying specimens that heal in reference exposure or in the same exposure as the analysed specimens.



Most studies about autogenous healing of concrete showed the lack of a peak load recovery in conventional and high-performance concretes [6,7]. However, several studies detected stiffness recoveries [6,8]. The works [6,9] analyzed UHPFRC specimens, finding stiffness recovery comparing stiffness ratios with and without healing. The “stiffness with healing” corresponded to a cracked and reloaded specimen after the healing process, and the stiffness without healing was the reloading stiffness of a specimen stored at the laboratory that was cracked and immediately reloaded at the final age. Their results showed no regain of mechanical properties when specimens were stored in air, while those stored in water for more than 3 weeks showed stiffness recovery, reaching almost an equal stiffness to the original UHPFRC. Other authors found that concrete healing in warm water at 40°C improved the recovery of mechanical properties if compared with healing in water at 20°C [10] and that high-performance fibre reinforced composites obtained better healing than conventional concrete [2].

The objective of this research is to assess the effectiveness of autogenous self-healing in conventional C30/37 and high-performance concrete C70/85 subjected to wet curing for 28 and 56 days. The study focuses on the detection of the phenomenon, specifically focusing on strength and stiffness. This work aims to investigate the reasonable expected outcomes for autogenous healing in these different qualities of concrete.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

The cement used was CEM I 42.5 R-SR5 from Lafarge. For the high-performance concrete, silica fume provided by Elkem was incorporated. The aggregates used were 0/2 and 0/4 natural sands, and the coarse aggregates were crushed aggregates of size 8/16. To control crack width during both pre-cracking and healing phases, 40 kg/m³ of steel fibres (Dramix® RC 65/35 BN) was used in the two mixes. Additionally, a superplasticizer (SP) ViscoCrete-5970 from Sika was added to achieve the desired workability.

2.2 Concrete Mix Design and Mixing Process

The conventional concrete and high-performance mixtures are denoted as C30/37 and C70/85, respectively. Table 1 shows the mix composition of the concretes. All specimens were demoulded 24 hours after casting. Afterward, they were stored in a humidity chamber at 20°C and RH ≥ 95% until testing.

Table 1: Mix composition of concretes C30/37 and C70/87.

(kg/m ³)	Cement	Silica fume	Sand 0/2	Sand 0/4	Gravel 8-16	Steel fibres	SP	w/c effective
C30/37	280	-	449	535	852	40	2.3	0.66
C70/85	400	40	310	549	875	40	3.8	0.43

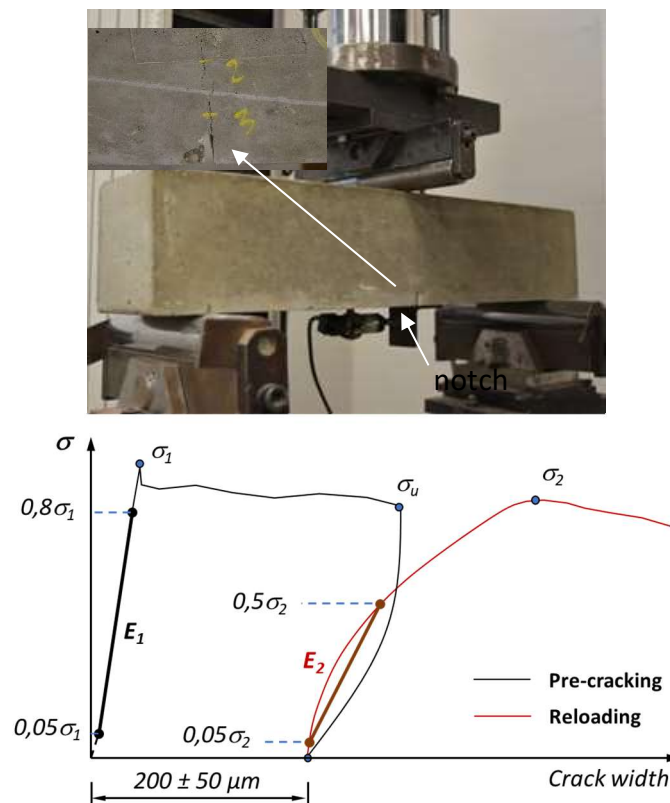
The tests performed to characterize these mixes were: slump test following EN 12350-2 [11], fresh air content following EN 12350-7 [12] and compressive strength at 28 days following EN 12390-3 [13], tested on cubes of 150 mm.



2.3 Pre-cracking and Reloading Procedure

At the age of 28 days, notched prismatic specimens (100×100×500 mm) were pre-cracked by a three-point bending flexural test (adapted from EN-14651 [14]) until the cracks reached pretended openings of $200 \pm 50 \mu\text{m}$ before unloading (Figure 1 left). Three prisms were tested per mix composition and healing condition. An LVDT placed in the bottom part of the prism was used in order to control crack width during the test.

Figure 1 – Three-point bending flexural test and diagram of the pre-cracking and reloading with their strength and stiffness parameters.



From the pre-cracking curve (Figure 1 right) was determined the maximum stress $\hat{\sigma}_1$ and the stress belongs to the initiation of unloading, defined as $\hat{\sigma}_u$, as an additional parameter mentioned [2] to subtract the part of the unloading and healing ratio [15]. Also, maximum flexural stress $\hat{\sigma}_2$ is determined from the reloading curve. The flexural stress ($\hat{\sigma}_1$, $\hat{\sigma}_u$ and $\hat{\sigma}_2$) was calculated as per Eq. (1), where considering the load applied (P), the span between the supports (L) of 400 mm, the width of the prism (b) of 100 mm, the height of the prism (h) of 100 mm, and the height of the notch (e) of 10 mm. Then, the prisms were let to heal during the specified time, and afterwards they were reloaded using the same procedure.

$$\sigma = \frac{3PL}{2b(h-e)^2} \quad (1)$$



The stiffness of the loading and reloading cycle has been observed to detect the stiffness recovery. E_1 , defined as the stiffness of an uncracked specimen, is considered a slope between 5% and 80% of stress at peak ($\dot{\epsilon}_1$). After healing and maturation, the stiffness of cracked concrete upon reloading is characterized (E_2), considered a slope of a line between 5% and 50% of stress at reloading peak ($\dot{\epsilon}_2$).

2.4 Healing and Maturing Conditions

After pre-cracking, the prisms were left to heal in underwater conditions with tap water. Two healing times were analysed: healing for 28 days (H28) and 56 days (H56) in order to verify if the series tested had remaining healing capability. At the moment of the final reloading test, these prisms will have 56 days and 84 days of age, respectively.

2.5 Evaluation of Self-Healing Properties

This work uses two expressions to evaluate the mechanical recovery, one for evaluating the strength recovery and another for the stiffness recovery based on [15]. The first expression is obtained as the ratio of the strength obtained after healing divided by the unloading strength obtained before healing. The second expression is the ratio of the stiffness after healing / stiffness before healing. In both cases, values surpassing 100% mean that the final properties are equal or exceeding the values during the pre-cracking stage. Conversely, positive values but below 100% indicate a partial recovery.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Concrete Characterization

Table 2 presents the slump test results of the entrapped air content for C30/37 and C70/85 and compression strength at the age of 28 days.

Table 2: Results of characterization tests.

Concrete	Slump flow (mm)	Entrapped air (%)	$f_{c,28}$ (MPa)
C30/37	200	1.1	40,7
C70/85	80	0.8	84,0

3.2 Load-displacement Curves

The σ -crack width graphs for both the first loading and unloading, as well as the second loading cycles, are depicted in Figure 2. The bottom crack width range for C30/37 and C70/85 samples obtained from the LVDT varies between 197 and 390 μm and between 198 and 334 μm , respectively. Notably, the C70/85 samples exhibited a superior load-bearing capacity, denoted by a higher load threshold $\dot{\epsilon}_1$ in contrast to the C30/37. The healing effect of the H56 in HPC is more pronounced in $\dot{\epsilon}_2$, presenting better matrix-fibre interaction after the crack appearance, attributed to improved fibre/matrix bonding properties due to healing [16]. This improvement is facilitated by higher proportions of no hydrated cement particles in HPC mixes, which promote enhanced cohesion and interfacial adhesion within the composite material.



3.3 Residual strength recovery as a measure of self-healing

The average stress values for the first loading $\hat{f}_1$, the second loading cycle $\hat{f}_2$, and the stress relation $\hat{f}_2/\hat{f}_u$ separated by the mix concrete type and the healing condition are presented in Table 3. For the samples H28 and H56, the values of stress relation $\hat{f}_2/\hat{f}_u$ are higher than 100%, which means that their stress values are higher than those obtained at unloading. The series C30/37 has very similar results in the series H28 and H56, therefore, it seems that no additional healing is produced during the extended healing time. On the contrary, the series C70/85 experiences an increase in the ratio, which indicates that in this concrete type a prolonged exposure to water immersion may facilitate more effective self-healing processes, potentially due to a higher autogenous healing capacity of the C70/85 concrete mix.

Figure 2 – Experimental curves of σ -crack width for loading, unloading and reloading.

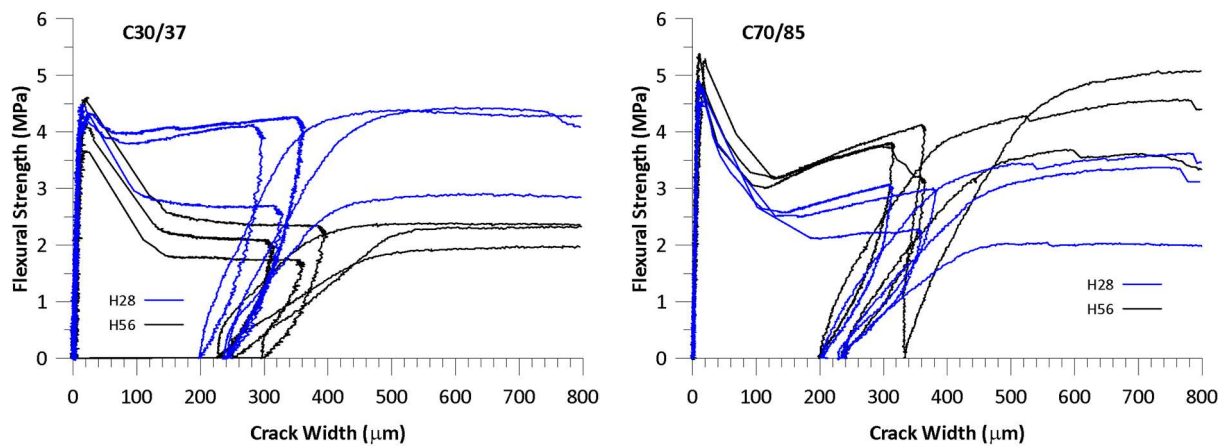


Table 3: Results of characterization tests.

	(MPa)	$\hat{f}_1$	$\hat{f}_u$	$\hat{f}_2$	$\hat{f}_2/\hat{f}_u$
C30/37	H28	3.95 ± 0.38	3.09 ± 0.90	3.38 ± 0.88	1.10 ± 0.05
	H56	4.14 ± 0.47	2.07 ± 0.30	2.24 ± 0.22	1.09 ± 0.08
C70/85	H28	4.75 ± 0.19	2.79 ± 0.44	3.02 ± 0.85	1.07 ± 0.15
	H56	5.52 ± 0.11	3.70 ± 0.49	4.46 ± 0.70	1.20 ± 0.03

3.4 Stiffness recovery as a measure of self-healing

Table 4 shows the flexural stiffness values of the samples in the first (E_1) and second loading cycles (E_2) and the ratio of stiffness recovery E_2/E_1 . In the case of the reloading stiffness, Figure 2 suggests that the reloading curve is not linear. Therefore, in this study the slope in the reloading curve is defined between 5% and 50% of σ_2 . It was observed that E_2 values are significantly lower than E_1 , ranging from 3% to 10% with high dispersion. This result implies that the stiffness recovery is not significative in none of the series, and that it is not influenced by increasing the healing time.



Table 4: Results of characterization tests, average and standard deviation.

	(N/mm ³)	E ₁	E ₂	E ₂ /E ₁ (%)
C30/37	H28	216.08 ± 9.47	18.98 ± 5.99	10.31 ± 2.71
	H56	202.53 ± 29.17	11.79 ± 4.76	5.78 ± 1.99
C70/85	H28	488.36 ± 20.58	14.90 ± 4.08	3.07 ± 0.96
	H56	412.90 ± 103.74	22.12 ± 4.27	5.67 ± 2.27

3.5 Discussion of results of strength and stiffness recovery

The stiffness recovery has been calculated by measuring the slope of the loading curve at 40% of the maximum stress-strain curve, as specified by ACI, etc. Stiffness and stress recovery were determined using direct ratios of the parameters with simple and similar formula for both parameters, ensuring a direct interpretation of the results. The results show a healing effect in the strength of the specimens, but no significant healing was detected in the stiffness. This result contrasts with previous works that detected recoveries in both, strength and stiffness, such as in [16],[17],[18], by autogenous healing using more complex expressions. This work uses expressions similar other works [15], and obtaining slightly higher strength and lower stiffness recoveries. However, to support the reliability of the results due to the high variation obtained, it is recommended to increase the number of specimens tested as well as testing accompanying specimens to differentiate the maturing effect from the healing effect.

4. CONCLUSIONS

The results show that autogenous healing effects are detectable with the methodology followed, but the extent of the recovery obtained has low significance. In the specimens healed underwater for 28 and 56 days, the strength regain is higher than 100%, and an improvement has been detected in high performance concrete. However, no significant effects nor differences between the series tested has been detected in the reloading stiffness nor in the ratio of stiffness recovery, which obtained values from 3% to 11%.

REFERENCES

1. LI, Y., SUN, X., LI, G., ZHANG, J., FANG, D., WANG, X., Impact of concrete face cracks on the saturated and unsaturated seepage behavior of rockfill dams, **Structures**, V. 61 (2024).
2. FERRARA, L., KRELANI, V., MORETTI, F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: From porosity reducers to promoters of self-healing. **Smart Materials and Structures**, 25, p.084002 (2016).
3. DOOSTKAMI, H., FORMAGINI, S., SERNA, P., ROIG-FLORES, M. Effects of healing start time and duration on conventional and high-performance concretes incorporating SAP, crystalline admixture, and sepiolite: A comparative study, **Case Stud. Constr. Mater.** 20 (2024).
4. ROIG FLORES, M. **Self-healing concrete: efficiency evaluation and enhancement with crystalline admixtures**, Dr. Diss. UPV. (2018) 0–239.



5. De BELIE, N., GRUYAERT, E., AL-TABBAA, A., ANTONACI, P., BAERA, C., BAJARE, D., DARQUENNES, A., DAVIES, R., FERRARA, L., JEFFERSON, T., LITINA, C., MILJEVIC, B., OTLEWSKA, A., RANOGAJEC, J., ROIG-FLORES, M., PAINE, K., LUKOWSKI, P., SERNA, P., TULLIANI, J.M., VUCETIC, S., WANG, J., JONKERS, H.M., A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures, **Adv. Mater. Interfaces**. 5 (2018) 1–28.
6. GRANGER, S., LOUKILI, A., PIJAUDIER-CABOT, G. and CHANVILLARD, G., **Mechanical characterization of the self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC)**, In Proceedings Third International Conference on Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat, vol. 5, pp. 22-24 (2005).
7. TITTELBOOM, K. V., GRUYAERT, E., RAHIER, H. and De BELIE, N., Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation, **Construction and Building Materials**, no. 37, p. 349–359 (2012).
8. SNOECK, D. and De BELIE, N., Repeated Autogenous Healing in Strain-Hardening Cementitious Composites by Using Superabsorbent Polymers, **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**, vol. 28, no 1 (2015).
9. GRANGER, S., LOUKILI, A., PIJAUDIER-CABOT, G. & CHANVILLARD, G., 2007. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. **Cement and Concrete Research**, (37), pp.519–27.
10. NA, S.H., HAMA, Y., TANIGUCHI, M., KATSURA, O., SAGAWA, T. & ZAKARIA, M., 2012. Experimental Investigation on Reaction Rate and Self-healing Ability in Fly Ash Blended Cement Mixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, 10(7), pp.240-53.
11. **UNE EN 12350-2:2020**. Testing fresh concrete - Part 2: Slump test.
12. **UNE EN 12350-7:2020**. Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods.
13. **UNE EN 12390-3:2020**. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
14. **UNE EN 14651:2007+A1:2008**. Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
15. LAUCH, K.S., CHARRON, J.P., DESMETTRE, C. Comprehensive evaluation of self-healing of concrete with different admixtures under laboratory and long-term outdoor expositions, **J. Build. Eng.** 54 (2022).
16. HAO, Y., CHENG, L., HAO, H., SHAHIN, M.A. Enhancing fiber/matrix bonding in polypropylene fiber reinforced cementitious composites by microbially induced calcite precipitation pre-treatment, **Cem. Concr. Compos.** 88 (2018) 1–7.
17. FERRARA, L., KRELANI, V., MORETTI, F. Autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs): Part 2 – Correlation between healing of mechanical performance and crack sealing, **Cem. Concr. Compos.** 73 (2016) 299–315.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

18. BULLER, A.S., ABRO, F.U.R., LEE, K.M., JANG, S.Y. Mechanical recovery of cracked fiber-reinforced mortar incorporating crystalline admixture, expansive agent, and geomaterial, **Adv. Mater. Sci. Eng.** (2019).



INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.11>

Natália dos Santos Petry

Email: natalia.petry@ufpel.edu.br

Angela Borges Masuero

Email: angela.masuero@ufrgs.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Email: dmolin@ufrgs.br

RESUMO

A capacidade de autocicatrização de fissuras nas matrizes cimentícias depende de vários fatores: idade de surgimento, espessura, presença de água, entre outros. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do ambiente de exposição na autocicatrização de concretos com diferentes níveis resistências. Foram avaliadas fissuras com espessura entre 100 e 300µm, geradas em concretos com idade de 3 dias e expostas em três diferentes ambientes de cura (natural, submerso e ciclo de molhagem e secagem). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, microscopia ótica e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Como resultado, observou-se que o ambiente submerso favorece a autocicatrização das fissuras.

Palavras-chaves: Autocicatrização, fissuras, ambiente de exposição, submerso.

ABSTRACT

The self-healing capacity of cracks in cement matrices depends on several factors: age of appearance, width, presence of water, among others. This work aims to evaluate the influence of the exposure environment on the self-healing of concretes with different strengths. Cracks with a thickness of 100 - 300µm were evaluated, generated in concrete aged 3 days and exposed in three different curing conditions (natural, submerged and cycle). Compressive strength, optical microscopy and ultrasonic wave propagation speed. As a result, better regeneration rates were observed in cracks exposed in the water-curing environment.

Palavras-chaves: Self-healing, cracks, exposure environment, water curing.



1. INTRODUÇÃO

Os concretos empregados nas estruturas fissuram por diversos fatores, ocorrendo tanto na passagem do estado fresco para o estado endurecido, quanto ao longo da sua vida útil⁽¹⁾. Considerando que as fissuras são porta de entrada para os agentes agressivos, encontrar maneiras de vedar as fissuras é uma forma de contribuir para um aumento em sua vida útil⁽²⁾.

Atualmente, há materiais e tecnologias que podem auxiliar no fechamento de fissuras. Dentre as possibilidades tem-se o emprego de injeção de resina, opção de alto custo. Contudo, o próprio concreto apresenta características que podem contribuir para o selamento das fissuras, este fenômeno é conhecido como autocicatrização.

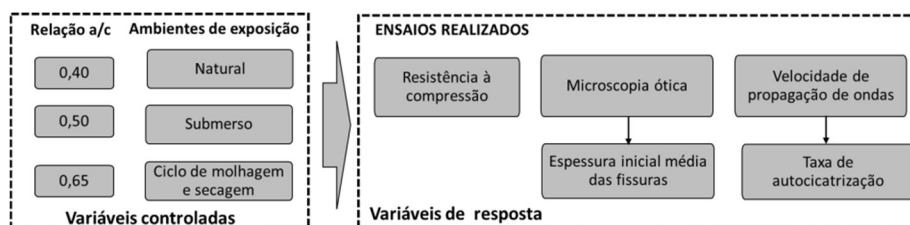
O RILEM 221 SHC⁽³⁾ define autocicatrização como qualquer processo do próprio material envolvendo sua reparação e/ou melhoria de desempenho. Este comitê também estabelece uma classificação mais simplificada quanto aos fenômenos, sendo eles, a cicatrização autógena e a cicatrização autônoma.

Ao longo dos últimos anos, vários trabalhos têm sido propostos para investigar a autocicatrização em pastas, argamassas e compósitos cimentícios^(4, 5, 6, 7, 8). Muitos estudos focam na utilização de um elemento adicionado a matriz cimentícia visando o efeito da autocicatrização, tais como: aditivos cristalizantes^(9,10,11), bactérias^(12,13), nanotubos, polímero superabsorventes⁽¹⁴⁾, entre outros. Mas poucos trabalhos estudam a cicatrização em concreto, visto a complexidade na geração das fissuras, também observa-se a redução de pesquisas que avaliam a relação do ambiente de exposição e da resistência dos concretos frente a capacidade de cicatrização. Assim, o presente artigo tem como objetivo avaliar a influência do ambiente de exposição na autocicatrização de concretos com diferentes resistências.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental empregado nesta pesquisa está delineado na Figura 1.

Figura 1 – Programa experimental



Fonte: Autor

2.1 Materiais empregados

Foi utilizado cimento Portland composto com fíler, CP II-F, classe de resistência de 40 MPa, com a seguinte caracterização: área específica de 5,786m²/g, diâmetro médio de 12,84 µm, massa específica de 3,11 g/cm³, tempo de pega de 220min (início de pega) e 275min (fim de pega), resistência à compressão de 31MPa aos 3 dias, 38MPa aos 7 dias e 43,4MPa aos 28 dias



e perda ao fogo de 5,2%. A caracterização química é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química do cimento Portland composto com fíler (CP II F 40)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	ZnO	CO ₂
66,48	12,78	3,77	6,84	4,13	1,45	1,19	0,20	0,09	0,06	2,93

Como agregado miúdo foi utilizado areia lavada, com módulo de finura de 1,89, diâmetro máximo de 2,36mm, massa específica de 2,54 g/cm³, absorção de água de 1,3% e massa unitária de 1,49 g/cm³. O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica, com dimensão máxima de 12,50mm, massa específica de 3,01 g/cm³, absorção de água de 1,2% e massa unitária de 1,51g/cm³. O aditivo superplastificante, com base química de policarboxilato, com massa específica de 1,008g/cm³ e teor de sólidos de 49,28%.

2.2 Produção dos concretos e preparação dos corpos de prova

A Tabela 2 apresenta os traços unitários dos concretos empregados, obtido através do método de dosagem IPT/EPUSP⁽¹³⁾, com teor de argamassa determinado experimentalmente de 52%.

Tabela 2 – Proporcionalamento dos concretos.

Traço unitário					Materiais utilizados na mistura				Abatimento (mm)	Consumo cimento real (kg/m ³)
m	Cimento	Areia	Brita	a/c	cimento (kg)	areia (kg)	brita (kg)	Aditivo (g)		
3,55	1	1,37	2,18	0,40	9,15	12,51	20,00	19,68	220±10	481
4,54	1	1,88	2,66	0,50	7,52	14,15	20,00	16,17		390
6,03	1	2,65	3,37	0,65	5,93	15,74	20,00	12,75		287

Após o preparo do concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100x200mm para o ensaio de resistência à compressão e corpos de prova prismáticos com 100x100x50mm para os ensaios de velocidade de propagação de ondas e microscopia ótica. Eles foram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, com o topo protegido. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida com temperatura de 23±2°C e umidade maior ou igual a 95%, onde permaneceram até as datas dos experimentos.

2.3 Abertura das fissuras

Para a realização da abertura das fissuras nos prismas foi adotada a metodologia descrita por Petry (2021)⁽¹⁶⁾, utilizando um aparato desenvolvido pelo Grupo de autocicatrização do NORIE/UFRGS (Patente BR 10 2019 007947 9). A indução da fissura ocorreu 3 dias após a produção dos concretos, visando simular a ocorrência de fissuras em idades iniciais, que podem ser resultantes da retração ou da desforma precoce da estrutura de concreto.

2.4 Ambientes de exposição

Após a indução da fissura, os concretos foram acondicionados em três ambientes de exposição: ambiente natural, área aberta com incidência direta das intempéries, com orientação a noroeste-sudeste, na cidade de Porto Alegre/RS, Latitude: -30.0535, Longitude: -51.1748 e Altitude: 41,18, com espaçamento de 5cm entre os corpos de prova; ambiente



submerso, água potável sem renovação, em local com temperatura e umidade não controlados, mantendo sempre uma lâmina de água de pelo menos 3cm sobre os corpos de prova; e ambiente de ciclo de molhagem e secagem, onde os corpos de prova foram submersos em água potável por um período de 2 dias seguido por 12 dias em ambiente seco em câmara com temperatura e umidade controladas.

2.5 Ensaios realizados

Foi empregado o ensaio de resistência à compressão para caracterizar o concreto. A análise por microscopia ótica foi utilizada para quantificar a faixa inicial de abertura das fissuras e o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) para avaliar a ocorrência da autocicatrização autógena.

2.5.1 Resistência à compressão

Foi realizado conforme a NBR 5739⁽¹⁷⁾, na idade de abertura da fissura (3 dias), sendo ensaiados 3 corpos de prova para cada combinação.

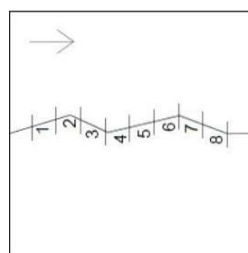
2.5.2 Análise por microscopia ótica

Utilizou-se o microscópio óptico Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x. Para a aplicação da metodologia proposta, os corpos de prova prismáticos foram divididos em oito microzonas, com 8mm cada, conforme metodologia elaborada pelo grupo de autocicatrização NORIE/UFRGS e aplicados nos estudos de Cappellesso (2018)⁽¹⁸⁾, Arnold (2019)⁽¹¹⁾ e Petry (2021)⁽¹⁶⁾. A Figura 2 exemplifica a metodologia adotada.

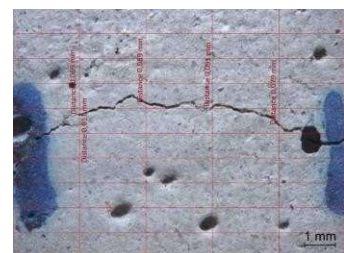
Figura 2 - Metodologia para quantificação da espessura inicial da fissura por microscopia ótica (a) vista geral com marcação das microzonas; (b) representação esquemática; (c) medições e espessuras de fissura.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

2.5.3 Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU)

Adotou-se transdutores de 28 mm de diâmetro e frequência de 150 kHz. As medições foram realizadas antes da indução da fissura, considerado como leitura de referência para o parâmetro da autocicatrização. Após a abertura da fissura foi realizada novamente a leitura, em seguida os corpos de prova foram acondicionados em seus respectivos ambientes de exposição. Para realizar o acompanhamento ao longo do tempo, os corpos de prova foram submetidos ao VPU a cada 28 dias após 112 dias de autocicatrização em cada ambiente de cura. Com os dados levantados, a partir da metodologia descrita por Petry (2021)⁽¹¹⁾ foi possível



determinar a taxa de autocicatrização das fissuras.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho.

3.1 Resistência à compressão

Na Tabela 3 constam os resultados de resistência à compressão dos concretos aos 3 dias de idade. Conforme esperado, observa-se a redução na resistência à compressão dos concretos como o aumento da relação água/cimento.

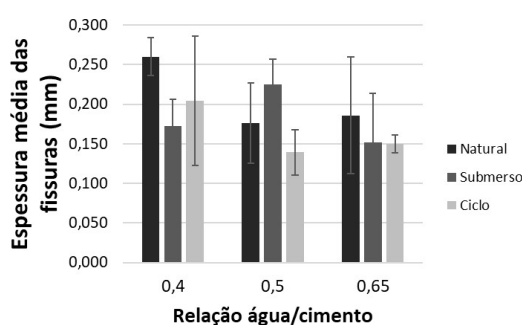
Tabela 3 – Média da resistência à compressão aos 3 dias de idade dos concretos.

a/c	0,4	0,5	0,65
Média	29,14	25,94	20,18
DV (MPa)	1,63	1,02	0,65
CV (%)	5,59	3,94	3,20

3.2 Espessura média das fissuras

A partir das análises realizadas por microscopia ótica foi possível quantificar a espessura média das fissuras. A Figura 3 apresenta este resultado, considerando a relação água/cimento e o ambiente de exposição ao qual os concretos foram acondicionados após a indução da fissura.

Figura 3 - Espessura média das fissuras para os ambientes de exposição: natural, submerso e ciclo para as diferentes relações a/c.



Como o trabalho se propõe a estudar fissuras com faixa de abertura entre 100 e 300µm, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA), apresentada na Tabela 4, com fatorial cruzado na ferramenta Statistica 8, visando assegurar que estatisticamente a espessura média da fissura não está sendo influenciada pela relação água/cimento e que a distribuição aleatória dos corpos de prova nos ambientes exposição também não impacta na variável em análise.



Tabela 4 - ANOVA espessura média das fissuras.

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Ambiente de exposição	0,014815	2	0,007407	2,5332	0,092074	NS
Relação água/cimento	0,017820	2	0,008910	3,0472	0,058647	NS
Ambiente de exposição*Relação a/c	0,024544	4	0,006136	2,0985	0,098991	NS
Error	0,116962	40	0,002924			

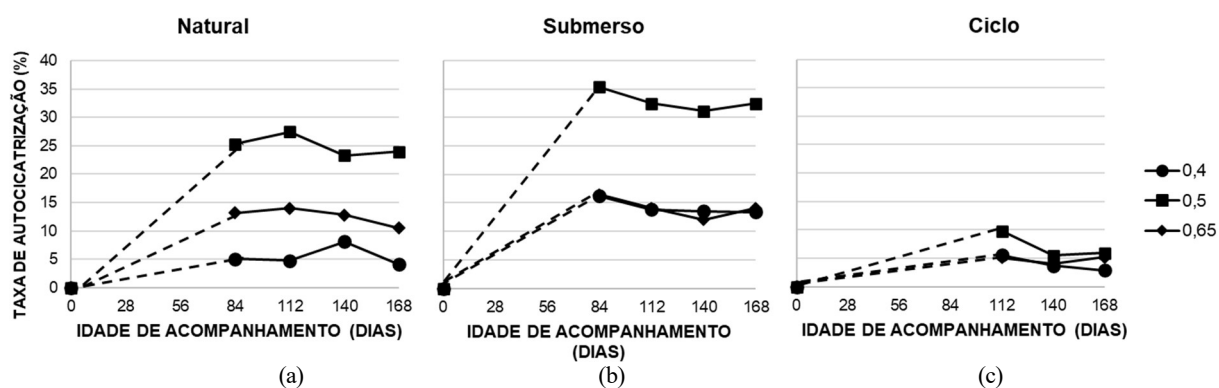
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Observa-se que nenhum efeito foi considerado significativo, assegurando que se pode comparar as fissuras em igualdade de condições e avaliar de forma isolada: o efeito da relação água/cimento e o ambiente de exposição frente a autocicatrização, uma vez que a espessura da fissura é fator que influencia de forma direta na autocicatrização autógena^(19,20,21).

3.3 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A Figura 4 mostra a taxa de autocicatrização ao longo do tempo de acompanhamento das fissuras, em cada ambiente de exposição e para cada relação água/cimento estudada.

Figura 4 – Taxa de autocicatrização de fissuras para diferentes relações água/cimento e ambiente de exposição ao longo do tempo. (a) natural; (b) submerso; (c) ciclo de molhagem e secagem



Observa-se que o ambiente submerso na relação a/c 0,50 apresentou melhores taxas de autocicatrização, quando comparado a todo o conjunto. Avaliando a condição de exposição Natural, nota-se que a relação 0,50 respondeu melhor à autocicatrização, seguida pela a/c 0,65 e 0,40. O ambiente ciclo de molhagem e secagem foi o que apresentou menor influência sobre a taxa de autocicatrização, fato que não era esperado, visto que na literatura diversos autores^{3,6,9,19,23} utilizam em seus estudos esta condição, afirmando ser a maneira mais adequada de promover a autocicatrização das matrizes cimentícias.

Foi realizada uma Análise de variância (ANOVA), com fatorial cruzado na ferramenta *Statistica 8*, para compreender a influência da relação água/cimento e do ambiente de exposição sobre a autocicatrização autógena. Os resultados estão demonstrados na Tabela 5, onde pode-se observar que



os dois parâmetros avaliados, de forma isolada, exercem influência significativa sobre o fenômeno da autocicatrização.

Tabela 5 – ANOVA da taxa de autocicatrização.

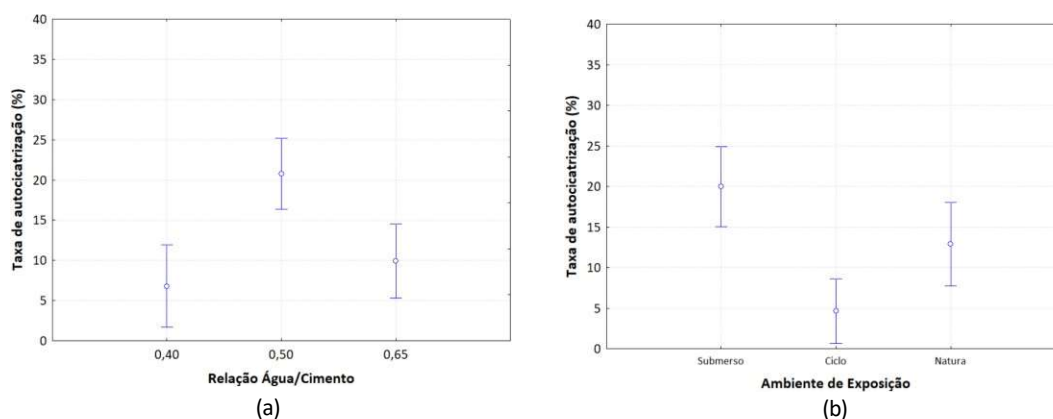
Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Ambiente de exposição	2012,981	2	1006,491	12,07580	0,000075	S
Relação água/cimento	1716,864	2	858,432	10,29941	0,000238	S
Ambiente de exposição*Relação a/c	719,414	4	179,853	2,15787	0,090888	NS
Error	3417,256	41	83,348			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo.

A Figura 5 apresenta a influência exercida pela relação água/cimento e pelo ambiente de exposição dos concretos, de forma isolada, frente a autocicatrização autógena.

Esperava-se que a taxa de autocicatrização reduzisse com o aumento da relação água/cimento, uma vez que a quantidade de grãos anidros é menor em matrizes com a/c maiores. Entretanto a relação a/c 0,40 apresentou uma taxa inferior às demais, fato que pode estar atrelado a espessura das fissuras. Embora o trabalho tenha fixado uma faixa de abertura (100 - 300 μ m), nota-se que as larguras geradas nos concretos com a/c 0,4 são superiores as demais, chegando a uma diferença de 30%. Fissuras mais estreitas respondem de forma mais rápida à formação dos compostos e cicatrização das fissuras^[19,20,21,22,23]. Portanto, existe uma relação entre a quantidade de grãos anidros disponíveis para a autocicatrização (maior em relação a/c menores) e o acesso de água através da fissura e da porosidade capilar do concreto (maior em relações a/c menores), o que pode explicar o comportamento.

Figura 5 - Influência dos fatores sobre taxa de autocicatrização, (a) relação água/cimento, (b) ambiente de exposição.



Quanto ao ambiente de exposição (Figura 5b) o submerso apresentou melhor capacidade de colmatação das fissuras, seguido pelo ambiente natural e ciclo de molhagem e secagem, resultado que corrobora em parte com a literatura. O gatilho para o desencadeamento da autocicatrização está ligado a entrada de água pelas fissuras, as condições de exposição à umidade, seja pela umidade relativa do ar, pela exposição às águas das chuvas, tipicamente observadas em estruturas desprotegidas, ou pela total saturação nas estruturas submersas em água, têm influência sobre a resposta do material em se autocicatizar^[24,25,26,27,28].



Resultados que reforçam as ideias apresentadas por alguns pesquisadores^(29,30,31), que são necessários estudos que avaliem o ambiente natural, uma vez que expor os concretos desprotegidos, com a incidência de insolação, precipitação e outros fatores ambientais de forma direta, não impede a matriz de cicatrizar-se. O ambiente ciclo de molhagem e secagem apresenta respostas quanto à autocicatrização, mas em valores inferiores aos dois ambientes citados, fato que pode estar atrelado às condições de exposição adotadas.

Vale ressaltar que a taxa de autocicatrização está sendo avaliada através do ensaio de VPU, o que reflete a recuperação interna da matriz. A geometria interna da fissura, ao longo da sua profundidade, é um fator que deve ser verificado, uma vez que trechos mais estreitos da fissura tendem a colmatar com produtos de autocicatrização mais rapidamente do que pontos com espessura maior⁽¹¹⁾. Desta forma, quando há uma fissura não selada, as ondas emitidas desviam, resultando em um aumento do tempo de transmissão, entretanto, quando a fissura está fechada ou parcialmente obstruída, as ondas tendem a se propagar em tempos reduzidos⁽³²⁾.

4. CONCLUSÕES

O ambiente de exposição influencia o fenômeno de autocicatrização autógena, sendo que o ambiente submerso foi o que apresentou resultados mais expressivos, seguido pelo natural e ciclo de molhagem e secagem, fato que está atrelado a presença constante de água, o que permite a continua hidratação dos grãos anidros de cimento.

Quanto às diferentes resistências, observou-se que os concretos com relação água/cimento 0,5 responderam melhor a taxa de autocicatrização, seguido pela 0,65 e 0,4. O mecanismo da autocicatrização autógena é geralmente atribuído à hidratação dos grãos de cimento anidro e pode ser auxiliado por carbonatação, concretos com a/c 0,4 tendem a ter maior quantidade de cimento não hidratado, seguido por 0,5 e 0,65, entretanto a resistência do concreto influencia na espessura e geometria das fissuras. Embora o trabalho tenha fixado uma faixa de abertura (100 - 300µm), nota-se que as larguras geradas nos concretos com a/c 0,4 são superiores as demais, chegando a uma diferença de 30%. Logo, fissuras mais estreitas respondem de forma mais rápida à formação dos compostos e cicatrização das fissuras.

Assim, nota-se que a disponibilidade de água constante e a largura inicial da fissura são pontos fundamentais para que a autocicatrização autógena seja desencadeada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DAL MOLIN, D. C. C.. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
2. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
3. ROOIJ, M. R. et al. Self-Healing Phenomena. **RILEM Technical Committee 221-SHC**, [S.1] Springer, 266 p., 2013.
4. BENAMEUR, S. A. et al. Development of sustainable self-healing engineered cementitious



composites incorporating maximum amounts of natural pozzolan. **Construction and Building Materials**, v. 456, p. 139278, 2024.

5. HUANG, H. **Thermodynamics of Autogenous Self-Healing in Cementitious Materials**, TU Delft, Delft, 2014.

6. REN, Q. et al. Research on the properties of crystalline admixtures: Self-healing healing materials for concrete from multiple perspectives. **Construction and Building Materials**, v. 453, p. 139047, 2024.

7. SODA, P. R. K. et al. Performance assessment of sustainable biocement mortar incorporated with bacteria-encapsulated cement-coated alginate beads. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134198, 2024.

8. VIJAY, K. et al. Bacteria based self healing concrete—A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008-1014, 2017.

9. SISOMPHON, K. et al. Effect of exposure conditions on self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials** v. 42, pp. 217-224. 2013.

10. SHETIYA, Ravi Kumar et al. Investigation into the Effects of Crystalline Admixtures and Coatings on the Properties of Self-Healing Concrete. **Materials**, v. 17, n. 3, p. 767, 2024.

11. ARNDT, J. A. **Avaliação de aditivos cristalizantes na autocicatrização de concretos de cimento Portland**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

12. HELAL, Z. et al. Sustainable bacteria-based self-healing steel fiber reinforced concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03389, 2024.

13. JAVEED, Y. et al. Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 29, p. 2376-2395, 2024.

14. MAURENTE, D. G. S. **Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

15. HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

16. PETRY, N. S. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

18. CAPPELLESSO, V. G. **Influência do tipo de cimento na autocicatrização de fissuras em concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

19. AHN, T.-H.; KISHI, T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 171–186, 2010.

20. SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O. Self healing mortars by using different cementitious materials. In: **International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering**. 2011. p. 5-7.

21. MAES, M. et al. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous



crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 114–124, jul. 2016.

22. REINHARDT, H. W.; JOOSS, M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 981–985, 2003.

23. YANG, Y. et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles, **Cement and Concrete Research**. v. 39, pp. 382-390. 2009.

24. TER HEIDE, N. e SCHLANGEN, E. Self-healing of early age in concrete. The first international conference on self-healing materials. 1., 2007, Noordwijka an Zee. **Proceedings...** 2007, The Netherlands, 2007.

25. LI, V. C.; YANG, E. H. **Self-healing in concrete materials**. In: VAN DER ZWAAG, S. (ed.) Self-healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science, p. 161-193. Dordrecht: Springer, 2007.

26. YANG, Y. et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles, **Cement and Concrete Research**. v. 39, pp. 382-390. 2009.

27. HUNG, C.; SU, Y. Medium-term self-healing evaluation of Engineered Cementitious Composites with varying amounts of fly ash and exposure durations. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 194–203, 2016.

28. CUENCA, E. et al. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 619-632, 2018.

29. Herbert, E.N; Li, V.C. Self-healing of Engineered Cementitious Composites in the Natural Environment. *High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos.* 62012, 2, 155–162.

30. Herbert, E., Li, V.: Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) under a natural environment. *Materials* 6, 2831–2845 (2013)

31. LAUCH, K.-S. et al. Self-healing of Fibre Reinforced Concrete Containing an Expansive Agent in Different Exposure Conditions. In: **RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete**. Springer, Cham, 2020. p. 453-465.

32. ÇOPUROĞLU, O. et al. Experimental techniques used to verify healing. In **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials** (pp. 19-63). Springer, Dordrecht, 2013.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

PROTEÇÃO DO CONCRETO DA CASA DE FORÇA DE PCH POR ADITIVO AUTOCICATRIZANTE PARA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.12>

Rafaela Sebben Eckhardt
rafaela@penetron.com.br

Felipe Pacheco
felipe@penetron.com.br

Pedro Taffarel Krieger
taffarel@penetron.com.br

Paulo Aviloff
paulo.aviloff@vaccaro.com.br

RESUMO

PCHs são estruturas de concreto em contato direto com água e agentes agressivos que penetram pela sua porosidade e fissuração, causando deterioração, redução da vida útil e, conseqüentemente, necessidade de intervenções. Para aumentar a durabilidade do concreto da casa de força da PCH Chimarrão e pela necessidade de estanqueidade da estrutura, dado o armazenamento de equipamentos elétricos, foi utilizado aditivo autocicatrizante no concreto. Neste estudo foi verificado selamento de fissura de 0,45 mm em amostras de concreto aditivado, pelo monitoramento do fluxo d'água na fissura. Foram descritas as etapas executivas da obra, com resultado positivo após 1 ano de comissionamento.

Palavras-chaves: Concreto; autocicatrização; durabilidade; hidrelétrica.

ABSTRACT

PCHs are concrete structures in direct contact with water and aggressive agents that penetrate through their porosity and cracks, causing deterioration, reduced useful life and, consequently, the need for interventions. To increase the durability of the concrete in the PCH Chimarrão powerhouse and due to the need for watertightness of the structure, given the storage of electrical equipment, a self-healing additive was used in the concrete. In this study, crack sealing of 0,45 mm was verified in samples of concrete with the additive, by monitoring the water flow in the crack. The executive stages of the project were described with positive results after 1 year of commissioning.

Palavras-chave: Concrete; self-healing; durability; hydroelectric.



1. INTRODUÇÃO

As pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) são fontes alternativas de produção de energia limpa, que usam o potencial hidráulico de correntes de água, por meio de estruturas de contenção (barragens) usualmente construídas em concreto armado (MUGUIO *et al.*, 2017).

Oliveira (2018) informou que o Brasil é um dos maiores construtores de barragens do mundo e o segundo país que gera mais energia hidrelétrica no mundo, atrás somente da China, dada sua abundância de rios.

Com o atual cenário de muitas estruturas deste setor a serem recuperadas, bem como a constante preocupação quanto à segurança estrutural, dados os danos humanos causados em caso de alguma falha de maior dimensão, tem-se desenvolvido soluções de maior durabilidade nas novas construções, por meio de projeto bem dimensionado, escolha correta dos materiais, execução com boas práticas da engenharia e aplicação de plano de manutenção (PIMENTA, 2009).

Neste sentido, Bianchin (2018) aponta que atualmente já tem-se trabalhado com concretos de alto desempenho em barragens e em suas estruturas associadas, principalmente nos concretos com face hidráulica. Dentro desta concepção, uma das soluções é a incorporação de aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar integral autocicatrizante, no concreto fresco.

Este aditivo tem objetivo de combater as duas principais causas intrínsecas de deterioração do concreto segundo a RILEM TC 230-DUC (*Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*): permeabilidade e fissuração, pois estas permitem a penetração de substâncias agressivas no interior da estrutura. Ele está descrito na ACI 212 R3 como aditivo redutor de permeabilidade sob altas pressões hidrostáticas (PRAH) e no GB 18445 como material cimentício impermeabilizante por cristalização capilar (CAPELESSO, 2018).

Segundo Takagi, Lima e Helene (2014) seu mecanismo de proteção ocorre pelas substâncias químicas ativas do aditivo, que utilizam a água como um meio para migrar e entrar nos vazios e fissuras do concreto, precipitando uma reação química entre a umidade e os subprodutos de hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais insolúveis compostos majoritariamente por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$), impedindo a passagem de água e agentes agressivos.

Para a verificação da durabilidade do concreto com esta proteção, Lema, Moraes e Ourives (2021) realizaram ensaios de sulfatos, onde obteve-se expansão somente nas amostras de referência (sem aditivo); de cloretos, onde obteve-se um coeficiente de difusão de cloretos 50% menor nas amostras com o aditivo em comparação com a referência (sem aditivo); e de autocicatrização, onde obteve-se uma redução de 95% do fluxo d'água nas amostras com o aditivo em comparação com a referência (sem aditivo).

Neste estudo será apresentada a metodologia de validação do uso do aditivo autocicatrizante para as estruturas de concreto da casa de força de uma PCH, por meio de ensaio de controle de fluxo d'água em amostras fissuradas, bem como, será apresentada a descrição das etapas



executivas da obra com o uso deste material e o resultado positivo de estanqueidade após 1 ano de comissionamento.

Apesar de tratar-se de uma obra de infraestrutura que requer alta durabilidade, este tipo de proteção nas estruturas para maior vida útil do concreto, ainda é pouco utilizado, sendo necessário seu estudo de desempenho e o monitoramento de estruturas reais com uso do material, a longo prazo, para ampliar de forma inteligente, buscando redução de manutenção e consequentemente de gastos financeiros e ambientais.

2. DESENVOLVIMENTO

A PCH Chimarrão é uma Pequena Central Hidrelétrica estabelecida no Rio Turvo, no município de Muitos Capões/RS, com potência instalada de 11,8 MW. O empreendimento iniciou sua construção em outubro de 2021 e finalizou em janeiro de 2023.

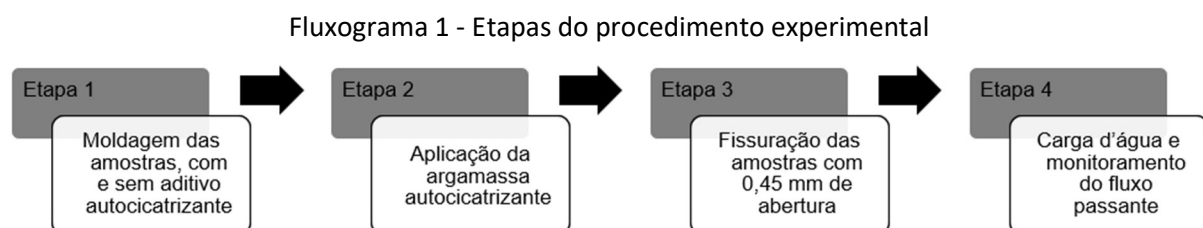
Parte da estrutura da sua casa de força (estrutura de concreto às margens do rio que abriga os equipamentos eletromecânicos, eletrônicos e a sala de operações) é enterrada e recebe alta pressão de água, sendo necessária sua estanqueidade, dado o risco de contato entre umidade e os equipamentos eletrônicos e também pela durabilidade demandada em obras de infraestrutura, visando uma redução de custos de OPEX (*operational expenditure* – despesas operacionais e manutenção).

Foi realizado estudo de custo benefício e de sustentabilidade para avaliar a necessidade de utilização de aditivo autocicatrizante no concreto, bem como foram realizados ensaios de desempenho, referente à redução da permeabilidade do concreto e a autocicatrização de fissuras passivas com 0,45 mm de abertura, a fim de validar o uso do material na obra.

Economicamente, foi observado um incremento inicial pequeno (aumento médio de 15% sobre o valor do concreto) em relação à redução em despesas com reparos, como tratamento de fissuras por injeção, recuperação de armadura corroída com deslocamentos de concreto por argamassas de reparo estrutural, entre outros. No item sustentabilidade, há benefício quanto à redução de manutenção da estrutura, pelo aumento da durabilidade; baixa emissão de carbono para produção e aplicação do aditivo; e menos consumo de material para a construção, em comparação à outros materiais, o que viabilizou sua utilização.

2.1. Materiais e métodos

No Fluxograma 1 estão descritas as etapas do procedimento experimental.



Fonte: Autor



Os insumos para formulação do concreto foram fornecidos pela construtora da obra, a qual possuía usina de concreto própria no canteiro de obras. Foi utilizado cimento, areia industrial, brita 1, aditivo polifuncional e superplastificante, conforme concreto aplicado nas estruturas.

O aditivo autocicatrizante utilizado foi o Penetron Admix e a argamassa autocicatrizante utilizada foi a Penetron. Em complemento, para selamento das tubulações, foi utilizado perfil hidroexpansivo de expansão controlada, fixado com seu primer.

Para o ensaio de autocicatrização de fissuras, foram moldados nove corpos de provas de concreto prismáticos de 60 x 15 x 15 cm, sendo três com traço referência do projeto, três com aditivo autocicatrizante e três com traço referência e posterior pintura autocicatrizante.

Para a moldagem, foram posicionados tubos de PVC de 25 mm de diâmetro no eixo central da amostra, furados em todo seu perímetro, para permitir a posterior entrada de água, e com sua ponta inferior selada, para uma entrada uniforme ao longo das furações do perímetro. No topo da amostra, onde a tubulação atingia a superfície, foi necessário instalar um perfil hidroexpansivo de expansão controlada fixado com seu primer, para evitar a saída de água na união de materiais diferentes entre o concreto e o PVC (Figura 1 a).

Os espaçadores plásticos em estruturas de concreto hidráulico são pontos frágeis para a entrada de agentes agressivos, sendo eles o único elemento de físico de proteção entre o ambiente externo, que pode ser agressivo, e a armadura. Sendo assim, devem ser evitados, como neste estudo, onde foram utilizados espaçadores cimentícios com aditivo autocicatrizante, podendo ser industrializados ou moldados *in loco*, os quais apresentam compatibilidade com a estrutura e proteção contra umidade e agentes agressivos.

Além disso, as fôrmas também receberam 2 barras de aço de diâmetro 8 mm, posicionadas sobre os espaçadores, simulando uma armadura, afim de evitar a quebra da peça quando submetidos à carga para fissuração.

Figura 1 – Fôrma prismática com tubo, fita hidroexpansiva, armadura e espaçadores cimentícios (a); concretagem com traço referência (b)



Fonte: Autor



As moldagens seguiram a NBR 5738 (2016), onde os materiais foram misturados na betoneira, nas proporções da Tabela 1, para obter um concreto da classe C20, com slump 12 +/- 2 cm, seguindo o traço utilizado na casa de força. Após a mistura obter consistência homogênea, o concreto foi despejado nos moldes vedados e com desmoldante e receberam adensamento com haste metálica (Figura 1 b). No traço com o aditivo autocicatrizante, foi utilizada a dosagem recomendada pelo fabricante de 0,8 % sobre o peso do cimento.

Tabela 1 - Traço do concreto estudado

Insumo	Cimento	Areia industrial	Brita 1	Polifuncional	Superplastificante	Autocicatrizante	Água
Quantidade/m ³	349 kg	979 kg	695 kg	2,8 kg	0,7 kg	2,79 kg	225 L

Também foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm do concreto referência e 2 do concreto com aditivo autocicatrizante, para posterior ensaio de compressão axial.

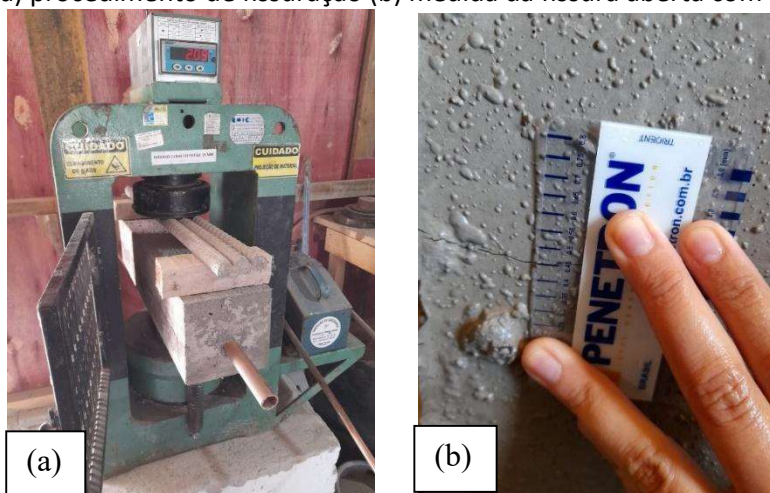
A primeira análise foi o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, seguindo a NBR 16889 (2020).

Após a moldagem, as amostras cilíndricas e prismáticas permaneceram em ambiente natural por 7 dias e então foram desformadas.

Após a desfôrma, as amostras cilíndricas permaneceram submersas em tanque de água até completarem 28 dias e as prismáticas permaneceram em ambiente natural por mais três dias, para aplicação e secagem da pintura de argamassa autocicatrizante conforme orientação do fabricante, com 1,6 kg/m², em três amostras de referência.

Então todas as amostras prismáticas foram fissuradas. Para isso foram submetidas à flexão com carga parcial (80 a 90% de sua resistência à compressão), em seu sentido longitudinal a fim de gerar fissuras (Figura 2a). Monitorou-se a fissuração gerada, tendo aberturas de 0,45 mm (Figura 2b), pois a colmatação máxima informada pelo fabricante é de 0,5 mm.

Figura 2 – (a) procedimento de fissuração (b) medida da fissura aberta com fissurômetro



Fonte: Autor



Após a fissuração, a ponta externas das tubulações fixadas nas amostras foram conectadas mecanicamente entre si e em uma mangueira ligada à rede de abastecimento de água, a qual forneceu fluxo de água constante nas amostras por 28 dias, sendo este o período de ativação do autocicatrizante, para crescimento gradativo da estrutura de cristais insolúveis.

Durante este período foi monitorado de forma visual o fluxo d'água passante nas amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de consistência pelo abatimento do tronco de cone do concreto fresco e de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de consistência por abatimento e resistência à compressão axial

Traço	Consistência (cm)	Resistência à compressão (MPa)
Referência 1	11,5	25,2
Referência 2	14	21,9
Com aditivo autocicatrizante	12	22,9
		23,1

Foi verificado que não houve alteração entre as amostras referência e as com aditivo autocicatrizante.

No ensaio de autocicatrização por controle de fluxo d'água, durante as idades iniciais da carga, em todas as amostras prismáticas, a saída de água pela fissura, pelo concreto maciço e pela tubulação foi visível (Figura 3), conforme esperado, pois os cristais do aditivo e da pintura autocicatrizante ainda estavam em seu período de ativação de 28 dias em contato permanente com água, dada a formação gradativa dos cristais nos poros e fissuras.

Figura 3 – Amostras no início da carga d'água – controle de fluxo

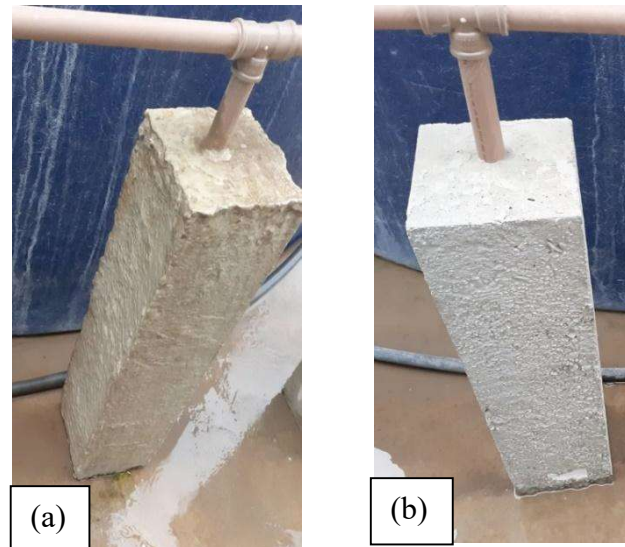


Fonte: Autor



Após o período de ativação da cristalização, foi possível verificar que as amostras de referência mantiveram fluxo d'água e as amostras com aditivo e pintura autocicatrizante não apresentaram nenhuma percolação de água na matriz e na fissura, ou manchas de umidade, como no início dos testes, ilustrando sua autocicatrização (Figura 4).

Figura 4 – Amostras no final da carga (a) com argamassa autocicatrizante sem vazamento e (b) com aditivo autocicatrizante também sem vazamento

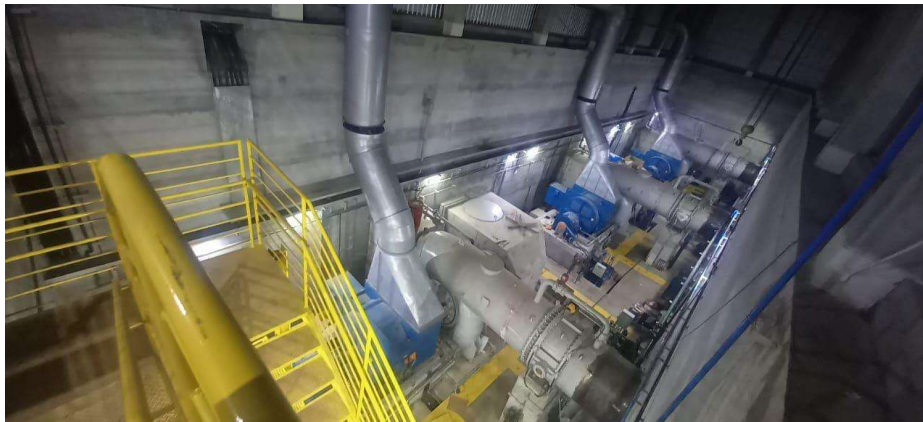


Fonte: Autor

Com a validação do desempenho apresentado pelo sistema, após resultados satisfatórios obtidos nos ensaios, todo o concreto da casa de força recebeu o aditivo autocicatrizante, dosado na central de concreto da obra, com consumo de 0,8% em relação a massa de cimento. Em complemento, foram aplicadas boas práticas da engenharia, objetivando a adequada utilização do concreto como elemento de estanqueidade: a correta vibração mecânica do concreto, para um concreto homogêneo e sem falhas de cobrimento e segregações; a correta cura do concreto, para minimizar as fissuras de retração pela perda de água; plano de concretagem dividido em duas etapas, para minimizar juntas de concretagem e prevendo seu tratamento com preparação do substrato e obtenção do corte verde, que melhora a aderência do substrato, com hidrojateamento de água com alta pressão, removendo a pasta frágil da superfície, até exposição do agregado e sobre o concreto limpo e seco, aplicação de perfil hidroexpansivo de expansão controlada fixado com seu primer antes da concretagem seguinte, conforme recomendação da NBR 14931 (2023). Após a etapa de concretagem, o processo de cura com água foi estendido para ativar o sistema autocicatrizante e atualmente as estruturas encontram-se estanques (Figura 5).



Figura 5 - Casa de força PCH Chimarrão em uso, com utilização do aditivo autocicatrizante



Fonte: Autor

4. CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível verificar que o aditivo e a argamassa autocicatrizantes atendem o desempenho de estanqueidade e selamento de fissuras passivas de 0,45 mm de abertura, objetivando a proteção da estrutura, para possibilitar uma maior durabilidade desta, e portanto obter-se estruturas sustentáveis.

Sendo assim, foi aprovado para utilização na casa de força da PCH Chimarrão, sendo observado seu desempenho satisfatório na execução do projeto após o uso da estrutura.

Porém para se obter o resultado completo de estanqueidade na estrutura, é necessário verificar as características executivas de cada projeto, para definição dos tratamentos complementares necessários, como neste caso, a junta de concretagem.

Para futuros trabalhos sugere-se o controle de volume de entrada e de saída d'água pelas amostras, com isolamento das amostras para o controle de saída d'água. Também é válida a análise com aplicação de maior pressão de água e durante maior período de monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) UFRGS, Porto Alegre, 2018.
2. CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 2018. 295 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
3. LEMA, D.; MORAES, E. F. S.; OURIVES, C. N. Durabilidade das estruturas pela impermeabilização por cristalização integral do concreto. **Revista Concreto & Construções** – IBRACON, v 77, p. 94-102, jan-mar. 2015.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

4. MUGUIO, M. R. *et al.* Mapeamento das anomalias da gravidade para avaliar a variação da densidade de concreto compactado com rolo: estudo de caso usina hidrelétrica (UHE) de Mauá, estado do Paraná. **Revista Brasileira de Cartografia, No 69/7, 2017.**
5. OLIVEIRA, N. C. C. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia História**, Belo Horizonte, vol. 34, n. 65. 2018.
6. PIMENTA, A. M. Concreto para obras de infra-estrutura. **Revista Concreto & Construções – IBRACON**, v 53, p. 23-28, jan-mar. 2009.
7. TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; HELENE, P. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. **Revista Concreto & Construções – IBRACON**, v 73, p. 75-79, jan-mar. 2014.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

USO DE ADITIVO AUTOCICATRIZANTE COMO PARTE INTEGRANTE DE SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE PISCINAS DE CONCRETO - ESTUDO DE CASO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.13>

Kelvin Rafael Duarte Machado

Email: kelvin.machado@acad.ufsm.br

Alana Paula da Costa Quispe

Email: alana.quispe@acad.ufsm.br

Mauricio Machado Mendes Peres

Email: mauricio.mendes@acad.ufsm.br

Rene Quispe Rodríguez

Email: rene.rodriguez@ufsm.br

Gihad Mohamad

Email: gihad@ufsm.br

RESUMO

A impermeabilização de uma piscina deve prever a atuação de cargas hidrostáticas tanto positivas quanto negativas. Para isso, os sistemas de impermeabilização devem suportar tais pressões de maneira eficiente. Concretos com aditivos autocicatrizantes possuem a característica de selarem o concreto através da cristalização de compostos, bloqueando a passagem de água e reduzindo a sua permeabilidade. O presente trabalho tem por objetivo apresentar estudo de caso de aplicação de aditivo autocicatrizante como parte do sistema de impermeabilização de uma piscina de concreto, evidenciando o ganho em produtividade, segurança e economia.

Palavras-chaves: autocicatrização, concreto, piscinas.

ABSTRACT

The waterproofing of a swimming pool must provide for the action of both positive and negative hydrostatic loads. To achieve this, waterproofing systems must withstand such pressures efficiently. Concretes with self-healing additives have the characteristic of sealing the concrete through the crystallization of compounds, blocking the passage of water and reducing its permeability. The present work aims to present a case study of the application of a self-healing additive as part of the waterproofing system of a concrete swimming pool, highlighting the gain in productivity, safety and economy.

Palavras-chaves: self-healing, concrete, swimming pools.



1. INTRODUÇÃO

A reservação artificial de água se dá através de reservatórios construídos, como no caso das piscinas. Dentre os processos construtivos possíveis para piscinas, a construção de reservatórios em concreto armado é uma opção viável economicamente e segura.

Entretanto, a impermeabilização de reservatórios em concreto é um problema que necessita atenção. O concreto, possui uma porosidade natural assim como a presença de microfissuras presentes na matriz cimentícia ⁽⁴⁾. Quando interligados, estes espaços vazios geram caminhos por onde a passagem de água e outros fluídos é livre. Deste modo, uma estrutura de concreto que resista a cargas hidrostáticas deve ser estanque, não sendo permitida a passagem de umidade de uma face para a outra, seja pela ação de pressões positivas (atuando de dentro para fora do reservatório), quanto as negativas (atuando de fora para dentro do reservatório).

Para solucionar a impermeabilização de uma piscina, existe uma variedade de produtos, os quais devem ser selecionados levando em consideração as interferências que a piscina estará sujeita, como por exemplo, pressão hidrostática, deformações e movimentações ⁽⁵⁾. Dentre as opções disponíveis, podem ser citadas as argamassas poliméricas, mantas asfálticas e membranas de poliuretano.

Com o objetivo de reduzir a permeabilidade do concreto, o uso de técnicas de autocicatrização surgem como mecanismos capazes de reduzir a sua absorção e tornar a estrutura estanque. Tais técnicas podem ser divididas em autocicatrização autônoma utilizando, por exemplo, microcápsulas com bactérias ou, autocicatrização autógena, através do uso de aditivos minerais ⁽⁶⁾. Para a execução de estruturas de concreto armado convencionais, a utilização de aditivos minerais é extremamente vantajosa, devido a simplicidade do seu preparo.

Os aditivos autocicatrizantes agem na presença de água gerando depósitos cristalinos ⁽⁸⁾, selando os poros e as microfissuras para o transporte de fluídos e íons por meio da estrutura ⁽⁷⁾. Isso permite, além de gerar uma estrutura estanque, garantir um aumento da vida útil da estrutura uma vez que a autocicatrização dificulta a entrada de agentes agressivos ⁽³⁾.

Deste modo, a impermeabilização de reservatórios em concreto utilizando aditivos autocicatrizantes é uma técnica capaz de reduzir a necessidade de etapas complementares, como a utilização de membranas moldadas *in loco*, resultando em uma produtividade maior, redução de custos e uma redução em eventuais reparos e manutenções ⁽⁴⁾.

Entretanto, deve-se compreender os mecanismos de ação destes aditivos para utilizá-los de maneira segura. Os aditivos de autocicatrização podem colmatar apenas fissuras com tamanho limitado, deste modo, o dimensionamento da estrutura de concreto deve ser cuidadoso e observar o Estado Limite de Serviço de Abertura de Fissuras (ELS-W) de acordo com ABNT NBR 6118:2023 ⁽¹⁾, limitando-as abaixo do tamanho máximo que o aditivo pode atuar. Assim, a autocicatrização é mais efetiva quando ocorrem fissuras passivas, cujo tamanho pode ser controlado, ao passo que fissuras ativas, como aquelas oriundas de movimentações térmicas, devem ser tratadas com auxílio de outras técnicas.



2. ESTUDO DE CASO

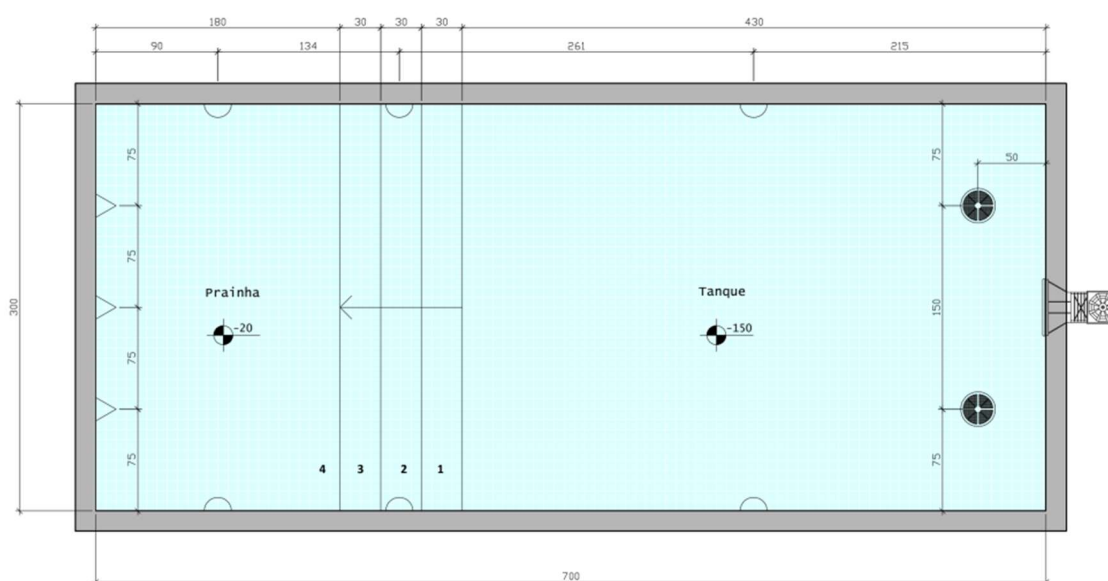
O presente trabalho tem por objetivo analisar um estudo de caso de aplicação de aditivo autocicatrizante como parte do sistema de impermeabilização utilizado em uma piscina de concreto armado.

A piscina estudada é enterrada e com capacidade para 29.000,00 litros, com dimensões de 7,00 m x 3,00 m x 1,50 m. A sua construção ocorreu na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul e foi executada entre os meses de janeiro e março de 2024.

2.1. Planejamento e projeto

Antes do início das obras, foi necessário realizar o planejamento para compreender o local da execução, analisar os projetos já existentes, conhecer as características do solo e verificar interferências com edificações existentes. De posse destas informações, foi possível realizar os projetos de construção da piscina, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Planta baixa da piscina com detalhes de dispositivos.



Fonte: Autor

2.2. Execução

A seguir são apresentadas as etapas desenvolvidas para a execução da piscina, com especial enfoque na construção do reservatório de concreto armado e as técnicas utilizadas para garantir a estanqueidade deste.

2.2.1. Fundação

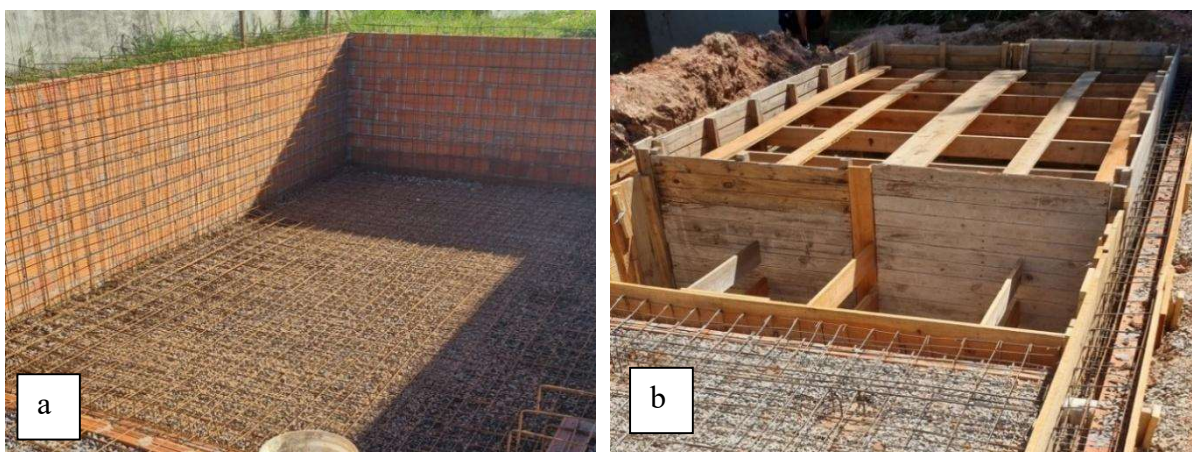
As fundações foram executadas em micro estacas com diâmetro de fuste de 40 cm e profundidade de até 5 m.



2.2.2. Formas

Para a execução das formas externas foi utilizado o conceito de formas perdidas conforme observado na Figura 2 (a), através da construção de painéis de alvenaria reforçados com barras de aço. Para a execução das formas internas, utilizou-se painéis pré-fabricados de madeira como mostrado na Figura 2 (b), modularizados em segmentos de 1,20 m x 1,50 m, de modo a permitir o reaproveitamento.

Figura 2 – Formas: (a) externas em alvenaria, (b) internas em painéis de madeira modulares.



Fonte: Autor

2.2.3. Armaduras

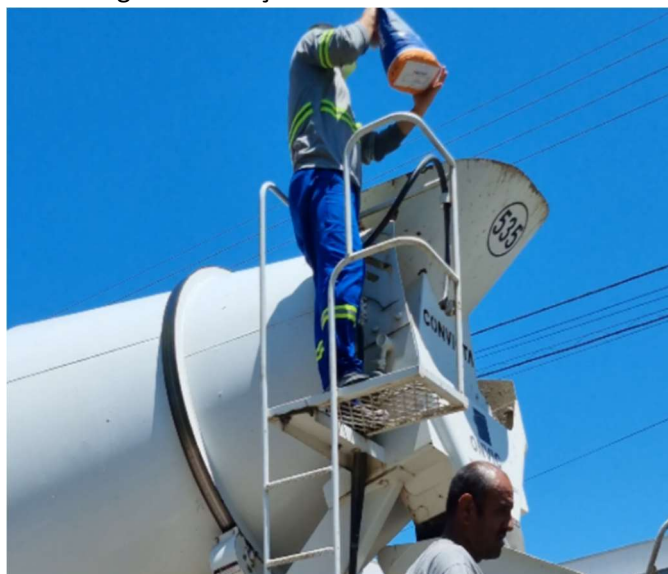
As armaduras foram dobradas no local da obra, observando-se o projeto estrutural e os detalhes construtivos típicos para reservatórios, com parte dela observada na Figura 2 (a).

2.2.4. Concretagem

A concretagem foi realizada com concreto usinado, f_{ck} 25 MPa, com a adição do aditivo autocicatrizante na obra, diretamente no caminhão betoneira conforme Figura 3. A quantidade de aditivo autocicatrizante foi calculada previamente em função da massa de cimento informada pela concreteira. O fabricante do aditivo recomenda a utilização de 0,8% a 1,0% de aditivo em pó em relação à massa de cimento para utilização em estruturas convencionais, não sujeitas a ataques de agentes químicos.



Figura 3 – Adição do aditivo autocicatrizante.



Fonte: Autor

2.2.5. Cura e desforma

Após a concretagem iniciou-se a cura úmida do concreto, com lançamento de filme de água sobre o mesmo e monitoramento constante para impedir a perda de água por evaporação.

Após 24 horas, procedeu-se com a desforma interna.

2.2.6. Tubulações, dispositivos e revestimento de argamassa para regularização

Uma vez realizada a desforma, foi procedida a instalação das tubulações e dispositivos fixados na estrutura de concreto através do grauteamento destes. Posteriormente, foi realizada uma camada de regularização em argamassa impermeável nas paredes para o assentamento do revestimento.

2.2.7. Teste de estanqueidade

Após o período de cura úmida do revestimento argamassado, procedeu-se com o teste de estanqueidade, onde a piscina foi completamente cheia de água. A partir de então, passou-se a monitorar o nível da água.

Após a execução das tubulações, a água foi liberada para preencher os tubos e verificar se não ocorreram vazamentos.

A piscina foi dada como aprovada após 144 horas de teste de estanqueidade, superando o tempo de teste recomendado pela norma ABNT NBR 9574:2008 ⁽²⁾.



2.2.8. Finalização da piscina

A finalização da piscina se deu com o assentamento do revestimento final em pastilhas cerâmicas e o término das instalações hidráulicas e elétricas, com a instalação de motobombas, filtro e quadro de comando elétrico, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Piscina concluída



Fonte: Autor

2.3. Comparação dos custos da construção sem e com o uso de aditivo autocicatrizante

Abaixo, na Tabela 1 e na Tabela 2, demonstra-se o custo para a execução de um sistema de impermeabilização sobre estrutura de concreto sem e com o uso de aditivos autocicatrizantes, respectivamente, para fins de comparação. Percebe-se uma economia de até 14,5 % na execução do reservatório em concreto armado com o uso de aditivo autocicatrizante como elemento de impermeabilização para a piscina estudada quando comparado com a impermeabilização por camada de argamassa polimérica moldada in loco.

Tabela 1 – Custos para construção do reservatório em concreto sem uso de autocicatrizante, referência SINAPI de novembro/2024 mais cotações.

Serviços	Unidade	Quantidade	Valor unitário R\$	Valor total R\$
Formas (externa + interna)	m ²	30,00	169,86	5.095,80
Armaduras	kg	500,00	17,13	8.565,00
Concreto	m ³	8,00	677,08	5.416,64
Impermeabilização com argamassa polimérica	m ²	51,00	109,98	5.608,98
Total				23.686,52

Fonte: Autor



Tabela 2 – Custos para construção do reservatório em concreto com uso de autocicatrizante, referência SINAPI de novembro/2024 mais cotações

Serviços	Unidade	Quantidade	Valor unitário R\$	Valor total R\$
Formas (externa + interna)	m ²	30,00	169,86	5.095,80
Armaduras	kg	500,00	17,13	8.565,00
Concreto	m ³	8,00	677,08	5.416,64
Aditivo autocicatrizante	kg	22,50	51,20	1.152,00
Total				20.229,44

Fonte: Autor

3. CONCLUSÃO

A partir do exposto, pode-se perceber que existe uma vantagem na execução de reservatórios em concreto armado para piscinas impermeabilizadas com o uso de aditivos autocicatrizantes. Além da redução do tempo de execução, existe uma redução no custo total envolvido. Estruturas executadas com este tipo de solução apresentam desempenho adequado quanto a estanqueidade e atendimento aos critérios de vida útil da estrutura. Porém, deve-se destacar a importância de um projeto estrutural bem elaborado que garanta espessuras de parede, detalhamentos e cobrimentos de armadura, além da limitação de fissuras dentro do Estado Limite de Serviço (ELS-W). A execução cuidadosa, respeitando os projetos, boas práticas e normas é fundamental para o sucesso da construção de reservatórios para piscinas em concreto armado estanques.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9574**: Execução de impermeabilização. Rio de Janeiro, 2008.
3. HELENE, Paulo et al. **Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 3, p. 544–563, maio 2018.
4. JAHANDARI, Soheil et al. **Integral waterproof concrete: A comprehensive review**. Journal of Building Engineering, v. 78, p. 107718, 1 nov. 2023.
5. RIBEIRO, Daniel Duarte; DOS SANTOS, Amaro Francisco Codá. **Diretrizes para execução de um adequado sistema de impermeabilização em piscinas apoiadas sobre o solo e enterradas**. Boletim do Gerenciamento, [S.l.], v. 26, n. 26, p. 1-12, set. 2021. ISSN 2595-6531.
6. SANKARAN, Deeba; ARUN KUMAR, Ammasi. **State-of-the-art review on self-healing in mortar, concrete, and composites**. Case Studies in Construction Materials, v. 20, p. e03298–e03298, 17 maio 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

7. ZHONG, Jingru. et al. **Influences of cementitious capillary crystalline waterproofing on the hydration products and properties of cement-based materials.** Journal of Building Engineering, v. 98, p. 111451, 2 dez. 2024.
8. ZIEGLER, Fabiana. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MATERIAIS CRISTALIZANTES



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES FRENTE A MIGRAÇÃO DE CLORETOS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.14>

Maxwell Klein Degen

Email: max.degen@builder.ind.br

Eliza Cerato Confortin

Email: eliza.confortin@builder.ind.br

Fábio André Viecili

Email: fabio.viecili@builder.ind.br

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto depende de como elas resistem às condições adversas, buscando prolongar sua existência e reduzir os custos de manutenção, os aditivos cristalizantes emergem como uma alternativa promissora. O objetivo deste estudo foi avaliar a durabilidade de concretos com 4 aditivos cristalizantes comerciais, focando na avaliação da trabalhabilidade, resistência à compressão e redução da migração de cloretos. Os resultados revelaram melhoria significativa na redução de penetração de cloreto, na ordem de 28%, nos concretos com aditivos cristalizantes em comparação com os convencionais. Tais resultados destacam a eficácia desses aditivos na promoção da durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto.

Palavras-chaves: aditivos, cristalizantes, cloretos.

ABSTRACT

The durability of concrete structures depends on their ability to withstand adverse conditions, aiming to extend their lifespan and reduce maintenance costs. In this context, crystalline admixtures have emerged as a promising alternative. The objective of this study was to evaluate the durability of concretes incorporating four commercial crystalline admixtures, focusing on workability, compressive strength, and reduction of chloride migration. The results revealed a significant improvement in chloride penetration resistance—by approximately 28%—in concretes with crystalline admixtures compared to conventional ones. These findings highlight the effectiveness of such admixtures in enhancing the durability and sustainability of concrete structures.

Keywords: additives, crystalline, chlorides.



1. INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto é um fator essencial para a longevidade das estruturas, pois sua degradação pode comprometer a segurança e aumentar os custos de manutenção ao longo do tempo. Dentre os principais desafios enfrentados pelo concreto, destacam-se a porosidade inerente ao material e a consequente permeabilidade a agentes agressivos, como água, íons cloreto e dióxido de carbono, que favorecem a corrosão das armaduras e reduzem a vida útil da estrutura⁽¹⁾. Para mitigar esses efeitos, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas, sendo o uso de aditivos cristalizantes uma solução promissora na melhoria da impermeabilidade e autocicatrização do concreto⁽²⁾.

Os aditivos cristalizantes, são compostos químicos ativos que reagem com a umidade e os compostos hidratados do cimento, formando cristais insolúveis que preenchem poros e microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto e promovendo seu efeito autocicatrizante⁽³⁾. Esses materiais podem ser incorporados diretamente na mistura do concreto ou aplicados superficialmente, proporcionando uma barreira interna ao longo de toda a estrutura⁽⁴⁾.

Estudos recentes apontam que a adição de cristalizantes pode aumentar a resistência mecânica do concreto, melhorar sua capacidade de autocicatrização e reduzir a difusão de agentes agressivos⁽⁵⁾. Além disso, pesquisas sobre o impacto do ambiente de exposição indicam que a interação dos aditivos cristalizantes com soluções saturadas de hidróxido de cálcio potencializa o efeito de autocicatrização, promovendo um fechamento mais eficiente das fissuras⁽⁶⁾.

Outro benefício significativo dos aditivos cristalizantes está relacionado à sua contribuição para a sustentabilidade da construção civil. O uso desses materiais pode minimizar a necessidade de reparos e manutenção precoce, reduzindo o consumo de materiais e recursos naturais ao longo do ciclo de vida da estrutura⁽⁷⁾. Além disso, estudos demonstram que os aditivos cristalizantes, quando combinados com materiais suplementares como cinza de casca de arroz, podem melhorar a resistência do concreto sem comprometer sua trabalhabilidade e desempenho mecânico⁽³⁾.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da adição de aditivos cristalizantes no concreto, considerando aspectos como a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade em relação a penetração de íons cloreto.

Os resultados esperados visam fornecer dados técnicos que subsidiem o uso desses aditivos em larga escala, auxiliando engenheiros e projetistas na especificação de concretos mais duráveis e sustentáveis. A aplicação desses materiais pode representar um avanço significativo para a engenharia civil, promovendo construções mais resilientes e de menor impacto ambiental.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de verificar as propriedades mecânicas e os aspectos de durabilidade foram produzidos quatro traços de concreto, sendo um concreto de referência sem a adição de cristalizante, e três concretos contendo cristalizante. A cura utilizada dos concretos foi submersa em solução saturada hidróxido de cálcio conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT,2015)⁽⁸⁾.

2.1 Traço de concreto

O proporcionamento utilizado para a confecção dos concretos (Tabela 7) foi o estabelecido pelo procedimento de teste padrão do GT-Redutor de permeabilidade do Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI, 2022)⁽⁹⁾. Ressalta-se que a relação água/cimento utilizada no estudo é alta (0,65), para verificar o impacto dos aditivos na redução da permeabilidade e desempenho em relação ao concreto sem adição.

Tabela 7 - Traço de concreto

Material	Origem	Consumo (Kg/m ³)
Cimento CP V ARI	Rio Branco do Sul / PR	320
Areia natural quartzosa	Rio Jacuí / RS	911
Brita 0 (9,5 mm) - basalto	Montenegro / RS	959
Água	Rede de abastecimento local	208

Fonte: os autores.

2.1.1 Aditivos cristalizantes

Foram utilizados quatro tipos de aditivos cristalizantes comerciais o Cristalizante A, líquido, e os cristalizantes B, C e D em pó. Foram utilizadas as dosagens mínimas recomendadas pelas fichas técnicas dos produtos (Tabela 8). Ressalta-se que o Cristalizante A tem dosagem de recomendada de 1% sobre a massa de cimento, o Cristalizante B possui dosagem única de 800g por metro cúbico de concreto, enquanto os Cristalizantes B e C, possuem recomendação de dosagem de 0,8% sobre a massa de cimento do traço.

Tabela 8 - Dosagem de aditivo cristalizante

Cristalizante	Recomendação de dosagem	Consumo (Kg/m ³)	Massa específica (g/cm ³)
Cristalizante A	1% sobre a massa de cimento	3,2	1,20
Cristalizante B	800g por metro cúbico de concreto	0,8	2,44
Cristalizante C	0,8% sobre a massa de cimento	2,56	2,78
Cristalizante D	0,8% sobre a massa de cimento	2,56	2,90

Fonte: os autores.

2.2 Avaliação dos concretos

Os concretos produzidos foram avaliados no estado fresco através da consistência, medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone. Já no estado endurecido, o concreto foi avaliado pelos ensaios de resistência à compressão e pelo ensaio de migração de cloretos (NORDTEST, 1999)⁽¹⁰⁾.



2.2.1 Consistência

No estado fresco, com intuito de verificar a influência dos ativos cristalizantes na trabalhabilidade dos concretos, foi avaliado o índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR 16889⁽¹¹⁾. O ensaio foi realizado logo após o término da mistura, tempo zero, e foi verificada a perda de abatimento após decorridos 15 minutos da finalização da mistura.

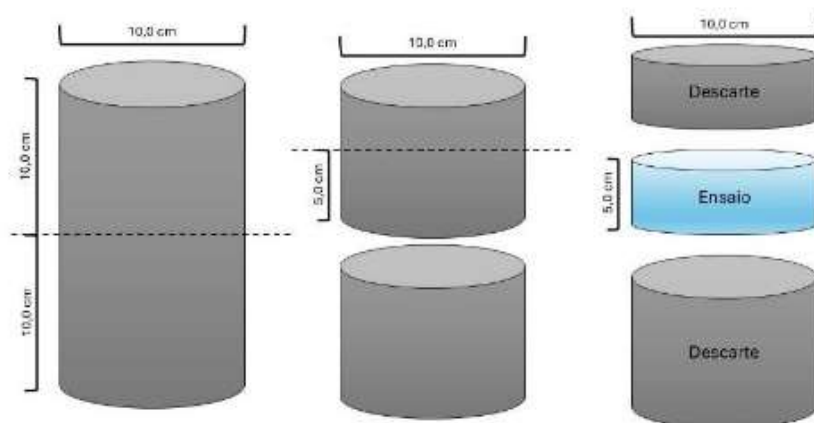
2.2.2 Resistência à compressão

No estado endurecido, os corpos de prova foram avaliados em diferentes idades (1, 28 e 56 dias), quanto a resistência à compressão axial seguindo a metodologia da NBR 5739⁽¹²⁾. Foram moldados 2 corpos de prova para cada idade.

2.2.3 Migração de cloretos

Os diferentes concretos foram avaliados quanto a migração de cloretos utilizando a metodologia de ensaio proposta pela NORDTEST (1999)⁽¹⁰⁾, aos 56 dias de idade. Para cada traço de concretos foram moldados 3 corpos de prova com dimensões de 20 cm de altura por 10cm de diâmetro, as amostras para o ensaio foram extraídas da parte central, conforme a Figura 3.

Figura 3 Esquema de corte dos corpos de prova para extração da amostra de ensaio



Fonte: os autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

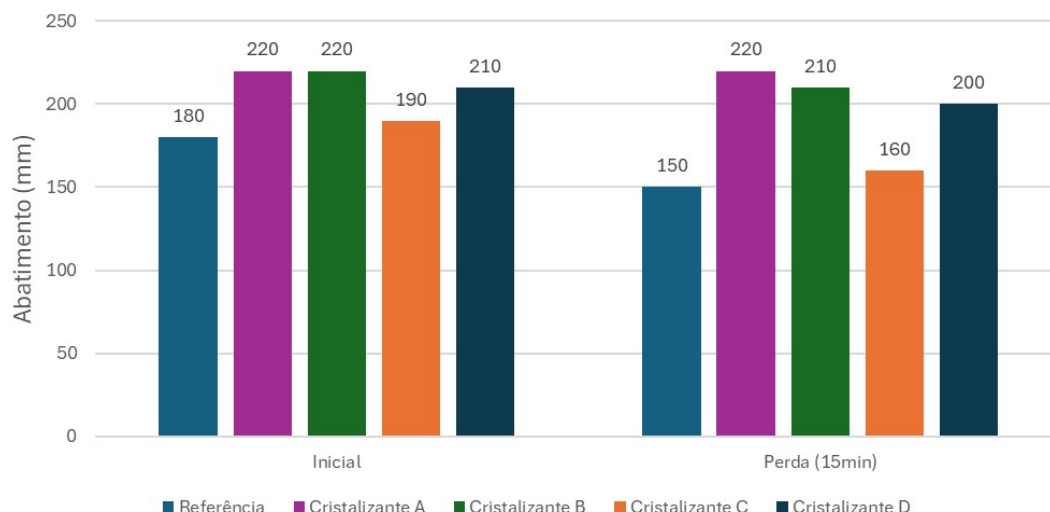
3.1 Consistência

Na De modo geral, os aditivos redutores de permeabilidade melhoraram a trabalhabilidade em relação ao concreto de referência. Além disso, percebe-se a manutenção dessa característica ao longo do tempo, sugerindo que os aditivos minimizaram a perda de trabalhabilidade.



Figura 4 observa-se o resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone, os concretos atingiram a classe de consistência S220 com forme a NBR 8953⁽¹³⁾. De modo geral, os aditivos redutores de permeabilidade melhoraram a trabalhabilidade em relação ao concreto de referência. Além disso, percebe-se a manutenção dessa característica ao longo do tempo, sugerindo que os aditivos minimizaram a perda de trabalhabilidade.

Figura 4 - Consistência dos diferentes traços de concreto



Fonte: os autores.

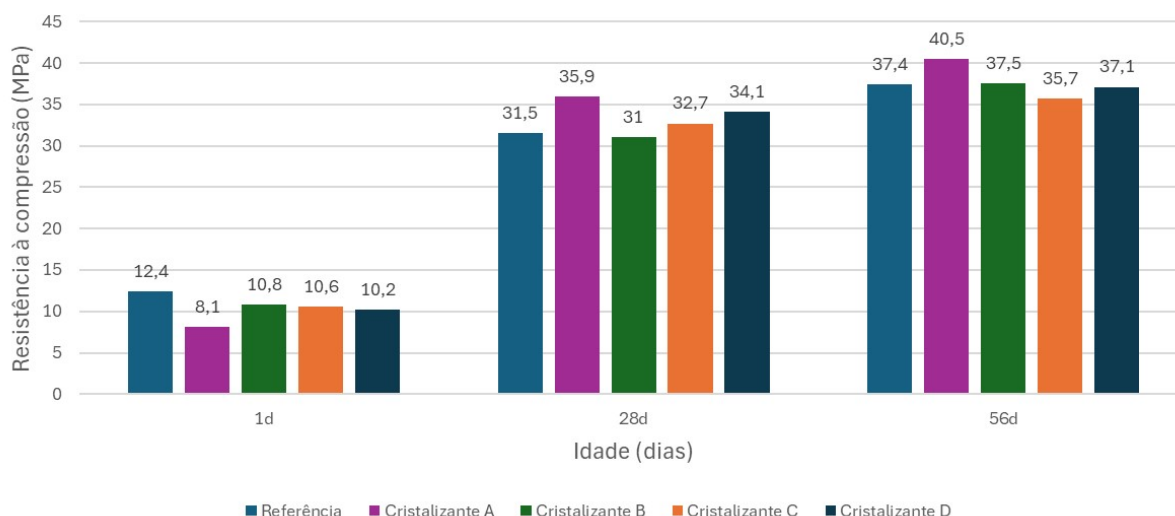
3.2 Resistência à compressão

O resultado do ensaio de resistência à compressão é apresentado na Figura 3. Com 1 dia de idade, os concretos com aditivos redutores de permeabilidade exibiram menor resistência à compressão em comparação ao concreto de referência. Essa redução no ganho de resistência nas idades iniciais pode estar relacionada à maior formação de cristais ao redor dos grãos de cimento, o que impede a hidratação completa das partículas de cimento. Como consequência, há um aumento na quantidade de cimento anidro na matriz, resultando em uma desaceleração do ganho de resistência⁽⁷⁾.

Aos 28 e 56 dias, observa-se um aumento na resistência dos concretos com aditivos cristalizantes, atingindo valores próximos aos do concreto de referência. Destaca-se, o Cristalizante A, que apresentou aumento de 8,3% em comparação ao concreto de referência. Com o passar do tempo, a hidratação da fração anidra do cimento e a formação de cristais contribuem para a redução da porosidade da matriz, promovendo a densificação da estrutura do concreto e, consequentemente, o aumento da resistência à compressão⁽¹⁴⁾.



Figura 5 - Resistência à compressão dos traços de concreto em diferentes idades de ruptura



Fonte: os autores.

3.3 Migração de cloreto

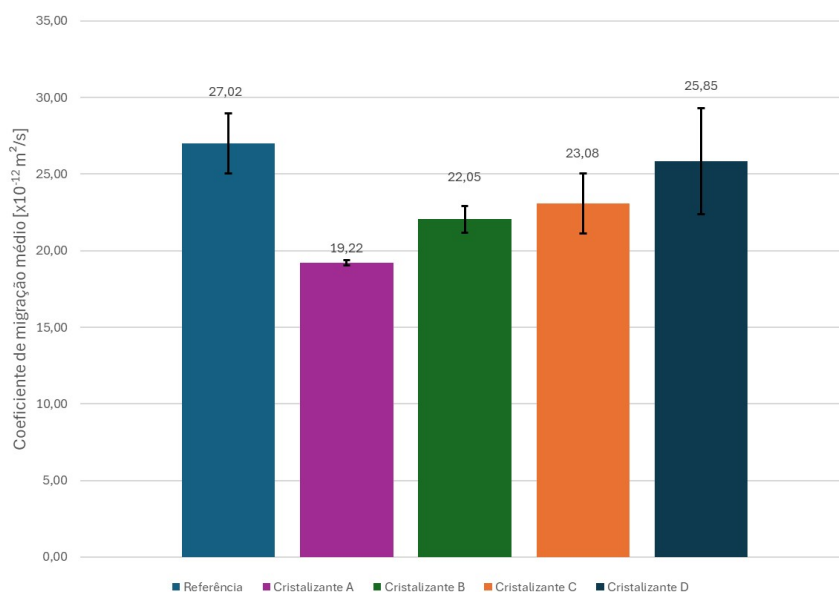
Os aditivos cristalizantes aumentam a durabilidade do concreto ao reduzir a penetração de cloretos, principais agentes da corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado. Esse efeito se deve à formação de cristais nos poros e microfissuras.

Os resultados do ensaio de migração de cloretos, apresentados na Figura 4, demonstram que o uso de aditivos redutores de permeabilidade diminui a entrada de cloretos no concreto, com reduções de 28,9% para o Cristalizante A, 18,4% para o Cristalizante B, 14,6% para o Cristalizante C e 4,3% para o Cristalizante D. Esses resultados estão em consonância com os obtidos por Khomwan et al.⁽¹⁵⁾ na mitigação dos efeitos da corrosão.

Como os cloretos geralmente se infiltram pela água por ação capilar, a redução da porosidade dificulta ou impede essa penetração. Isso desacelera a difusão de íons cloreto no interior do concreto, contribuindo para o aumento da vida útil da estrutura.



Figura 6 -Resultado médio do ensaio de migração de cloretos



Fonte: os autores.

4. CONCLUSÕES

Os aditivos cristalizantes demonstraram alta eficácia na melhoria da durabilidade do concreto em ambientes agressivos, especialmente em exposições a água salgada ou contaminada com cloretos. Sua aplicação proporciona proteção prolongada, reduzindo significativamente a necessidade de manutenção e reparos estruturais. O Cristalizante A proporcionou redução de 28,9% no ingresso de cloretos, o Cristalizante B 18,4%, o Cristalizante C 14,6% e o Cristalizante D 4,3% de redução.

Uma das principais vantagens desses aditivos é sua capacidade de auto cicatrização, pois continuam reagindo e formando cristais ao longo do tempo na presença de umidade. Esse mecanismo auxilia no fechamento de microfissuras que poderiam servir como vias de ingresso para agentes agressivos, como os cloretos.

Ao restringir a entrada de cloretos e água, esses aditivos diminuem a formação de células eletroquímicas na armadura, retardando ou até mesmo impedindo o início do processo de corrosão. Como consequência, o concreto armado mantém sua integridade estrutural por períodos mais longos, garantindo maior vida útil e desempenho sustentável das estruturas.

REFERÊNCIAS

1. Zhang, Y. et al. **Preparation and performance study of active chemicals in cementitious capillary crystalline waterproofing materials.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e02874, 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

2. LI, G. et al. **Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour.** *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 36–45, 2019.
3. DING, F. et al. **Combined effect of rice husk ash and cementitious capillary crystalline waterproofing materials on the performance of mortar.** *Journal of Building Engineering*, v. 84, p. 108479, 2024.
4. ZHONG, J. et al. **Influences of cementitious capillary crystalline waterproofing on the hydration products and properties of cement-based materials.** *Journal of Building Engineering*, v. 98, p. 111451, 2024.
5. ZHENG, Y. et al. **Effect of cementitious capillary crystalline waterproof material on the mechanical behavior of concrete.** *Journal of Building Engineering*, v. 98, p. 111287, 2024.
6. ZHANG, C. et al. **Coupling effect of cementitious capillary crystalline waterproof material and exposure environments on self-healing properties of engineered cementitious composites (ECC).** *Journal of Building Engineering*, v. 63, p. 105471, 2023.
7. WU, Z. et al. **Development of cementitious capillary crystalline waterproofing agents and durability study of concrete in the presence of chloride with sulfate in aqueous environment.** *Journal of Building Engineering*, v. 79, p. 107798, 2023.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.
9. IBI – Instituto Brasileiro de Impermeabilização. **Procedimento de teste padrão. GT-Redutor de permeabilidade.** São paulo – SP. 2022.
10. NORDTEST. NT BUILD 492: **Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.** Espoo, 1999.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2022.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.
14. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008
15. KHOMWAN, N. et al. **Effect of crystalline waterproofing materials on corrosion potential of steel in concrete.** *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, p. 12, 2024. DOI: 10.1007/s41062-023-01313-4.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

DESEMPENHO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS, POR MEIO DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS E PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.15>

Érica Batista Santos.S; Gabriel Agrisi P.; Heitor Tschaen.R;
Leonnardo Postinghel. B; Geilma Lima Vieira; Denise C. Dal Molin
Email: ericabatistasantos.civil@gmail.com

RESUMO

Este estudo investigou a autocicatrização em diferentes concretos, utilizando ensaio acelerado de íons cloreto e análise da taxa decicatrização por velocidade de onda ultrassônica e avaliação qualitativa por microscopia ótica. Fissuras de 0,1-0,2 mm e 0,3-0,4 mm foram induzidas aos 28 dias, e a cicatrização se deu submersa em água de 0 a 91 dias. Concretos com sílica ativa, cinza volante e aditivo cristalizante mostraram melhores resultados de cicatrização, enquanto concretos com escória de alto forno tiveram menor valor de penetração de íons cloreto. Quanto a análise qualitativa da microscopia, os concretos contendo escória de alto forno, cinza volante e aditivo cristalizante apresentaram maior fechamento na superfície da fissura na faixa de 0,1-0,2 mm.

Palavras-chaves: Autocicatrização; Migração de cloretos; Fissuras.

ABSTRACT

This study investigated the self-healing of different concretes using an accelerated chloride ion test and analysis of the healing rate by ultrasonic wave velocity and qualitative evaluation by optical microscopy. Cracks of 0.1-0.2 mm and 0.3-0.4 mm were induced at 28 days, and healing occurred submerged in water from 0 to 91 days. Concretes with silica fume, fly ash and crystallizing additive showed better healing results, while concretes with blast furnace slag had lower chloride ion penetration value. Regarding the qualitative analysis by microscopy, concretes containing blast furnace slag, fly ash and crystallizing additive showed greater closure on the crack surface in the range of 0.1-0.2 mm.

Palavras-chaves: Self-healing; Chloride migration; Fissures.



1. INTRODUÇÃO

A presença de fissuras no concreto caracteriza-se como uma das principais causas físicas de deterioração, sendo resultado de fatores como variação volumétrica devido a mudanças de temperatura e umidade, bem como das condições de carregamento e utilização da estrutura ao longo da sua vida útil, que podem contribuir com o agravamento das causas químicas (Mehta e Monteiro, 2014).

A presença de um ambiente agressivo com cloretos, combinada com fissuras, leva a uma diminuição do desempenho estrutural ao longo do tempo. Para enfrentar esse desafio, estudos sobre autocicatrização em materiais cimentícios têm ganhado reconhecimento internacional (Maes *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018), visando desenvolver estruturas de concreto mais resistentes a tais condições.

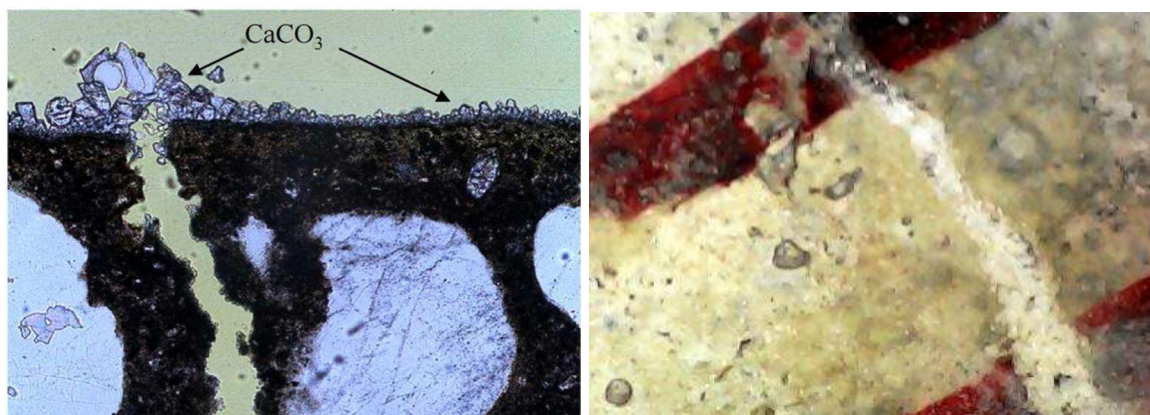
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Autocicatrização

O comitê RILEM 221 SHC define autocicatrização como qualquer processo intrínseco ao material que envolve suas próprias peças e/ou melhoria de desempenho. Além disso, esse comitê estabelece uma classificação mais simplificada das especificações de cicatrização, que inclui a cicatrização autógena e a cicatrização autônoma (Rooji *et al.*, 2013).

A cicatrização autógena de materiais cimentícios é o fenômeno que consiste no fechamento parcial ou total das fissuras e implicitamente, na recuperação parcial da durabilidade inicial e nos desempenhos mecânicos das matrizes cimentícias (DE BELIE *et al.*, 2018). Na autocicatrização autógena, os principais produtos formados no fechamento das fissuras são: carbonato de cálcio (CaCO_3), proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e e hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) (Snoeck *et al.*, 2016).

Figura 2 - Formações de cristais na superfície da fissura



Fonte: Os autores, 2025



2.2. Íons cloreto nas estruturas de concreto

A corrosão das armaduras de concreto causada por íons cloreto é um dos problemas mais graves em termos de durabilidade das estruturas de concreto armado (YILDIRIM, ILICA, & SENGUL, 2011). O impacto socioeconômico dos danos causados por cloretos é considerável, já que uma grande quantidade de recursos é gasta na manutenção e reparo de elementos estruturais afetados por esse fenômeno (Kim & Bumadian, 2017).

Os íons cloreto penetram nos poros do concreto, chegando perto da armadura onde, em conjunto com água e oxigênio, causam a instabilidade da capa protetora, iniciando o processo corrosivo. A maioria das teorias sobre esse fenômeno o considera dinâmico, com ciclos de desativação e reativação até que a desativação seja definitiva. É amplamente aceito que isso ocorre de forma localizada, resultando em corrosão por pites (MOTA *et al.*, 2012; FIGUEIREDO e MEIRA, 2013; NEVILLE, 2015; WEERDT *et al.*, 2015; MEIRA, 2017).

2.3. Propagação de onda ultrassônica

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica é feito a partir de um aparelho que gera um pulso de vibrações em uma frequência ultrassônica, que é transmitida por um transdutor, considerado o emissor, que é mantido em contato com a face de análise do concreto (Neville, 2014). O ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico pelo método direto é um dos mais utilizados na avaliação da recuperação dos materiais cimentícios devido à autocicatrização (Ferrara *et al.*, 2018). (Cappellessio 2018), trabalhou com o ensaio de velocidade de propagação de ondas para determinar a taxa de autocicatrização de concretos. Este é um ensaio bastante simples de ser realizado e gera, na maioria das vezes, resultados satisfatórios para a avaliação da autocicatrização interna (Petry, 2021).

2.4. Ensaio da NT BUILD 492 (1999)

A norma finlandesa NT BUILD 492 (Nordtest, 1999) descreve um procedimento de ensaio acelerado de migração de cloretos, em estado não-estacionário, com emprego de um campo elétrico constante e, usualmente, com a duração de apenas 24 horas. O procedimento de ensaio é realizado com a utilização de cilindros com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, os quais são, após a etapa de pré-condicionamento, posicionados entre uma solução com 10%, em massa, de cloreto de sódio (NaCl), utilizada como solução catódica, e uma solução com 0,3 N de hidróxido de sódio (NaOH), utilizada como solução anódica, sendo mantida, durante todo o período do ensaio, uma diferença de potencial elétrico entre as duas faces das amostras (Oliveira, 2018). A diferença de potencial elétrico efetivamente utilizada durante o ensaio é determinada com base na medida das correntes que atravessam as amostras quando uma voltagem de 30 V é previamente aplicada. Decorrido o período de duração previsto, as amostras são rompidas axialmente e uma solução de nitrato de prata é pulverizada em uma das seções recém-divididas para evidenciação das profundidades de penetração por processo colorimétrico.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do desempenho da autocicatrização dos concretos foi conduzida por meio de dois ensaios experimentais: migração de íons cloreto e velocidade de onda ultrassônica afim de obter o coeficiente de migração aos 28 dias, e a taxa de autocicatrização dos concretos ao longo do tempo, nas idades de 0 a 91 dias respectivamente. Foram utilizados 5 (cinco) concretos, sendo eles: referência (CPV ARI), Escória de alto forno (75%), sílica ativa (10%), cinza volante (50%) e aditivo cristalizante (5%). Para isso, os concretos foram fissurados aos 28 dias de idade em duas faixas de abertura, 0,1 a 0,2 mm, designadas como faixa 1, e as que variam de 0,3 a 0,4 mm, denominadas como faixa 2, e onde passaram por dois ciclos submersos em água de 28 dias, em câmara úmida para o processo de cicatrização. Foi realizada avaliação qualitativa dos concretos com o uso de microscópio óptico de 0 a 91 dias de cicatrização, a fim de visualizar o comportamento do fenômeno da autocicatrização dos concretos.

3.1. Materiais

O presente estudo científico representa uma colaboração entre duas instituições de ensino no Brasil: a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por meio de projeto de pesquisa financiado pelo CNPq. A dinâmica da pesquisa envolve uma divisão de responsabilidades entre as duas universidades. A UFRGS assume o papel na fase inicial do estudo, sendo responsável pela produção e envio dos corpos de prova. Após a confecção, os corpos de prova são enviados para a UFES em tempo hábil para a próxima fase desta pesquisa, que são os ensaios de durabilidade em laboratório.

3.2. Métodos

3.2.1. Abertura de fissuras

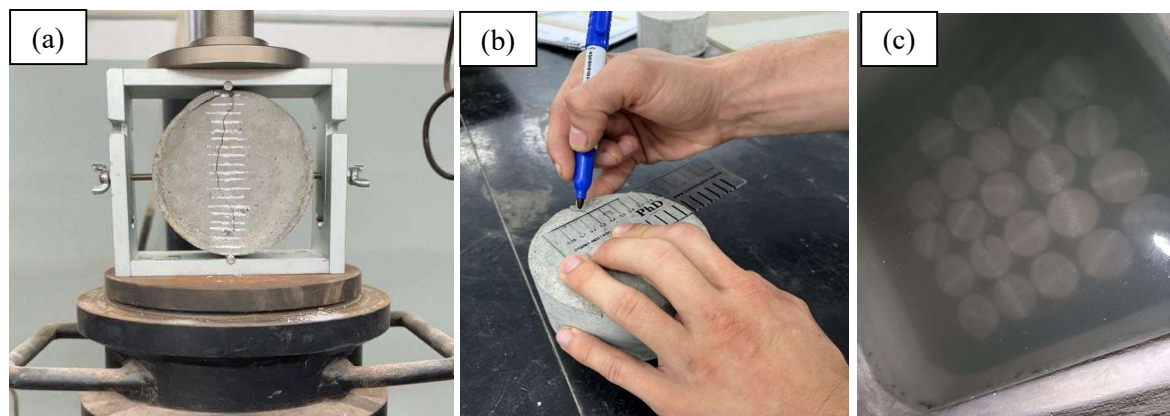
Assim que os corpos de prova enviados pela UFRGS, que possuem 100 mm de diâmetro por 50mm de altura, chegam ao Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES, são armazenados até atingirem a idade de 28 dias. Somente então é iniciado o processo de abertura de fissuras. Os corpos de prova são posicionados no aparato (patenteado e enviado pela equipe do NORIE), que se adapta à prensa, resultando na configuração das fissuras realizado por meio do ensaio de compressão diametral, conforme especificações da NBR 7222 (ABNT, 2011). Esse processo envolve a geração controlada de fissuras, garantindo que não ocorram danos irreversíveis ao objeto em análise, conforme ilustrado na figura 1 a seguir.



1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

Figura 1 – Abertura de fissuras: a) Aparato para abertura de fissuras. (b) Classificação da fissura gerada. (c) Imersão dos corpos de prova fissurados



Fonte: Os autores, 2025

3.2.2. Ensaio de migração de cloretos em estado não estacionário

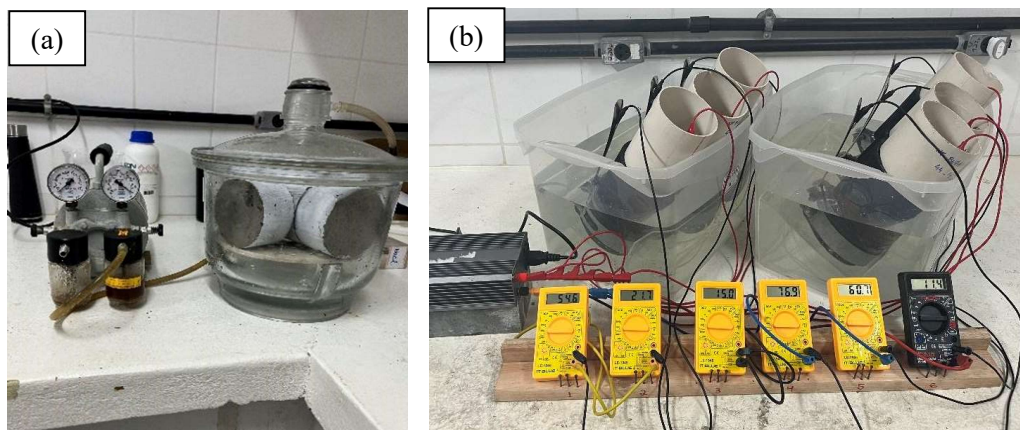
O ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário foi realizado com base na norma americana NT Build 492 (Nordtest, 1999). Neste caso, o aparato foi produzido com a utilização de uma caixa plástica, sendo a câmara de inserção do corpo-de-prova feito de tubo de PVC de 100 mm, isolado com cinta de borracha. Assim que os CPs são retirados do tanque, as superfícies laterais, já devidamente limpas e superficialmente secas, foram impermeabilizadas com adesivo epóxi e após um período de secagem de 20 minutos é iniciado o processo de pré-condicionamento. Tal processo envolve inserir os CPs em uma câmara de vácuo por uma pressão de aproximadamente 50 mBar (5 kPa) durante um período de 3 horas. Decorridas 3 horas, a câmara foi preenchida, ainda sob pressão de vácuo, com uma solução, previamente preparada de 8 litros de água potável e 20 gramas do reagente hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), permanecendo nesta condição por mais 1 hora. Com o término deste período, permitiu-se que o ar retornasse para o interior da câmara, mantendo-se os CPs em solução por um período de (18 ± 2) horas. Após esta etapa, foram posicionados no interior da cinta de borracha envolvidos por uma abraçadeira metálica cada, selando com silicone em todo perímetro lateral, tanto na parte superior como na inferior, de forma a manter o sistema estanque, sendo posteriormente verificada a vedação do mesmo. Em sequência, colocou-se uma solução anódica de 0,3 M de NaOH (hidróxido de sódio) a 0,3N no tubo de PVC de forma a facear a parte superior do CP ali inserido. Já na parte inferior, que corresponde à solução catódica, prepara-se solução de 10% de NaCl (cloreto de sódio), em massa em relação à água deionizada. Finalizados, os eletrodos foram conectados na parte superior (anodo) e inferior (catodo).



1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

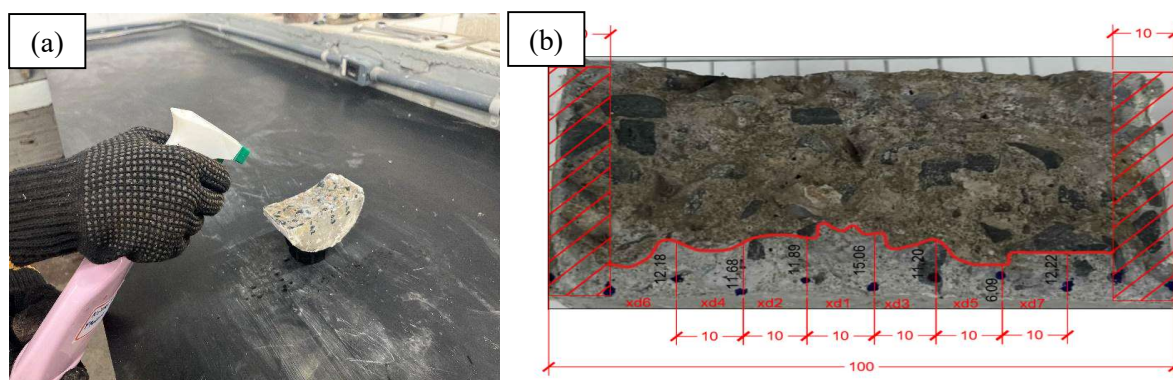
Figura 2 – Fase inicial: a) CPs em dessecador ligadas à bomba de vácuo (b) Ensaio NT Build 492 em execução.



Fonte: Os autores, 2025

Os concretos foram submetidos à tensão de 30 V, por um período de 6 (seis) horas. Adotou-se o tempo mínimo sugerido pela norma, devido à presença de fissuras nos corpos de prova, que facilitam a migração desses íons. No início do teste, foi realizada a medição da temperatura inicial em cada solução do ânodo com o auxílio de um termômetro, procedimento repetido na conclusão do ensaio para obtenção da temperatura final. Neste ensaio, a ação potencial elétrica aplicada através da amostra força os íons cloreto a migrar para dentro da amostra. Ao final do teste os corpos de prova de concreto foram partidos ao meio e, em cada face, fez-se a pulverização de uma solução de nitrato de prata, de forma a permitir a análise e mensuração da penetração de cloretos (Figura 3) de modo a possibilitar o cálculo do coeficiente de migração de cloretos.

Figura 3 – a) Aspersão da solução de nitrato de prata (b) Medição da profundidade de penetração



Fonte: Os autores, 2025

O coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm} ou coeficiente aparente) foi calculado, a partir da profundidade de penetração de cloretos, das seis amostras ensaiadas, do mesmo traço e idade de concreto, através da equação simplificada da norma (Equação 1).



$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right)$$

(1)

Onde:

D_{nssm} = coeficiente de migração em estado não estacionário [$\times 10^{-12}$ m²/s]

U = valor absoluto da voltagem aplicada [V]

T = média das temperaturas inicial e final da solução anódica [°C]

L = espessura da amostra [mm], média obtida de três medidas

x_d = valor médio da profundidade de penetração de cloretos [mm], obtido de sete medidas

t = tempo de duração do ensaio [horas].

3.3. Propagação de onda ultrassônica

Usando a metodologia de Costa (2024) adaptada, foi realizado a medição das velocidades nas idades de 0 dias, 28 dias e 91 dias, durante o período de cicatrização submersa em água em câmara úmida. Foi realizado o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas antes da indução da fissura, considerada como leitura de referência para o parâmetro da autocicatrização. Bem como o registro da velocidade após a fissuração em cada faixa de fissura. O equipamento utilizado para captação de onda ultrassônica foi o Pundit PL-200, da marca Proceq, com frequência de 54KHz. Para que houvesse maior área de contato entre o corpo de prova e os transdutores, optou-se por realizar a leitura na face fissurada do corpo de prova. A partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica, a taxa de autocicatrização aos 28 e 91 dias foi calculada conforme a equação 1.

$$Tt0 = \frac{V_{ti} \times 100}{V_{ml}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Tt0 = taxa de autocicatrização (%);

V_{ml} = velocidade média de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova íntegros, nas idades de acompanhamento;

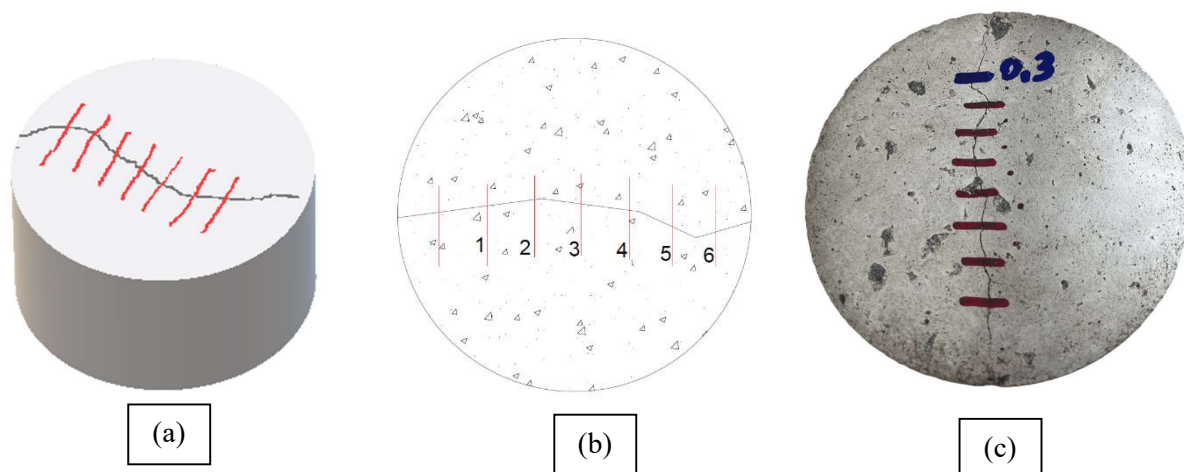
V_{ti} = velocidade de propagação de onda ultrassônica após a abertura da fissura, nas idades de acompanhamento.

3.4. Análise de imagens

Utilizou-se o microscópio óptico digital VD3035s, com ampliação de até 1600x de zoom, para a análise superficial das fissuras contidas nos corpos de prova. A microscopia ótica foi empregada de forma qualitativa para monitorar a formação dos produtos de autocicatrização ao longo do tempo. Os corpos de prova cilíndricos foram divididos em seis microzonas, com 8mm cada, foram capturadas imagens de cada microzona, conforme mostra a Figura 4. Para este estudo, optou-se por analisar apenas uma região de cada concreto em sua respectiva idade de acompanhamento.



Figura 4 – Metodologia de acompanhamento de autocicatrização por microscopia ótica (a) vista geral com marcação das microzonas; (b) representação esquemática com descrição da quantidade de imagens registradas; (c) registro fotográfico de amostra do programa experimental com sinalizações



Fonte: Os autores, 2025

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Migração de íons cloreto

Os dados foram coletados e a partir dos resultados obtidos, foi feita a análise estatística dos dados, considerando como diferenças significativas $p < 0,05$ (ANOVA, Tukey, $p < 0,05$). Na tabela 2, são apresentados os resultados da análise de variância realizada do ensaio de migração de íons cloreto.

Tabela 2 – Efeito da interação dos concretos e faixa de fissura na migração de íons cloreto

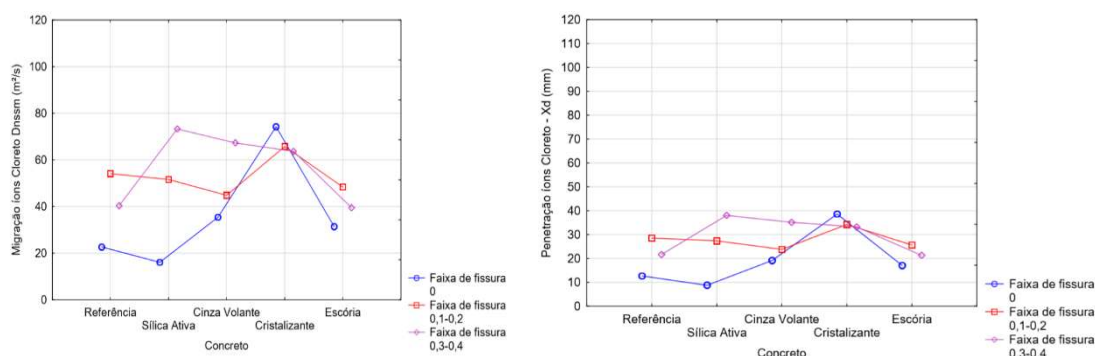
Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	S
Concreto	4909,4	4	1227,4	2,9223	0,037407	S
Faixa de fissura	3695,9	2	1848,0	4,3999	0,021104	S
Concreto*faixa de fissura	5032,9	8	629,1	1,4979	0,199625	Ns.
Erro	12599,9	30	420,0			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor de F; p: nível de significância; se $p < 5\%$ = efeito significativo. Ns: não significativo. S: significativo.

Fonte: Os autores, 2025



Figura 5 – Gráfico da interação dos concretos e faixa de fissura na migração de íons cloreto



Fonte: Os autores, 2025

Os concretos apresentaram comportamentos distintos quanto ao coeficiente de migração de íons cloreto, com o tipo de concreto e a faixa de fissura sendo estatisticamente significativos. Os concretos com sílica ativa e cristalizante mostraram resultados semelhantes, com aumento na penetração de cloretos. O concreto com sílica ativa teve desempenho inferior, possivelmente devido à redução da autocicatrização de fissuras pela carbonatação do Ca(OH)_2 , consumido nas reações pozolânicas (Gjorv, 2015; Neville, 2016). A adição de sílica ativa reduz o pH, aumentando a proporção de cloretos livres, pois há a redução do teor de aluminatos, que fixa o cloreto na matriz (Castellote et al., 2002; Yuan et al., 2009). O concreto com escória obteve melhor desempenho, com a escória de alto forno alterando a microestrutura, tornando-a mais compacta e reduzindo a migração de cloretos, tanto pelo efeito físico quanto pelo aumento da capacidade de fixação de cloretos devido aos aluminatos presentes na escória (Madrid, García e Borges, 2016; Dihr et al., 1996). Lee e Lee (2016) verificaram que o aumento da escória reduziu o volume de vazios permeáveis, tornando a matriz mais densa. O concreto com cinza volante, em comparação com os de sílica ativa e cristalizante, apresentou redução na migração de íons cloreto devido ao material pozolânico e à melhoria física da microestrutura, especialmente na interface das partículas de agregados (Neville, 2016). Por fim, o concreto de referência não apresentou resultados tão significativos para o ensaio estudado.

4.2 Propagação de onda ultrassônica

Na tabela 3, são apresentados os resultados da análise de variância realizada do ensaio do ultrassom para determinação da taxa de autocicatrização dos concretos.

Tabela 3 – Efeito isolado do tipo de concreto na taxa de autocicatrização aos 28 e 91 dias

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Concreto 28 dias	1279,70	4	319,92	69,192	0,000145	S
Concreto 91 dias	2268,84	4	567,21	26,160	0,001504	S
Erro	108,41	5	21,68			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F (calc): valor de F; p: nível de significância; se $p < 5\%$ = efeito significativo. Ns: não significativo. S: significativo.

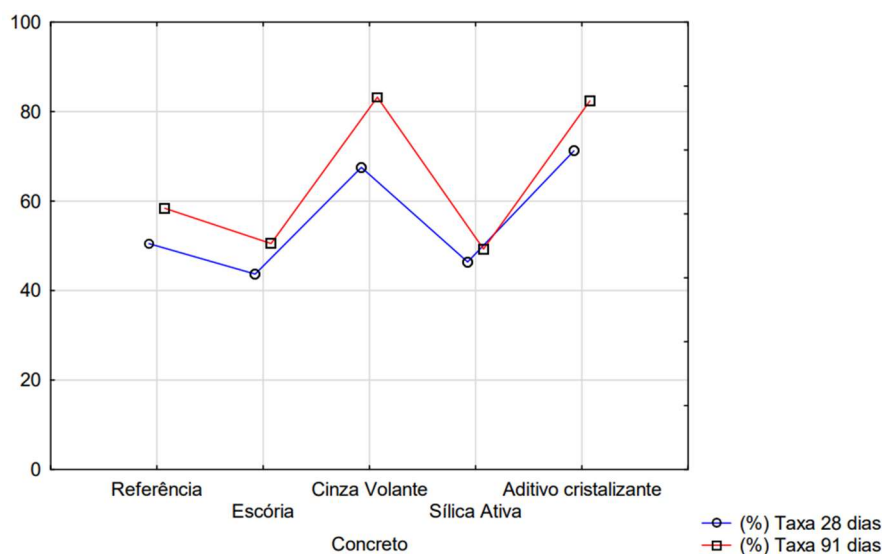
Fonte: Os autores, 2025



1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

Figura 6 – Gráficos do efeito isolado dos concretos na taxa de autocicatrização aos 28 e 91 dias



Fonte: Os autores, 2025

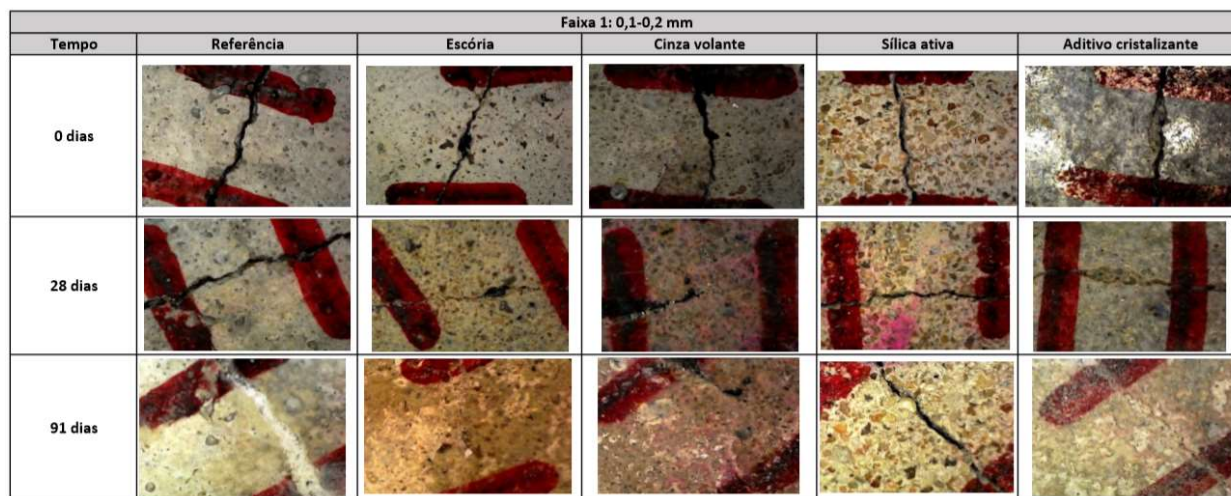
Em relação à faixa de fissura dos concretos avaliados, observou-se que, para aberturas menores (0,1-0,2mm), todos os concretos apresentaram taxa de cicatrização superior a 49%. Já para aberturas maiores (0,3-0,4mm), a taxa de cicatrização foi acima de 50%. De maneira geral, o concreto com aditivo cristalizante e as adições pozolânicas de escória de alto forno e cinza volante apresentaram resultados semelhantes na capacidade de cicatrização aos 28 e 91 dias. Aos 28 dias, as adições pozolânicas já estavam reagindo e formando C-S-H secundário, enquanto o concreto com cimento puro já estabilizou suas reações. O concreto com escória de alto-forno, contendo 25% de cimento, demonstrou maior capacidade de autocicatrização, pois há menos grãos de cimento não reagidos e mais material pozolânico em reação contínua. Huang e Damidot (2014) constataram que um alto teor de escória proporciona cicatrização mais rápida e eficaz em comparação com o cimento Portland. Os resultados foram semelhantes aos de Roig-Flores et al. (2015), que observaram taxas de autocicatrização superiores quando o concreto esteve submerso. Nas figuras 7 e 8 estão apresentados a análise de imagens realizadas nas idades estudadas.



1º SIBRACIC

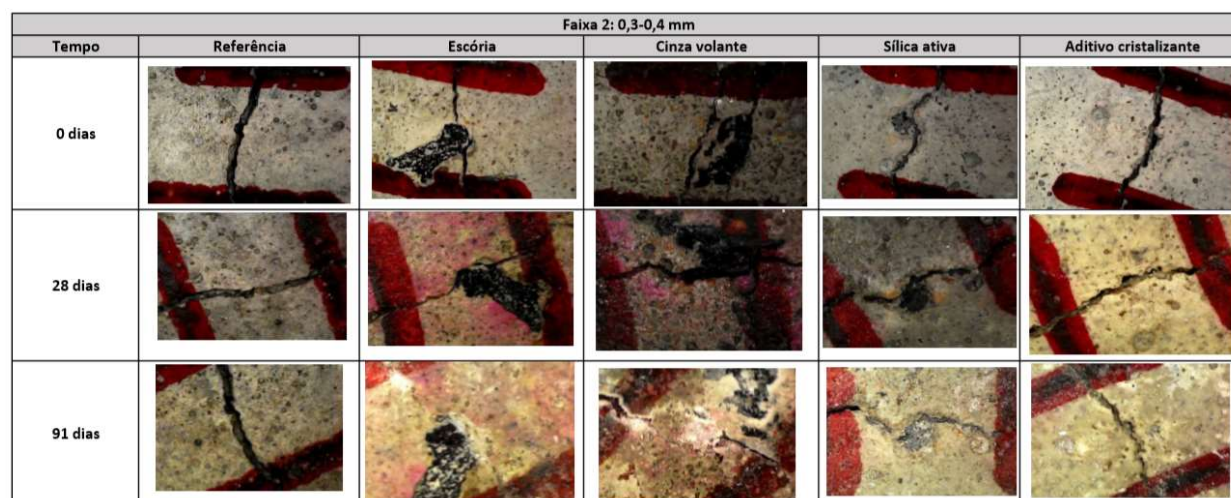
Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

Figura 7 – Microscopia ótica: Faixa de fissura 1



Fonte: Os autores, 2025

Figura 8 – Microscopia ótica: Faixa de fissura 2



Fonte: Os autores, 2025

Qualitativamente, observou-se o selamento completo da fissura, indicando que a técnica de autocicatrização foi satisfatória. A água foi apontada como a principal responsável por promover o mecanismo de autocicatrização, enquanto a exposição ao ar foi considerada a pior situação, conforme observações de Ferrara et al. (2014) e Krelani e Ferrara (2013). O concreto com sílica ativa não apresentou evidências de autocicatrização superficial das fissuras, pois o hidróxido de cálcio, que seria lixiviado para preencher a fissura, foi consumido pela reação pozolânica da sílica ativa. A formação de CaCO_3 na abertura das fissuras, um dos principais processos da autocicatrização autógena, ocorre devido à lixiviação do Ca(OH)_2 , sendo dependente da temperatura, pH e concentração dos reagentes (DE ROOIJ et al., 2013). Nas imagens analisadas, foi possível observar a formação de cristais na superfície das fissuras, provavelmente CaCO_3 , devido à lixiviação do Ca(OH)_2 .

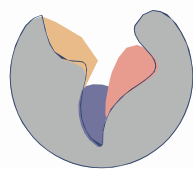


AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra um projeto de pesquisa desenvolvido pelo Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) no âmbito do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no âmbito do laboratório de materiais de construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Também agradecemos ao CNPq, pelo apoio financeiro do projeto e à CAPES, pela bolsa de mestrado dos pesquisadores.

REFERÊNCIAS

1. NBR 8802: concreto endurecido — determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
2. HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 71–81, 2013.
3. NORDTEST METHOD. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments: NT BUILD 492. Oslo, 1999.
4. LEE, Y. S.; PARK, W. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology* Springer Verlag, 2018.
5. LUO, M., QIAN, C., & LI, R. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2015.
6. NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto - 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
7. VAN TITTLEBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*, 2013.
8. ZEINALI, F., AHMADI, J., & RAHMANI, H. Self-healing capacity assessment of cracked slag modified concrete under different re-curing conditions. *Construction and Building Materials*, 2023.
9. DHIR, R. K.; EL-MOHR, M. A. K.; DYER, T. D. Chloride binding in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n. 12, p. 1767–1773. 1996.
10. CAPPELLESSO, V. et al. Self-healing approach on early age cracked concretes with smart admixture. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 1, p. 89–92, 2016.
11. CAPPELLESSO, V. G. Influência do tipo de cimento na autocicatrização de fissuras em concreto. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2018.
12. DE ROOIJ, M. et al. RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Springer, v. 1, p. 242, 2013. GJØRV, O. E. Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. *Oficina de Textos*. São Paulo, 2015.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

ESTUDO DA MELHORIA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETO AUTOCICATRIZANTE REGENERATIVO COM SILICATO MODIFICADO POR ENZIMAS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.16>

Leonardo Otto Coutinho

Email: leonardo.coutinho@alchemco.com.br

Luiz Otávio Ribeiro Squillace

Email: luiz.otavio@alchemco.com.br

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo demonstrar que utilização do concreto autocicatrizante regenerativo possui características físico-químicas que possibilitam o aumento na durabilidade das estruturas de concreto armado que estejam inseridas em ambientes agressivos com o ataque de carbonatação e eflorescência. Além disso, esse artigo apresentará e discutirá os resultados de compressão axial obtidos através da comparação entre corpos de prova de referência e de corpos de prova em que o silicato modificado por enzimas (autocicatrização regenerativa) e como esses resultados podem melhorar na durabilidade das estruturas de concreto armado.

Palavras-chaves: ataque de carbonatação, aumento de durabilidade, concreto autocicatrizante regenerativo, mitigação das manifestações patológicas.

ABSTRACT

The present article aims to demonstrate that the use of regenerative self-healing concrete has physical-chemical characteristics that enable an increase in the durability of reinforced concrete structures that are inserted in aggressive environments with the attack of carbonation and efflorescence. Furthermore, this article will present and discuss the axial compression results obtained through the comparison between reference specimens and specimens in which the silicate is modified by enzymes (regenerative self-healing) and how these results can improve the durability of the structures. reinforced concrete.

Palavras-chaves: carbonation attack, increased durability, regenerative self-healing concrete, mitigation of pathological manifestations.



1. INTRODUÇÃO

O concreto armado possui um papel crucial na viabilidade econômica financeira nos empreendimentos residenciais, comerciais, industriais e de infraestrutura, pois sua versatilidade, desempenho, custo e durabilidade conseguem, em grande parte dos projetos, ser a melhor alternativa dentro da análise de gestão de ativos. Entretanto, é fundamental manter a integridade estrutural pelo maior tempo possível, pois somente assim é possível maximizar o resultado, proporcionando maior retorno ao investidor, assegurando assim maior facilidade na captação de recursos para investimento nesse empreendimento.

Por outro lado, é cada vez mais frequente a necessidade de custos precoces relacionados à manutenção das estruturas de concreto armado, seja por falhas executivas, seja por cronogramas extremamente apertados, ou em outros casos, mesmo executando a estrutura de concreto armado utilizando a boa técnica, há uma deterioração indesejada e antecipada, sem uma correlação direta a uma ou mais causas. De acordo com GJORV (2015), em seu estudo ele constata que a estrutura de concreto recentemente concretada mesmo que obedeça os procedimentos técnicos corretamente, em alguns casos, têm apresentado de forma irregular e variável a deterioração precoce das estruturas de concreto armado, independentemente dos materiais utilizados e da qualidade do projeto de vida útil, principalmente quando localizadas em ambiente de severa agressividade. Portanto, é fundamental procurar soluções que possam trazer uma proteção adicional nas estruturas de concreto armado, principalmente nas inseridas em ambiente de severa agressividade.

Dentre os principais agentes de degradação das estruturas de concreto armado estão os processos de eflorescência e carbonatação, que indicam problemas de umidade e lixiviação de compostos da matriz cimentícia, podendo comprometer seriamente, através do processo de corrosão, a sua durabilidade e integridade estrutural. A utilização de tratamentos químicos e barreiras físicas têm sido utilizados frequentemente para prolongar a vida útil dessas estruturas, mitigando custos adicionais de manutenção indesejados e interdição dessas estruturas para reparo.

Diversos autores confirmam que quanto maior for a resistência à compressão axial e menor for a relação a/c , maior é a tendência que a própria estrutura terá em se proteger no ambiente em que se encontra. A porosidade nas estruturas de concreto armado está diretamente relacionada ao adensamento e cura do concreto, mas mesmo que essas duas etapas sejam executadas corretamente, da relação a/c , aproximadamente 25% da água presente na mistura de amassamento é utilizada na hidratação dos grãos de cimento e aproximadamente 75% dessa água acaba absorvida ou evaporando, formando então poros capilares e poros em gel na estrutura de concreto armado. De acordo com OWENS (1989), para concretos com 170 l/m^3 a 200 l/m^3 , aproximadamente 17,5% da água da relação água/cimento reage quimicamente com os grãos de cimento para sua hidratação.

Portanto, a porosidade da estrutura de concreto armado e a interconectividade de seus vazios é um fator chave para acelerar a degradação dessas estruturas. De acordo com MOREIRA (2001), quanto maior é a resistência a compressão axial das estruturas, maior será a sua proteção contra ataque químico. Já HELENE (2003), além de considerar a resistência a compressão um fator chave para a maior proteção da estrutura de concreto armado contra o



ataque químico, também ressalta que a espessura do cobrimento e a idade da estrutura também devem ser analisados. METHA E MONTEIRO (2014) destacam que concretos de alta resistência apresentam menor porosidade, o que reduz significativamente a penetração de dióxido de carbono e outros agentes agressivos.

NEVILLE (1995) reforça que concretos de baixa permeabilidade retardam o avanço da carbonatação, protegendo as armaduras contra a corrosão. A carbonatação, embora um fenômeno natural em concretos expostos ao ambiente, pode ser mitigada por meio de uma mistura de concreto bem projetada, associada a aditivos ou a adições minerais como sílica ativa, que contribuem para o refinamento da microestrutura.

Este artigo explora como a adoção de proteções adicionais para estruturas de concreto armado, associada ao controle das propriedades mecânicas do material, contribui para o aumento da durabilidade e para a redução de custos de manutenção ao longo do seu ciclo de vida, buscando correlacionar a resistência à compressão, os processos de degradação e a gestão de ativos, fornecendo uma abordagem integrada para projetos mais eficientes e sustentáveis.

2. CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO MODIFICADO POR ENZIMAS

O aditivo modificado por enzimas, também conhecido como aditivo autocicatrizante regenerativo, possui base química de silicatos modificados por enzimas, que ao penetrar na estrutura de concreto armado e entrar em contato com a água, reage quimicamente, formando um gel C-S-H hidroreativo, que possui a capacidade de preencher os poros, vazios e capilares na matriz cimentícia. Esse material foi desenvolvido em 1975 na Dakota do Norte nos Estados Unidos da América pelo químico Curtis Nelson.

Segundo o fabricante, o silicato modificado por enzimas possui densidade específica de 1,125, com conteúdo de sólidos de 27,7%, não é inflamável, possui um PH de 11,7, com ponto de ebulição inicial de 101°C. Além de preencher os vazios do concreto com o gel C-S-H hidroreativo, o material possui capacidade de penetrar na estrutura de concreto armado de até 20mm, e por causa das enzimas presentes no material, o mesmo permanece em estado de gel C-S-H hidroreativo, que tem a capacidade de acompanhar as dilatações térmicas da estrutura e continuar selando fissuras passivas de até 0,4mm que por ventura possam surgir na estrutura de concreto armado.

Além do gel C-S-H hidroreativo continuar reagindo dentro da estrutura de concreto armado, ensaios fornecidos pelo fabricante demonstram que há um aumento na dureza superficial do concreto na escala Mohs, desenvolvida em 1812 por Friedrich Mohs, é um sistema de classificação que mede a dureza relativa dos minerais, baseada na capacidade de um mineral de dureza conhecida riscar o outro mineral. O concreto possui uma dureza na escala Mohs que varia de 4 a 7, dependendo da sua composição, densidade e estado de cura, portanto, concretos com menor resistência (menor que 20 MPa), possuem uma dureza próxima a escala de nível 4 e concretos de alta resistência, acima de 50 MPa, podem se aproximar a escala de 7. No ensaio fornecido pelo fabricante, a amostra de referência demonstrou ter uma escala próxima de 6 e com a aplicação do silicato modificado por enzimas essa escala aumentou para o nível 8.



O silicato modificado por enzimas é comercializado em estado líquido e é aplicado por pulverização no concreto endurecido, que após a cura do concreto, sua tecnologia baseada em enzimas, mantém a reação química em estado de gel, diferencial singular, pois a reação que outros silicatos presentes no mercado possuem com a estrutura de concreto se baseia na formação de cristais.

Diversas características físico-químicas da estrutura de concreto armado são aprimoradas com o aumento da sua resistência, e a utilização do silicato modificado por enzimas busca preencher os poros, vazios e capilares, reduzindo a sua interconectividade dos seus vazios, a saber: proteção contra a carbonatação e eflorescência, proteção contra o ataque de íons cloreto, ataque de sulfato, ataque de ureia, dentre outras agressividades ambientais.

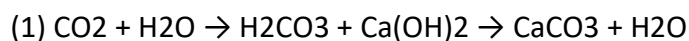
2.1. Eflorescência

A eflorescência é o resultado do carreamento pela água principalmente do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e do hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2), que ao serem dissolvidos pela água, migram para a superfície da estrutura de concreto armado através dos poros e da sua interligação dentro da matriz cimentícia. Quando chegam na superfície, há a evaporação da água e esses sais solúveis cristalizados ficam visíveis na superfície da estrutura de concreto armado, possuindo uma coloração branca ou acinzentada.

A perda desses álcalis (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio) ao longo do tempo, ocasiona uma redução no PH do concreto, que quando recém executado possui um PH variando de 12,3 a 13,5 e nessa alcalinidade o concreto mantém-se com o PH elevado, proporcionando a proteção da passivação do aço. Quando a redução do PH do concreto reduz ao ponto em que chega ao PH igual a 9, inicia-se o processo de desp passivação das armaduras normalmente realizado pelo ataque de carbonatação ou pelo ataque de cloreto. As estruturas de concreto armado com alta resistência possuem uma microestrutura menos permeável reduzindo o transporte de umidade dentro da matriz cimentícia.

2.2 Carbonatação

O processo de carbonatação, conforme apresentado na Equação 1, decorre da reação química do dióxido de carbono (CO_2), presente no ambiente ao reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na matriz cimentícia, forma o carbonato de cálcio CaCO_3 , reduzindo ainda mais o PH do concreto, comprometendo a passivação das armaduras, que ao chegar com um PH igual a 9 inicia-se o processo de corrosão das armaduras.



Ácido Carbônico Carbonato de Cálcio

Por possuir uma microestrutura mais densa, em concretos armados com resistência mais elevada, há menor quantidade de poros e vazios na estrutura e menor interconectividade entre os vazios dentro da estrutura de concreto armado, retardando a velocidade da frente de carbonatação. Portanto o aumento da resistência a compressão axial está diretamente relacionado a redução da permeabilidade na estrutura de concreto armado, postergando a velocidade de penetração da frente de carbonatação, aumentando a vida útil da estrutura.



3. ENSAIO NBR 5739 - COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

O objetivo principal do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos é determinar a resistência característica à compressão axial do concreto (f_{ck}), parâmetro utilizado na determinação da resistência da estrutura de concreto armado ao carregamento dimensionado no seu projeto estrutural. Portanto, é fundamental entender qual é a resistência do concreto a compressão, sendo possível comparar o resultado dessa resistência obtida no ensaio com a resistência dimensionada em projeto e entender com mais profundidade a qualidade do concreto, homogeneidade e controle de produção e as propriedades de durabilidade da estrutura (permeabilidade e durabilidade).

O traço utilizado no ensaio de compressão axial para execução das amostras para os corpos de prova foi de 1:2,44:2,14:1,43:0,6 (cimento:areia:brita 1:brita 2:água), curadas por 28 dias, após a cura, sendo secas por 34 dias, separou-se os corpos de prova de referência (306-19 REF) e aplicou-se o silicato modificado por enzimas de forma pulverizada a uma taxa de 200 mL/m² nos corpos de prova 306-19, após a aplicação do silicato modificado por enzimas, a hidratação desses corpos de prova foi realizada por três dias, colocando as amostras por mais 28 dias de cura úmida, com umidade de 100% e temperatura ambiente de, aproximadamente, 22 °C, antes de realizar o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os corpos de prova (306-19 REF e 306-19) foram submetidos aos mesmos procedimentos de preparação antes de realizar o ensaio de compressão axial, a única diferença entre a elaboração das amostras 306-19 REF e 306-19 foi a aplicação do silicato modificado por enzimas nas amostras 306-19. Os resultados do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos obedeceram a todas as especificações da norma NBR 5739 (ABNT, 2018) e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

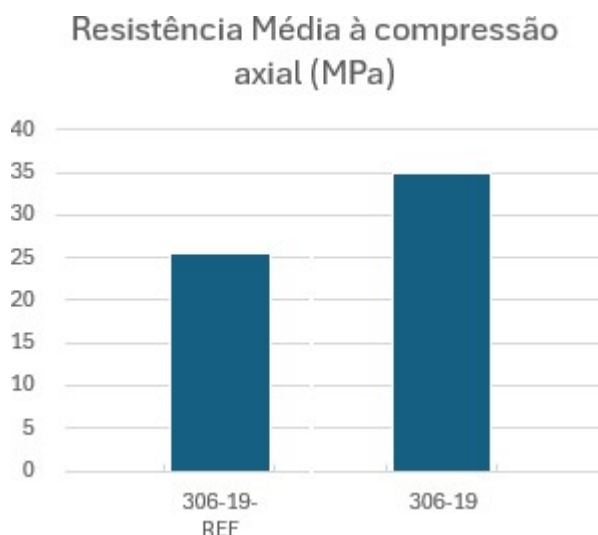
Amostra	CP's	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência Média à compressão axial (MPa)
306-19-REF	1	26,3	25,5
	2	23,6	
	3	26,7	
306-19	4	33,6	35,0
	5	36,1	
	6	35,2	

A resistência a compressão média dos corpos de prova de referência (306-19 REF) foi de 25,5 MPa, já o resultado de compressão média com os corpos de prova onde o silicato modificado por enzimas (306-19) foi aplicado teve como resultado médio de compressão axial o valor de 35,0 MPa (resultando em um aumento de resistência à compressão de 38,9%). Devido aos mais diversos estudos publicados sobre a correlação entre o índice de fissuração e a resistência à compressão do concreto, esse aumento na resistência indica uma diminuição no potencial de fissuração da estrutura e consequentemente um aumento na sua durabilidade.



O gráfico 1 apresenta os resultados da resistência média à compressão axial utilizando a norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

Gráfico 1 – Resistência média à compressão axial



4. CONCLUSÃO

Comparativamente, houve um aumento significativo de aproximadamente 38,9% de acréscimo na resistência axial na média das amostras dos corpos de prova com a aplicação do silicato modificado por enzimas no ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Esse resultado é bastante expressivo, pois a característica do silicato modificado por enzimas reagir com a estrutura de concreto armado, formando um gel C-S-H hidroreativo que preenche os poros, vazios e capilares da matriz cimentícia auxiliou no aumento na resistência da estrutura de concreto armado, como também gera uma barreira física ao ingresso de água com maior profundidade, pois reage toda vez que entra em contato com a água, ficando limitada à uma penetração de até 2,0cm de acordo com as características e porosidade da estrutura de concreto armado. Segundo a NBR 6118 (2024), o cobrimento nominal mínimo em um ambiente urbano classe de agressividade II é de 25mm para lajes e de 30mm para vigas e pilares, já em ambiente marinho ou ambiente industrial, que possuem classe de agressividade III, devem ter um cobrimento nominal mínimo de 35mm para lajes e de 40mm para vigas e pilares nas suas estruturas de concreto armado de acordo com as Tabelas 6.1 e 7.2 dessa mesma norma.

Além do aumento da resistência à compressão axial, o silicato modificado por enzimas também auxilia no aumento da dureza superficial segundo a escala Mohs, o ensaio fornecido pelo fabricante demonstrou há um aumento na escala do concreto de 6 para 8, mais um fator importante a ser considerado na utilização de aditivos protetores para as estruturas de concreto armado.



Portanto esse benefício de aumento significativo de resistência na estrutura de concreto armado, juntamente com a redução da permeabilidade do concreto e por possuir um PH alcalino igual a 11,7, o silicato modificado por enzimas é uma solução extremamente efetiva e duradoura em ambientes de severa agressividade ambiental, protegendo de sobremaneira a estrutura de concreto armado contra o ataque de eflorescência, carbonatação e percolação de água dentro da matriz cimentícia.

Recomenda-se que outros pesquisadores estudem e busquem novas características do silicato modificado por enzimas, pois de acordo com os resultados obtidos nesse artigo, o material se comportou de forma inequívoca para a melhoria do desempenho da estrutura de concreto armado, proporcionando uma proteção adicional significativa na integridade da estrutura de concreto armado e na mitigação da degradação dessa estrutura caso esteja inserida em ambiente de severa agressividade.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2024.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
3. GJORV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Revisão técnica: FIGUEIREDO, Enio P., HELENE P., p. 1ª, 2015.
4. HELENE, Paulo. **A nova NB 1/2003 (ABNT NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto**. University of Sao Paulo PCC USP, 2003.
5. METHA, P. K., & Monteiro, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill Education, 2014.
6. MOREIRA, Heloisa Pimentel; FIGUEIREDO, Enio Pazini; HELENE, Paulo RL. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros**. EPUSP, 2001.
7. NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete (4ª ed.)**. Pearson Education, 1995.
8. OWENS, P. L. **Water and its role in concrete**. Concrete International, Detroit, v.11,n.12, p.68-70, Dec. 1989.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

INFLUÊNCIA DA AUTOCICATRIZAÇÃO SUPERFICIAL NO POTENCIAL DE CORROSÃO POR CLORETOS EM CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.17>

Julia da Rosa Costa

Email: juliadarcosta@hotmail.com

Gabrieli Lazzari Vieira

Email: gabilazzarivieira@gmail.com

Laís Zucchetti

Email: lais.zucchetti@ufrgs.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Email: dmolin@ufrgs.br

Ângela Borges Masuero

Email: angela.masuero@ufrgs.br

RESUMO

A autocicatrização em materiais cimentícios é um assunto de grande importância na atualidade. Este artigo tem como objetivo analisar a influência do fechamento superficial das fissuras na penetração de cloretos em concretos, utilizando microscopia ótica para avaliar o fechamento externo e o potencial elétrico para medir a penetração de cloretos. Será comparado um concreto com aditivo cristalizante com um concreto referência, para avaliar a capacidade autocicatrizante deste aditivo. Pelo que foi possível observar, não houve relação entre o fechamento externo e a penetração de cloretos, uma vez que os resultados não coincidiram.

Palavras-chaves: concreto, autocicatrização, *self-healing*, aditivo cristalizante, cloretos.

ABSTRACT

Self-healing in cementitious materials is a subject of great importance today. This article aims to analyze the influence of surface closure of cracks on chloride penetration in concrete, using optical microscopy to evaluate external closure and electrical potential to measure chloride penetration. A concrete with crystallizing additive will be compared with a reference concrete to evaluate the self-healing capacity of this additive. From what was observed, there was no relationship between external closure and chloride penetration, since the results did not coincide.

Palavras-chaves: concrete, self-healing, crystalline admixture, chlorides.



1. INTRODUÇÃO

As fissuras são parte integrante e inerente do concreto armado e mesmo tomando todas as medidas preventivas, nem sempre é possível evitar completamente o aparecimento destas manifestações patológicas. Vale ressaltar que um concreto fissurado pode sofrer penetração mais rápida de agentes agressivos em direção às armaduras, quando comparado a um concreto íntegro ⁽¹⁾. Isso resulta na redução da vida útil das edificações e na necessidade precoce de manutenção ⁽²⁾⁽³⁾. Os reparos em estruturas contribuem para o aumento da demanda por matérias-primas, a emissão de gases do efeito estufa na fabricação desses materiais, além dos custos financeiros.

Atualmente existem vários materiais e tecnologias que podem auxiliar no fechamento dessas fissuras no concreto. Na abordagem autônoma, várias tecnologias podem ser usadas, incluindo polímeros superabsorventes ⁽⁴⁾⁽⁵⁾, aditivos cristalizantes ⁽⁶⁾⁽⁷⁾, adições inteligentes ⁽⁸⁾ e a ação de micro-organismos, como bactérias e fungos ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾.

A autocicatrização, então, é estabelecida como a capacidade de um material de cicatrizar, recuperar e/ou reparar danos, de forma autônoma, sem que se faça necessária uma intervenção externa ⁽¹¹⁾. O fenômeno da autocicatrização é importante porque, com o fechamento das fissuras, também se torna mais difícil a penetração de agentes agressivos, como por exemplo os cloretos, que podem causar corrosão de armaduras.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar a relação entre o fechamento superficial das fissuras, observado em microscópio ótico, com o potencial de corrosão, indicando a corrosão por cloretos. Para isso, serão comparados um concreto referência e um concreto com aditivo cristalizante. Os mesmos desempenham um papel importante na recuperação da capacidade de autocicatrização do concreto. Eles possuem a capacidade de absorver a umidade presente na atmosfera, o que permite que promovam uma cura significativa ⁽⁷⁾. Neste experimento, os corpos de prova de um concreto referência e de um concreto com 1% de aditivo cristalizante foram fissurados aos 3 dias e aos 28 dias de idade e posteriormente cicatrizados por 56 dias. As fissuras foram determinadas com uma faixa de abertura de 0 a 0,2mm.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos os materiais e a metodologia empregados, com o objetivo de detalhar o estudo. A caracterização destes materiais, bem como a metodologia, estão detalhadas em Costa (2024)⁽¹²⁾.

2.1 Materiais

Primeiramente, são apresentados e caracterizados os materiais empregados no experimento.

2.1.1 Agregados

Como os corpos de prova utilizados possuem altura de 35mm, foi selecionado um agregado gráudo de menores dimensões, a brita 0. Além disso, o agregado miúdo escolhido foi uma areia quartzolítica média. A caracterização destes materiais está apresentada na Tabela 1.



Tabela 1 – Caracterização dos agregados

Propriedades avaliadas	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Método de ensaio
	Resultados	Resultados	
Massa específica (g/cm ³)	2,55	2,88	ABNT NBR NM 52:2009 ⁽¹³⁾
Módulo de finura	2,59	6,93	ABNT NBR 17054:2022 ⁽¹⁴⁾
Dimensão máxima característica	4,75mm	12,5mm	ABNT NBR 17054:2022 ⁽¹⁴⁾
Absorção de água (%)	1,71	1,03	ABNT NBR NM 30:2000 ⁽¹⁵⁾
Índice de vazios (%)	37,20	46,16	ABNT NBR NM 45:2006 ⁽¹⁶⁾
Distribuição granulométrica	0,15 – 4,75 mm	4,75 – 12,5 mm	ABNT NBR 17054:2022 ⁽¹⁴⁾

2.1.2 Cimento

O cimento CPV ARI foi usado no trabalho porque este não contém adições quimicamente ativas. Dessa forma, os resultados apresentados pelo uso do aditivo cristalizante ficam mais claros. A caracterização desse cimento encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do cimento

Propriedades avaliadas	Resultados	Método de ensaio
Diâmetro médio (µm)	12	Granulometria à laser
Massa específica (g/cm ³)	3,01	ABNT NBR 16605:2017 ⁽¹⁷⁾

2.1.3 Aditivo Superplastificante

Para padronizar o abatimento dos concretos, foi utilizado aditivo superplastificante em diferentes proporções. Conforme informações do fabricante, o aditivo utilizado tem base de éter policarboxílico.

2.1.4 Aditivo Cristalizante

O aditivo cristalizante utilizado foi escolhido com base em trabalhos anteriores⁽¹⁸⁾. A porcentagem usada foi a mesma deste estudo, 1%, também indicada pelo fabricante.

Em relação às características, o aditivo é sólido em pó, com pH 10-13, massa específica de 1,1g/cm e diâmetro médio de 18,29µm.

2.2 Métodos

Neste item estão explicados os métodos de moldagem, fissuração e ensaios realizados com os concretos.



2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Para o desenvolvimento do experimento, foram usados corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de 100x35mm para o ensaio de microscopia ótica e corpos de prova prismáticos de 75x100x150mm com barras de aço para os ensaios de potencial de corrosão por cloretos. Para cada traço e cada ensaio, foram moldados 3 corpos de prova.

Também, no momento da moldagem, foram registradas informações referentes aos concretos, que estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Informações das moldagens

Traço	Abatimento (mm)	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	% de aditivo superplastificante
Referência	145	17	62	0,067
Aditivo Cristalizante	150	18	70	0,094

A cura e abertura de fissuras foi realizada conforme descrito em Costa (2024)⁽¹²⁾. Posteriormente, os concretos foram submergidos em água para a cicatrização.

Os vergalhões empregados nos corpos de prova prismáticos são fabricados em aço CA-60, com diâmetro nominal de 5 mm. A idade definida para as primeiras medições eletroquímicas foi de 89 dias após a abertura das fissuras. Depois disso, a aceleração do processo de corrosão induzido por íons cloreto foi realizada por meio de ciclos alternados de molhagem e secagem, conforme descrito em estudos anteriores ⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. Nesse estudo foram analisadas as medidas eletroquímicas após 5 ciclos.

2.2.2 Ensaios realizados

a) Microscopia Ótica

Para a obtenção das imagens de microscopia ótica, foi usado um microscópio Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x, do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este ensaio foi realizado no dia de abertura de fissuras e 56 dias depois, a fim de analisar o quanto as fissuras fecham superficialmente nesse período de cicatrização.

As imagens obtidas pelo microscópio foram quantificadas com o auxílio do software *ImageJ*, de forma a se obter a área da fissura em ambas as idades ensaiadas. A partir da relação entre a área inicial e a área final, foi obtida a taxa de cicatrização superficial de cada um dos corpos de prova.

b) Ensaio de potencial de corrosão

A técnica de potencial de circuito aberto (PCA) é amplamente utilizada, pois é um método não destrutivo e requer equipamentos simples ⁽²¹⁾. A técnica consiste em conectar a barra de aço do corpo de prova, que atua como eletrodo de trabalho, ao polo positivo, enquanto o polo negativo é conectado a um eletrodo de referência. Para garantir a conexão entre o eletrodo de referência e a barra embutida, utiliza-se uma esponja saturada com uma solução de alta condutividade, posicionada sobre a superfície do concreto. Para isso, utilizou-se o potenciostato Autolab junto ao software Nova 2.1.



3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Microscopia Ótica

Na tabela 4 são apresentados os resultados da taxa de cicatrização superficial aos 56 dias.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de microscopia ótica

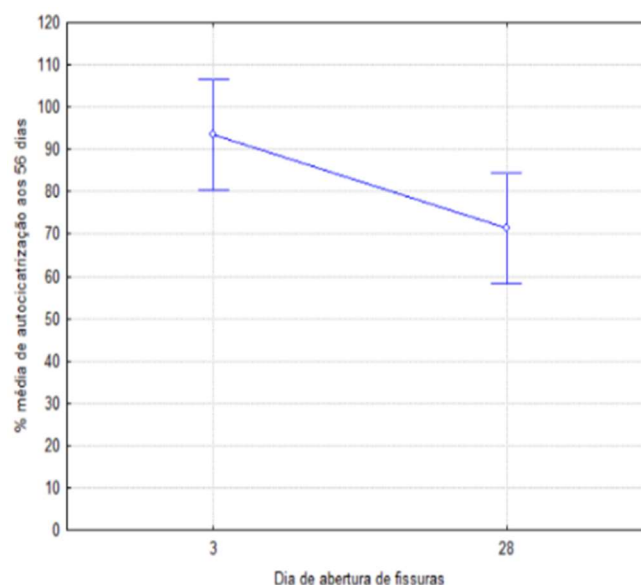
Concreto	Idade de abertura de fissuras (dias)	% de cicatrização aos 56 dias	Média	Coefficiente de variação	Desvio Padrão
Referência	3	98,67	97,67	1,08	1,06
Referência		98,13			
Referência		96,21			
Referência	28	73,78	74,17	10,64	7,89
Referência		84,02			
Referência		64,71			
Cristalizante	3	80,83	89,32	8,16	7,29
Cristalizante		98,63			
Cristalizante		88,49			
Cristalizante	28	96,72	68,64	28,95	19,87
Cristalizante		55,72			
Cristalizante		53,49			

Para ambos os concretos percebe-se uma queda significativa na capacidade autocicatrizante quando as fissuras são abertas em idades mais avançadas (28 dias). Além disso, os valores são bastante próximos nos dois concretos. O concreto referência possui resultados de % de cicatrização aos 56 dias pouco mais altos que os do concreto com aditivo. Isso pode estar relacionado com a capacidade de lixiviação dos concretos. Estes resultados serão explicados mais detalhadamente após a análise estatística.

A partir da análise de variância realizada (ANOVA, Tukey, $p < 0,05$) apenas foi considerado significativo o efeito isolado da idade de abertura de fissuras nos concretos. Possivelmente, o tipo de concreto não foi considerado significativo porque o aditivo cristalizante tem função relacionada com a estanqueidade do concreto e não com o fechamento externo, de forma a não mudar muito as propriedades do concreto referência vistas no ensaio de microscopia ótica. Na figura 1, se observa o gráfico do efeito isolado da idade de abertura de fissuras.



Figura 1 – Efeito isolado da idade de abertura de fissuras observado no ensaio de microscopia ótica



Percebe-se que as duas idades estudadas encontram-se em igualdade estatística. Isso pode ser explicado por conta do fechamento observado pelo ensaio de microscopia ótica. Sisomphon et al. ⁽²²⁾ observaram que a concentração de CaCO_3 na parte superficial da fissura é maior que no interior da mesma. Isso acontece por conta das condições de dissolução do CO_2 . Próximo à abertura superficial, se tem a supersaturação do CO_2 , condição ideal para precipitação do CaCO_3 . Por isso, a precipitação tende a ocorrer próximo à abertura da fissura. Sendo assim, superficialmente observa-se o fechamento advindo da lixiviação do Ca(OH)_2 e consequente formação de CaCO_3 . Apesar de que as reações do cimento tendem a estabilizar após os 28 dias, por se tratar de um cimento ARI, com as fissuras abertas aos 3 dias muitas reações já ocorreram, de forma a fornecer Ca(OH)_2 suficiente para a lixiviação.

3.2 Ensaio de potencial de corrosão

Na tabela a seguir, estão apresentados os resultados obtidos neste ensaio, para cada concreto e cada idade de abertura de fissuras.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão

Concreto	Idade de abertura de fissuras (dias)	PCA para Eletrodo de Cu/CuSO4 (mV)	Média (mV)	Coefficiente de variação	Desvio Padrão
Referência	3	-405,97	-415,132	0,060191	0,024987
		-418,73			
		-388,06			
		-384,72			
		-448,08			
		-445,23			
Cristalizante	3	-459,03	-487,082	0,037441	0,018237
		-493,75			



1º SIBRACIC

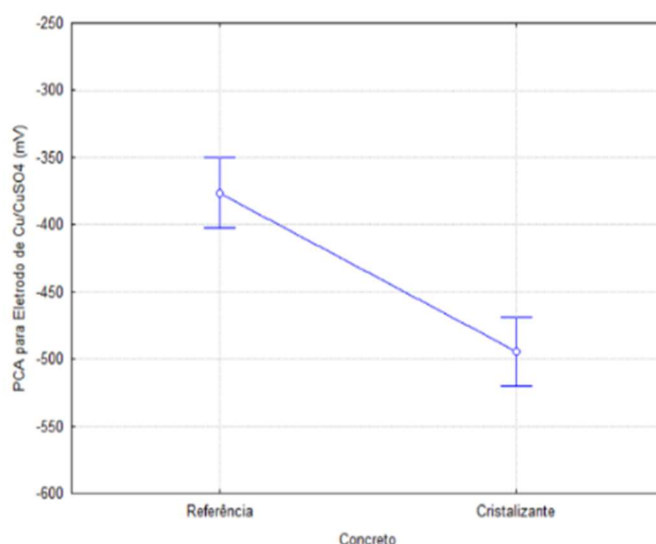
Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

		-464,97			
		-502,49			
		-505,78			
		-496,47			
Referência	28	-348,29	-338,085	0,140619	0,047541
		-251,28			
		-374,16			
		-308,50			
		-398,51			
		-347,77			
Cristalizante	28	-536,97	-502,062	0,109804	0,055128
		-566,11			
		-539,82			
		-470,91			
		-399,55			
		-499,01			

Analizando os resultados, nota-se que quando as fissuras são abertas aos 28 dias a capacidade autocicatrizante de ambos os concretos diminui, e consequentemente estão mais suscetíveis a corrosão.

A partir da análise de variância realizada (ANOVA, Tukey, $p < 0,05$) apenas foi considerado significativo o efeito isolado do tipo de concreto e a interação do concreto utilizado com a idade de abertura de fissuras. Na figura 2, está apresentado o gráfico do efeito isolado do tipo de concreto avaliado pelo ensaio de potencial de corrosão.

Figura 2 – Efeito isolado do tipo de concreto observado no ensaio de potencial de corrosão



Neste gráfico percebe-se que o concreto referência tem menos tendência à corrosão do que o concreto com aditivo cristalizante. No entanto, pela classificação da ASTM C876⁽²³⁾, ambos são classificados com probabilidade de corrosão >90% e estado da corrosão ativo.

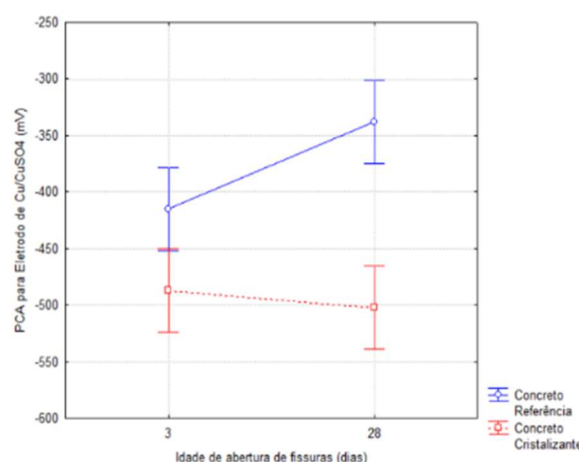


Não se esperava que o concreto com aditivo cristalizante tivesse uma maior tendência à corrosão, pois a maioria das pesquisas realizadas sobre o assunto ⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁴⁾ mostra que o uso de aditivo cristalizante melhora as características de durabilidade do concreto.

Outro ponto que pode explicar essa diferença é a grande variabilidade que o ensaio apresenta, como as medidas dos dois concretos não foram feitas nas mesmas datas.

Na figura 3, observa-se a interação entre o tipo de concreto e a idade de abertura de fissuras, observado no ensaio de potencial de corrosão.

Figura 3 – Interação entre o tipo de concreto e a idade de abertura de fissuras no ensaio de potencial de corrosão



Segundo estudos de Alemu et al. (2025)⁽²⁵⁾, fissuras menores que 0,15 mm apresentaram melhor resistência à penetração íons cloreto, salientando assim a importância do controle da largura da fissura para atingir uma autocicatrização eficaz. Zhang et al. (2021)⁽²⁶⁾, submetaram vigas fissuradas à imersão e secagem cíclicas em uma solução de NaCl a 3%, determinando que fissuras entre 0,06 e 0,1mm não tiveram influência na penetração de íons cloreto.

Na interação nota-se que em fissuras abertas aos 3 dias, ambos concretos estão em igualdade. No entanto, nas fissuras abertas aos 28 dias, o concreto com aditivo cristalizante apresenta maior potencial de corrosão. Porém, apenas o concreto referência com fissuras abertas aos 28 dias apresenta probabilidade de corrosão incerta e estado de corrosão incerto. Os demais cenários são classificados como probabilidade de corrosão >90% e estado da corrosão ativo, segundo a ASTM C876⁽²³⁾.

Para o concreto referência, era esperado um aumento no potencial de corrosão quando as fissuras são abertas em idades mais avançadas, visto que a cicatrização tende a ser menos eficiente neste caso. Já para o concreto com aditivo cristalizante, esperava-se uma diminuição do potencial de corrosão com o aumento da idade, já que o aditivo cristalizante age por mais tempo.

Novamente, é importante ressaltar que a grande variabilidade que o ensaio causa pode ser a responsável por valores tão distintos do esperado.



4. CONCLUSÕES

Ao relacionar os dois ensaios realizados, nota-se que o fechamento superficial, observado pela microscopia ótica, não apresentou influência quanto ao potencial de corrosão por cloretos. No ensaio de microscopia, se percebeu um fechamento alto para ambos os concretos (cera de 90% para concretos fissurados aos 3 dias e cerca de 70% para concretos fissurados aos 28 dias), o que indica um fechamento superficial.

No entanto, no ensaio de potencial de corrosão, se observou que, apesar do fechamento superficial, a probabilidade de corrosão ainda é de mais que 90%. Apesar de se acreditar que a variabilidade do ensaio pode ter afetado os resultados obtidos, não se pode afirmar com certeza que o fechamento externo pela cicatrização foi capaz de impedir a penetração de íons cloreto até a armadura.

Por fim, neste trabalho se observou que o aditivo cristalizante não foi capaz de melhorar as condições de cicatrização quanto ao fechamento externo e nem quanto à penetração de cloretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
2. DE BELIE, N; GRUYAERT, E.; AL-TABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.
3. VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. **Self-Healing in Cementitious Materials—A Review**. Materials, v. 6, n. 6, 2013.
4. MIGNON, A.; SNOECK, D.; DUBRUEL, P.; VAN VLIERBERGHE, S.; DE BELIE, N. **Crack mitigation in concrete: Superabsorbent polymers as key to success?** Materials, v. 10, n. 3, 2017.
5. SILVA, D. M. G. **Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.
6. ROIG-FLORES, M. et al. **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments**. Construction and Building Materials, v. 86, p. 1–11, jul. 2015.
7. REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. **Macro mechanical properties of self-healing concrete with crystalline admixture under different environments**. Ain Shams Engineering Journal, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2019.



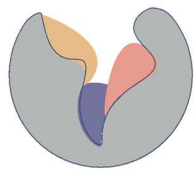
8. CAPPELLESSO, V. G.; SILVA, D. M. G.; ARNDT, J. A.; PETRY, N.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Self-healing approach on early age cracked concretes with smart admixture.** Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 1, p. 89–92, 2016.
9. GUPTA, S.; PANG, S. D.; KUA, H. W. **Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review.** Construction and Building Materials, v. 146, p. 419–428, 2017.
10. TZIVILOGLOU, E.; WIKTOR, V.; JONKERS, H.; SCHLANGEN, E. **Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks.** Construction and Building Materials, v. 122, p. 118–125, 2016.
11. WU, M.; JOHANNESSEN, B.; GEIKER, M. **A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material.** Construction and Building Materials, v. 28, 2012.
12. COSTA, J. R. **Análise comparativa de diferentes agentes de autocicatrização em concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2024.
13. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
14. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 17054:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da umidade. Rio de Janeiro, 2023.
15. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.
16. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
17. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
18. ARNDT, J. A. **Avaliação de aditivos cristalizantes na autocicatrização de concretos de cimento Portland,** M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Federal Univ. of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
19. BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.** São Paulo, 236p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.
20. VIEIRA, F. M. P. **Contribuição do estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Porto Alegre, 243p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, 2003.
21. RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos.** In: Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

22. SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E.A.B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**. v. 34. pp. 566-574. 2012.
23. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C876 - 15** Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete Annual Book of ASTM Standards Philadelphia, 2015.
24. ZHANG, C. LU, R. LI, Y. GUAN, X. Effect of crystalline admixtures on mechanical, self-healing and transport properties of engineered cementitious composite. *Cement And Concrete Composites*, v. 124, p. 104256, nov. 2021.
25. ALEMU, A. S.; LIYEW, G.; LEE, B.Y.; KIM, H. **Effect of self-healing of cracks in chloride ion diffusion and corrosion of engineered cementitious composites**. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 35, 2025.
26. JUN ZHANG, J.; PEI, T.; CHANG, J.; XIE, X.; ZHAO, Y. **Experimental study on chloride penetration in cracked engineered cementitious composite under soak-dry cycles**. *Construction and Building Materials*, Volume 307, 2021.



PRELIMINARY STUDIES ON THE SELF-HEALING CAPACITY OF CONCRETE BEAMS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.18>

Autor: María Elena Ahumada Ponce

Email: mariae.ahumadap@pucp.edu.pe

Autor: Gabrieli Lazzari Vieira

Email: gabilazzarivieira@gmail.com

Autor: Roberto Vengut Tro

Email: roventr@etsid.upv.es

Autor: Pedro Serna Ros

Email: pserna@upv.es

RESUMO

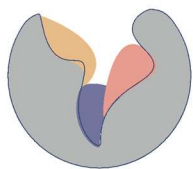
Estudos sobre a capacidade de autocicatrização do concreto têm ganhado visibilidade devido à sua relevância para a durabilidade das estruturas de concreto. A corrosão é um dos principais agentes que causam danos e comprometem a vida útil dessas estruturas. O principal objetivo deste trabalho é analisar a corrosão por cloretos em vigas de concreto armado fabricadas com dois tipos de concreto de 25MPa: concreto de referência e concreto com aditivos cristalizantes. As vigas foram pré-fissuradas em três larguras de fissuras diferentes por meio de um teste de flexão em três pontos. As amostras foram expostas a uma solução que simula um ambiente marinho em duas condições: respingos e imersão. Durante o período de exposição foram realizadas inspeções visuais, medições de potencial de corrosão, resistência elétrica e intensidade de corrosão. Espera-se que as propriedades do concreto não sejam alteradas, mas que a autocicatrização das fissuras ajude a reduzir a penetração de íons cloreto no concreto e aumente a resistência à corrosão.

Palavras-chaves: cloretos, fissuras, durabilidade, autocicatrização.

ABSTRACT

Studies on the self-healing capacity of concrete have gained visibility due to their relevance to the durability of concrete structures. Corrosion is one of the main agents that cause damage and compromise the lifespan of these structures. The main objective of this work is to analyze chloride-induced corrosion in reinforced concrete beams made with two types of 25MPa concrete: reference concrete and concrete with crystallizing additives. The beams were pre-cracked until three different crack widths through a three-point bending test. The samples were exposed to a solution simulating a marine environment under two conditions: splash and immersion. During the exposure period, visual inspections, measurements of corrosion potential, electrical resistance, and corrosion intensity were carried out. It is expected that the properties of concrete will not be altered, but that the self-healing of the cracks will help reduce chloride ion penetration in concrete and increase resistance to corrosion.

Palavras-chaves: chlorides, cracks, durability, self-healing.



1. INTRODUCTION

Self-healing concrete is an alternative to avoid much of the manual repair work on reinforced concrete structures. In this way, cracks would be repaired as they appear, improving durability issues related to the ingress of aggressive agents through them ⁽¹⁾. In the autonomous approach, various technologies can be employed, including crystallizing additives ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾.

Assessing the deterioration of concrete structures in environments susceptible to chloride ion infiltration is very important, as this can lead to reinforcement corrosion and, eventually, compromise the integrity of the concrete structure itself. There are common limits specified in the international standards related to rebars cover or cracks with ⁽⁵⁾, but most of the studies do not consider precracked elements to estimate service life. Some studies show that the presence of cracks strongly impacts chloride migration coefficients but the cracks on the surface influence do not necessarily depend on their crack width. Thus, the service life assessment of concrete elements must be adapted to consider the significant influence of cracks to provide more accurate and relevant results ⁽⁶⁾.

In this study, experimental work was presented to increase the database to analyze the influence of crack with, cover and use of self-healing agents and its role in corrosion protection.

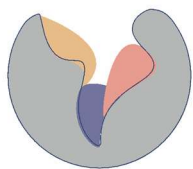
2. OBJECTIVES

The aim of this investigation is to conduct experimental studies that contribute to the development of models for estimating corrosion risks, durability, and the service life of structures. The influence of cracking will be considered as a variable. Both conventional and self-healing concrete will be studied to verify their durability properties over time. The specific objectives are as follows:

- Update the state of knowledge regarding the influence of cracking modes on durability and structural design. Analyze how current standards address this aspect.
- Develop an experimental program to study different types of concrete (conventional and self-healing) and structural elements with different cracking modes.
- Induce corrosion through chloride attack to evaluate their behavior and create a database for verifying associated parameters.
- Analyze the results by comparing them with previous studies and standards. Advance in parameterizing crack types and their influence on corrosion and developing models to estimate durability and corrosion risks.

3. EXPERIMENTAL PROGRAM AND METHODOLOGY

An experimental program was defined that included different variables of study (Table 1): rebar covers, crack width and exposition conditions. The specimens were 24 beams of 1800 mm of length with 150mmx200mm of section reinforced with two bars ($\phi=12$ mm). The analyzed rebars covers were 10 mm and 20 mm. A 25MPa concrete, one of the most conventional concretes, was chosen. Two types of concrete: conventional concrete (CC) and



self-healing concrete with crystalline admixtures (SHC). The elements were crack induced by a three-point bending test (3PBT) to get beams with 0.2 mm and 0.4 mm of principal crack width and a non-cracked beam was considered as a control specimen. A sufficiently long length helped to avoid shear cracks. The study was limited to 400 mm of the central section to get a more precise study, so the rest of the steel was painted with epoxy protection.

Two environmental conditions were proposed as the most critical cases of corrosion: immersion and splash. Beams would be sensorized to continuously measure, for more than one year, the corrosion density and corrosion potential. Also, electrical resistance and characterization concrete tests were made. A complete tests program (table1) was prepared to compare the durability properties and analyze whether crack healing contributes to reducing chloride ions penetration into the concrete and increase the corrosion resistance.

Table 1: Variables of study

Type of concrete	Cover (mm)	Crack Width (mm)	Environmental condition
Conventional / Self-healing	10 / 20	0 / 0,2 / 0,4	Immersion / Splash
2 options	2 options	3 options	2 options

2 types of concrete x 2 covers x 3 crack width x 2 environments = 24 combinations
1 beam / combination = 24 beams

3.1 Preparation and casting

The mix design for the CC was 300 kg/m³ of Portland cement CEM II BM-SL. 42.5 R, 174 kg/ m³ of water, 1.8 kg/ m³ of polycarboxylate-based superplasticizer (Viscocrete 5970), 860 kg/ m³ of sand 0/4 and calcareous coarse aggregates: 220 kg/m³ of 4/8, 602 kg/m³ of 8/16, 215 kg/m³ of 16/20. The SHC used the same dosage, but with 3 kg/ m³ of crystalline admixture and 2.9 kg/m³ of superplasticizer.

Each rebar includes in one of the extremes a water-resistant cable (cross sectional area 1.5 mm² and core strands 19/0.32 mm) to sensorized the behavior of the steel in the time. Figure 1a shows the rebars position, sensor cable and protected zone. In total, 48 bars were prepared to get the signals required to the potential and intensity of corrosion results. PVC Tubes (ϕ =20 mm) were introduced crossing the beam, oriented perpendicular to the rebars surface at 100mm of each beam extremes (Figure 1a), to be used in the crack induced procedure as will be explained in 3.2 section. Concrete spacers were used to control the cover of the beams, so the casting was done by the lateral side of the beams for practical execution. Six beams of the same mix design and cover per day were prepared (Figure 1b).

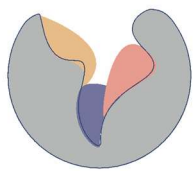
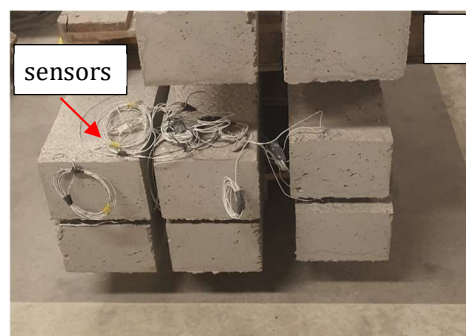
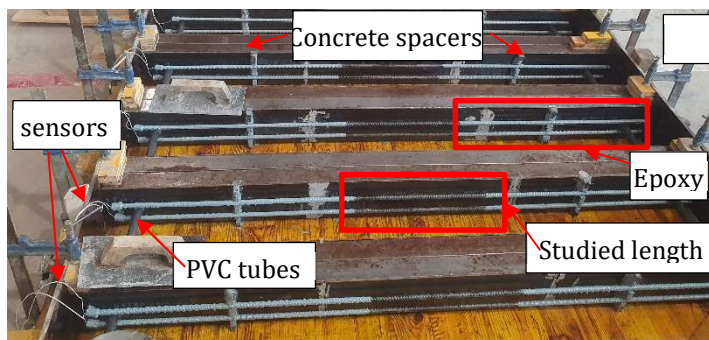


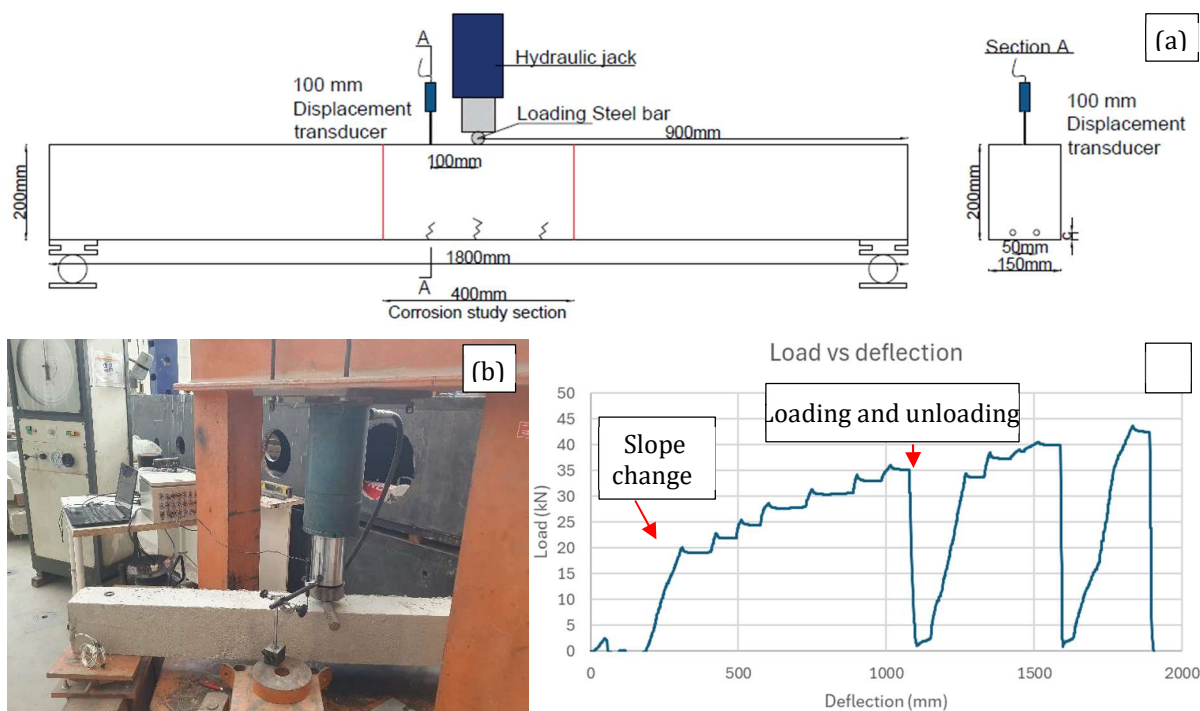
Figure 1:(a) Sensorization of the rebars. (b) Concrete beams with sensors.



3.2 Crack induced procedure

The procedure and setup were made based on reference ⁽⁷⁾ to induce the cracks and keep it during the exposition time planned. The specimens were pre-cracked by 3PBT in an assembled frame with three rollers and (Figure 2a, 2b). The load vs deflection curve was registered and the change in the slope was also the indicator of crack formation.

Figure 2: (a) 3PBT setup. (b) 3PBT procedure. (c) Example of load vs deflection graph of one of the beams



Sometimes a reloading procedure was required to achieve the desired crack width. The beams were unloaded after the target crack was reached (Figure 2c). The crack thickness was verified with a crack gauge (Figure 3).

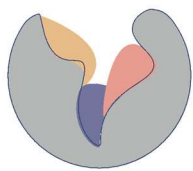
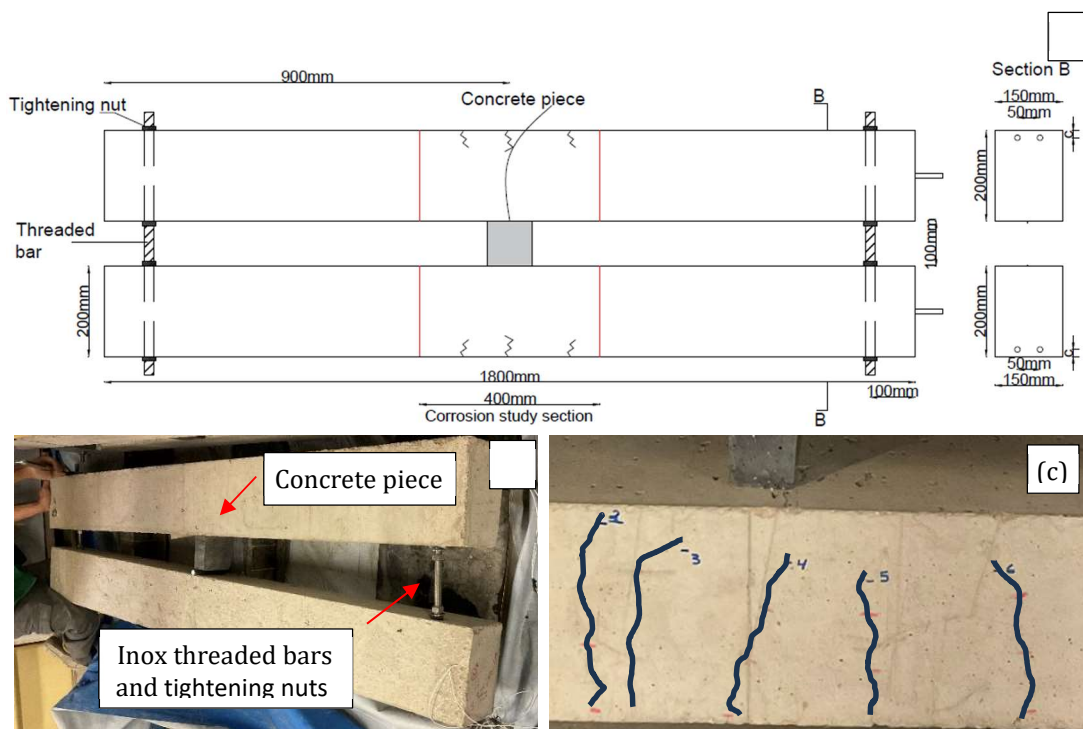


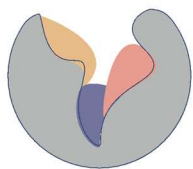
Figure 3: Crack width verification



To maintain the crack width during the exposition time a setup ⁽⁷⁾ was used (Figure 4a). Two beams that needed a similar load to get the target crack width were coupled and placed with their respective compressed side face to face. Both were separated by a concrete spacing piece and connected by two inox threaded bars ($\phi=16$ mm) at the extremes of the beams passing inside the PVC tubes as commented in section 3.1. Using tightening nuts the two inox threaded bars were reloaded until beams recovered the target crack with (Figure 4a). It was expected to deviate slightly from the crack width planned. The number of cracks and the distances between them were registered with a crack gauge and a wireless optical microscope with a magnification of 50-1000X (Figure 4c) in the length of study (400 mm).

Figure 4: (a) Setup for sustained loading. (b) Beams joined. (c) Crack mapping in the central zone (400 mm).





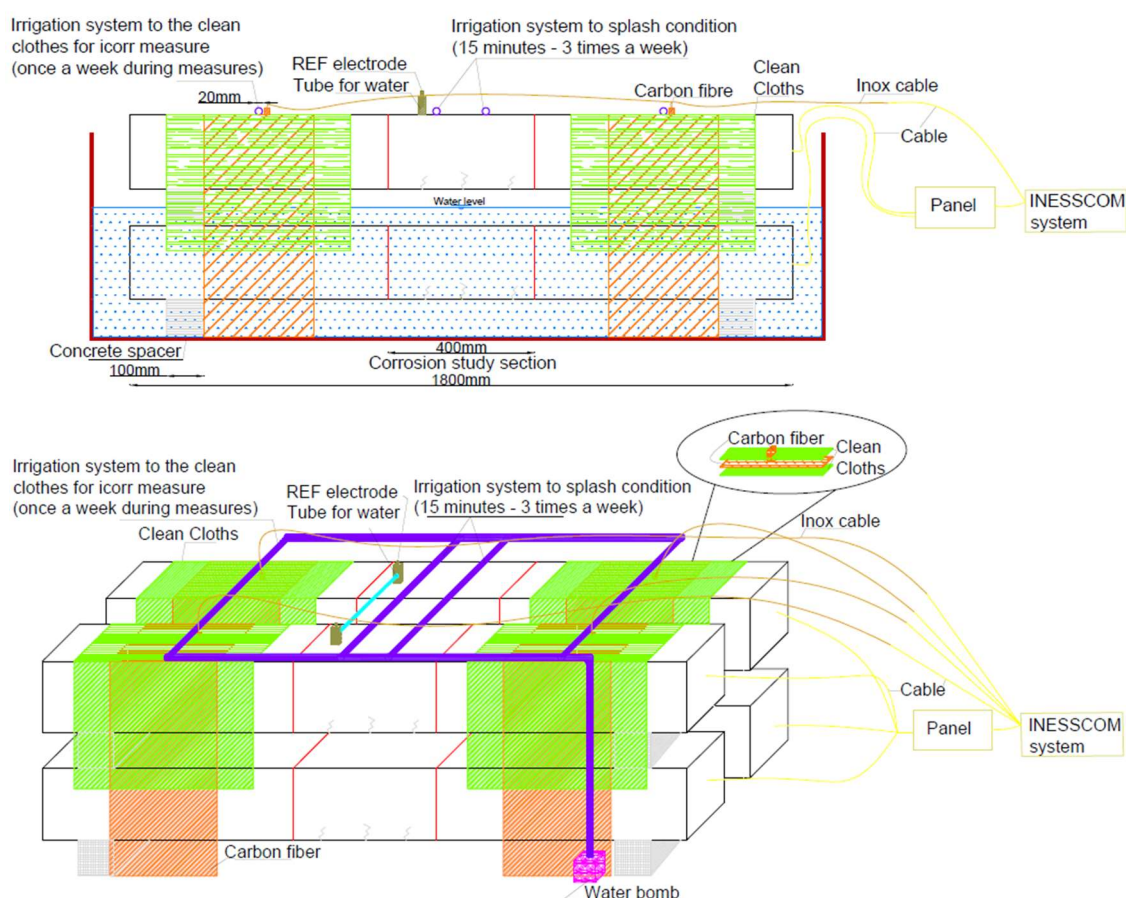
3.3 Chloride exposition

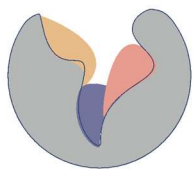
All the specimens were translated into two different pools, one for the CC beams and the other for SHC beams, to avoid the CC beams contamination with the crystalline additive. The beams for the immersion conditions were ubicated at the base of the pool and the beams for splash conditions above the previous ones with intermediate spacing pieces. The pools were filled until the elements immersed in water were fully covered with a solution containing 35 g/L of NaCl. The irrigation system (Figure 4) was constructed using perforated pipes connected to a pump submerged in the pool, allowing irrigation with the same solution. Four pipes were placed over the row of beams: two to ensure the splash condition in the central evaluation area and two at the ends to keep the reference electrodes used in corrosion intensity measurements moist that will be explained in section 3.4. The splashing was scheduled to occur three times a week for 15 minutes, creating a wet-dry cycle controlled by a digital timer.

3.4 Evaluation tests and planned data acquisition

The properties of the concrete were characterized by 150mmx300mm specimens for compressive strength, water permeability and chloride penetration based on current regulations (8) (9) (10) (11).

Figure 5: Setup configuration





Intensity and potential corrosion were measured once a week per beam using the INESSCOM (Integrated Network of Sensors for Smart Corrosion Monitoring) system ^{(12), (13)}. The complete setup is detailed and illustrated in Figure 5 and Figure 6. The corrosion density (I_{corr} , $\mu A/cm^2$) was determined using the reinforcement as the Working Electrode (WE) and carbon fiber mesh as the Counter Electrode (CE). The CE was placed on the two next sides of the study section (uncracked zones) to avoid interferences with cracked areas. To ensure electrical contact and ionic flow, the CE was placed between two cleaning clothes that were periodically moistened with the programmed irrigation from the pipes placed above them. Two reference electrodes (RE) were placed in each pool submerged and one in the pipeline in contact with the non-submerged beams. All the wiring corresponding to the WE, RE, and CE was centralized in a connection panel to perform the measurements in an organized manner. The system used consists of four PCB devices and one Mini PC that simultaneously measure up to eight WE (sensors). The measurement protocol first establishes the determination of E_{corr} and then a train of potentiostatic pulses is applied to determine I_{corr} by means a 2-electrode cell; that is, only the CE is needed to polarize the WE. This 2-electrode configuration is effective when the CE area is significantly larger than that of the WE ^{(12), (13)}. The set of data obtained from the measurements with the PCBs is stored on the miniPC, periodically downloaded, and automatically processed using Matlab, allowing continuous monitoring of the corrosion parameters studied.

Figure 6: (a) Beams in the pools with chloride exposure. (b) INESSCOM system



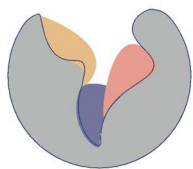
Electrical resistance

The electrical resistance $R(\Omega)$ is determined once a week by using a portable commercial AC conductivity meter (2000 Hz) applying an amplitude of 10 mV connected to the two reinforcements (WE) corresponding to the same beam.

4. EXPECTED RESULTS

These tests will be conducted over the course of a year, allowing for the evaluation of material behavior over time. With the initial results, it was possible to observe that the corrosion process of concrete reinforcement has already begun.

Measurement of electrical resistance in reinforced concrete, understood as a relative value, can be a useful tool for evaluating physicochemical changes in structural elements. Variations in this parameter can indicate changes in water content, presence of chloride ions or changes on self-healing processes among other factors that affect the electrical resistance of the



medium and, consequently, the conditions of the reinforcement. Monitoring $R(\Omega)$ over time allows for the detection of trends and can aid in the assessment by analyzing the results with other parameters (I_{corr} , E_{corr}). The Corrosion Potential test of concrete reinforcement reveals its tendency to undergo corrosion. Negative potential indicates a higher likelihood of corrosion in the reinforcements. The I_{corr} provides a direct measure of the corrosion rate. Higher values indicate a faster corrosion rate. A current intensity higher than $0.1 \mu A/cm^2$ generally indicates that corrosion is ongoing.

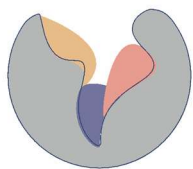
The specimens were exposed to the environmental conditions of study for around 3 weeks. For the first results of the conventional concrete, it seems that the onset corrosion process started because the I_{corr} is higher than $0.1 \mu A/cm^2$ in **most of** the cases of immersion exposure. Most of the results for the specimens with the splash exposure are less than $0.1 \mu A/cm^2$ (negligible corrosion).

5. CONCLUSIONS

- Cracks in concrete beams influence chloride migration, but additional tests are required to verify whether there is a linear relationship with the corrosion rate.
- Preliminary results show that conventional concrete samples under immersion conditions-initiated corrosion processes, while those exposed to splash conditions exhibited lower corrosion rates.
- The proposed experimental campaign allows for evaluating whether the use of crystallizing additives could improve concrete durability through crack healing.

REFERENCES

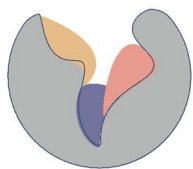
1. ROIG-FLORES, M.; FORMAGINI, S.; SERNA, P. Self-healing concrete-What Is it Good For? *Materiales de Construcción*, v. 71, n. 341, p. e237, 9 mar. 2021.
2. ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1–11, jul. 2015.
3. ARNDT, J. A. Self-healing evaluation of Portland cement concretes with crystalline admixtures. 2019. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
4. REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. Macro mechanical properties of self-healing concrete with crystalline admixture under different environments. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2019.
5. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318) Detroit, 2019.
6. DABRAL, K.; CAMACHO, E.; SERNA, P.; ALONSO, M. C. Chloride transport characterisation in self-healing concretes. RILEM Week 2023, Vancouver, BC, Canada, 2023.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

7. BERROCAL, C. G., et al. Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: influence of crack width, fibre type and loading conditions. *Corrosion Science*, vol. 98, p. 128-139, 2015.
8. UNE. *UNE-EN 12390-3*: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Madrid: Spanish Association for Standardization, 2020.
9. UNE. *UNE-EN ISO 12390*: Testing hardened concrete. Madrid: Spanish Association for Standardization, 2022.
10. UNE. *UNE-EN 12390-11*: Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. Madrid: Spanish Association for Standardization, 2019.
11. UNE. *UNE-EN 12390-18*: Testing hardened concrete – Part 18: Determination of the chloride migration coefficient. Madrid: Spanish Association for Standardization, 2021.
12. RAMÓN, J. E. et al. Real-time corrosion monitoring of an ultra-high performance fibre-reinforced concrete offshore raft by using an autonomous sensor system. *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 29, no 11, p. e3102, 2022.
13. Ramón, J.E., Martínez, I., Gandía-Romero, J.M. *et al.* Improved Tafel-Based Potentiostatic Approach for Corrosion Rate Monitoring of Reinforcing Steel. *J Nondestruct Eval* **41**, 70 (2022).



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

CONCRETO AUTOCICATRIZANTE COM ADITIVO CRISTALIZANTE SOB ATAQUE DE SULFATO Self-healing concrete with crystalline admixture under sulfate attack

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.19>

Vanessa Giaretton Cappellesso

Email: vgcappellesso@gmail.com

Elke Gruyaert

Email: elke.gruyaert@kuleuven.be

Kim Van Tittelboom

Email: kim.vantittelboom@ugent.be

Nele De Belie

Email: nele.debelie@ugent.be

RESUMO

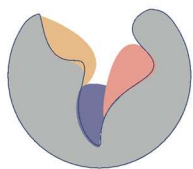
O ataque por sulfato deteriora o concreto, causando fissuras, perda de coesão, redução da resistência e de módulo de elasticidade. O concreto autocicatrizante com aditivos cristalizantes (CA) mostra-se promissor para contribuir com a mitigação desses efeitos, especialmente em ambientes ricos em sulfato. Este estudo avalia o desempenho do CA em concreto com fissuras de 100 µm e 300 µm exposto ao sulfato de sódio imediatamente após abertura das fissuras. Em 18 meses, o CA demonstrou ser um agente de cura eficiente, superando o concreto de referência. Análises microestruturais por lâminas delgadas e inspeções visuais confirmaram proteção superior, com danos mínimos, sem expansão significativa, sendo promissor para ambientes com sulfato.

Palavras-chaves: Concreto autocicatrizante. Aditivo cristalizante. Ataque de sulfato. Durabilidade do concreto.

ABSTRACT

Sulfate attack deteriorates concrete, causing cracks, cohesion loss, reduced strength and modulus of elasticity. Self-healing concrete with crystalline admixtures (CA) has shown promise in helping to mitigate these effects, especially in sulfate-rich environments. This study examines CA performance in concrete with 100 µm and 300 µm cracks immediately exposed to sodium sulfate. Over 18 months, CA proved a robust healing agent, surpassing reference concrete. Microstructural analyses using thin sections and visual inspections confirmed superior protection, with minimal damage and no significant expansion, indicating promising performance in sulfate-rich environments.

Palavras-chaves: Self-healing concrete. Crystalline admixture. Sulphate attack. Concrete durability.



1. INTRODUCTION

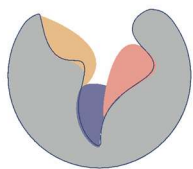
Sulphate attack is a significant durability issue for concrete structures exposed to sulphate-rich environments, such as rivers, seawater, and groundwater. It occurs when sulphate ions react with concrete components, forming expansive products like gypsum and ettringite, which lead to cracking, spalling, and a reduction in mechanical properties⁽¹⁾. Sulphate attack can be internal, caused by detrimental sources within the concrete, or external, resulting from environmental sulphates penetrating the structure. External sulphate attack, the focus of this study, is further classified into chemical and physical attack depending on the exposure conditions^(2,3). Chemical attack, often occurring under continuous immersion, involves chemical reactions with hydrated cement paste, causing expansion and material disintegration⁽⁴⁾. Factors such as sulphate concentration, permeability, binder type, and environmental conditions influence the rate and severity of this degradation^(1,3). Sodium sulphate (Na_2SO_4), specifically, is known to aggressively attack tricalcium aluminate and calcium hydroxide, causing internal stresses and crack propagation^(5,6). Chemical attacks typically occur under total immersion, whereas physical attacks are more common when concrete surfaces are intermittently exposed to drying conditions⁽⁷⁾. Physical salt attack is characterized by continuous surface scaling and flaking due to salt crystallization in the pores near the drying surface⁽⁸⁾.

Self-healing concrete presents a promising solution to mitigate sulphate attack, but research in this area remains limited⁽⁹⁾. Previous studies have shown that healing agents, such as crystalline admixtures (CA) and bacteria-based solutions, can enhance resistance to sulfate attack by reducing permeability and facilitating crack closure⁽¹⁰⁻¹²⁾. However, results vary based on the healing mechanism and sulphate exposure conditions. For instance, crystalline admixtures can form expansive products that may exacerbate damage, while encapsulated healing agents have shown potential in improving sulphate resistance, albeit with limited evidence of crack healing^(11,12). This study aims to address these research gaps by evaluating the performance of a CA healing agent in mitigating sodium sulphate attack. Concrete samples with pre-defined crack widths (100 μm and 300 μm) were exposed for 18 months to a sodium sulphate solution.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

Portland cement (CEM I 52.5 N) from Holcim Group was used, containing 64.3% CaO, 18.3% SiO_2 , 5.2% Al_2O_3 , 4.0% Fe_2O_3 , 1.4% MgO, 3.5% SO_3 , 0.32% Na_2O , 0.43% K_2O , 0.06% Cl^- ; with a 2.3% loss on ignition (LOI), and 0.4% insoluble residue. The calculated silica-to-alumina ratio (Si/Al) of approximately 3.52 indicates a relatively low alumina content in the cement, which is favorable for sulphate resistance, as reduced levels of Al_2O_3 limit the formation of expansive ettringite during sulphate attack. The phases of the anhydrous Portland cement were estimated by Rietveld refinement and powder X-ray diffraction (XRD), they were determined as follows: Alite (59.8%), Belite (10.4%), cubic Aluminate (3.0%), orthorhombic Aluminate (2.1%), Ferrite (16.4%), Anhydrite (4.7%), Calcite (1.5%), and other minor phases (2.0%). The fine aggregate was sand with a particle size of 0–4 mm and a fineness modulus of 2.92, while



the coarse aggregate was rounded gravel with a size range of 2–8 mm. A pure limestone filler with 0.99 g of CaCO_3 per gram of filler was included. A liquid superplasticizer (MasterGlenium 27) with a density of 1.05 g/cm^3 , a pH of 7, and 20% solid content was used.

The crystalline admixture (CA), Penetron ADMIX (Italy), primarily consists of Portland cement and chemicals (65–80%), proprietary compounds CTS-15-1 (10–30%) and CTS-15-2 (5–10%), as well as small amounts of calcium magnesium hydroxide and calcium hydroxide. It appears as a grey, odorless powder with a density of 2.73 kg/dm^3 and a pH of 10–13 when mixed in a 10% water solution. The admixture was added during the dry mixing stage at a dosage of 0.8% of the cement weight.

2.2 Concrete mix properties, sample preparation and crack creation

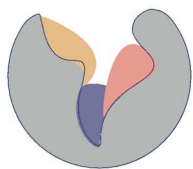
The concrete mixes are detailed in Table 1. Reference concrete (REF) has been compared with a mix containing the CA. Air content, fresh density, and flow behavior were assessed using EN 12350-7, EN 12350-6, and EN 12350-5 standards, respectively. Compressive strength was tested on three 150 mm cubes per EN 12390-3.

Table 1 – Concrete mix composition and properties in fresh and hardened state.

Materials [kg/m^3]	REF	CA
CEM I 52.5 N	340.0	339.7
Sand 0-4 mm	748.1	747.6
Gravel 2-8 mm	1038.3	1037.6
Limestone filler	58.4	58.4
Crystalline admixture	-	2.7
Water	170.0	169.9
Superplasticizer	2.2	2.2
Fresh Properties		
Density [kg/m^3]	2387.5	2350.0
Air content [%]	2.8	2.0
Flow [mm]	540	520
Hardened properties at 28 days		
Compressive strength	μ : 54.4	μ : 60.4
[MPa]	CV: 1.2%	CV: 2.7%

The mixing process started by adding dry materials to a 50 L planetary mixer with a rotating pan (Eirich, Germany) for one minute. Subsequently, water combined with a superplasticizer was introduced, and mixing continued for three additional minutes. The CA was incorporated at the start of the process alongside the dry materials. The concrete was poured into molds in two layers, each compacted by vibrating for 10 seconds on a vibration table. Filled molds were stored for 24 hours in an air-conditioned environment at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative humidity of at least 95%. After demolding, the specimens were transferred to a curing room until cracks were induced at 28 days.

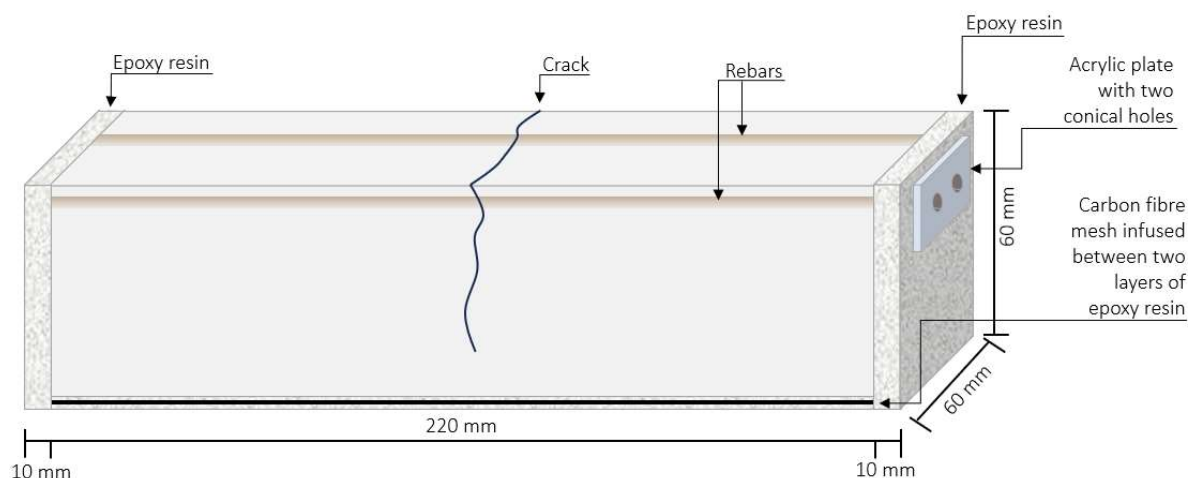
Two sample geometries were used: reinforced beams ($60 \times 60 \times 220 \text{ mm}^3$) for microscopic analysis by optical microscopy, expansion evaluation, and microstructural studies by thin section analysis, and 50 mm cubes for mass change and visual inspection. The reinforced beams incorporated two smooth, copper-coated steel wires (2 mm diameter), positioned 10



mm from the sides and bottom of the molds. Cracks were induced at 28 days using a three-point bending test without notches, with crack widths controlled by a Linear Variable Differential Transformer (LVDT). A Walter-bai testing machine (15 kN capacity) applied the speed 0.0007 mm/s of loading plate displacement. Target crack widths were 100 μm and 300 μm , but final measured widths before unloading were 290 μm and 480 μm , respectively.

For the sulphate exposure test, cubes were left uncoated to allow full-surface exposure, while beams required a novel preparation method compared to the standard methods due to the presence of cracks. Cracked beams were coated and reinforced on the uncracked, troweled surface using a carbon fiber mesh (11.5 $\times$ 10.5 mm openings, 0.8 mm thick, tensile strength: 2700 MPa, modulus of elasticity: 220 GPa). This was followed by applying a structural two-component epoxy resin (Sikadur®-32 Normal) in two layers to protect the edges and prevent sulphate attack. Additional measures included extending epoxy layers 10 mm onto uncoated surfaces and attaching acrylic plates with holes to the beam ends for precise length measurements with a caliper. To further limit sulphate exposure, a final chemical-resistant epoxy resin layer (TRADECC® PC 5800 CARBO LPL) was applied over the structural epoxy. This procedure was also applied to uncracked beams. Sulfate attack was thus restricted to three faces: the cracked surface and the two long sides containing the crack edges. A schematic of the preparation is shown in Figure 1.

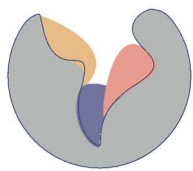
Figure 1 – Schematic representation of the sample preparation for sulphate attack.



Source: Cappellesso, V. G.⁽¹³⁾

2.3 Simulating a sulphate-rich environment

To evaluate the performance of the concrete a submerged sulphate-rich environment was created following ASTM C1012-4⁽¹⁴⁾. As this standard was originally developed for mortar specimens, adaptations were made to apply the methodology to concrete samples used in this study. The solution consisted of 50 g/L Na_2SO_4 in demineralized water, equivalent to 352 moles of Na_2SO_4 per cubic meter. The ratio of exposed concrete surface area (cm^2) to solution volume (dm^3) was maintained at 80. Containers holding the solution were stored in an air-conditioned room at 20°C and 60% relative humidity. The solution was refreshed every three weeks for the first eight months and every two months thereafter. Weekly pH monitoring



ensured it remained between 5.7 and 6.7, adjusted as necessary using H_2SO_4 , as recommended by RILEM TC 211-PAE. During exposure, samples were positioned with the crack facing upwards, while epoxy-coated surfaces were oriented downwards.

2.4 Experimental program

The study included both uncracked and cracked concrete samples, with crack widths of 100 μm and 300 μm . Samples containing CA were compared to REF samples under identical conditions. The samples were directly exposed to the sulphate-rich environment immediately after crack formation at 28 days. Uncracked samples were subjected to the same exposure conditions as the cracked samples. The study was conducted over 18 months in a sulphate-rich environment to assess the long-term performance of the healing agents.

For each series, four uncracked concrete beams were used, while six beams were cast per crack width for the cracked series. Additionally, five concrete cubes per series were used to evaluate mass changes and conduct visual inspections over time.

To ensure precise monitoring of sample expansion, acrylic plates with two holes were affixed to the lateral sides of the specimens, aligned with their top surface to maintain consistent measurement points. Length measurements were performed initially and at designated intervals during exposure, specifically at 1, 2, 3, 6, 8, 10, 12, 15, and 18 months. Mass changes were assessed on uncoated concrete cubes. Excess surface moisture was carefully removed using a pre-wetted cloth, and a precision scale (0.001 g accuracy) was used for measurements. Samples were periodically removed from the solution at intervals of 0.3, 1, 2, 3, 6, 8, 10, 12, 15, and 18 months for mass change and visual inspection tests. During removal, samples experienced brief dry periods, introducing a potential risk of physical attack. However, the time out of the solution was limited to a maximum of 24 hours per interval.

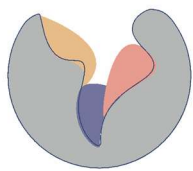
To study microstructural changes caused by sodium sulfate attack, thin sections of concrete samples were analyzed under fluorescent light after 18 months of submersion. Two samples from each series were examined. To preserve sample stability following exposure to harsh conditions, one sample from each series, previously used for expansion assessments, was impregnated with fluorescent epoxy resin before preparing thin sections. This process ensured structural integrity during analysis. Cross sections of these samples were then examined.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Expansion behaviour

Figure 2 (a) presents expansion measurements recorded over 18 months. Cracked samples displayed larger expansion than the respective uncracked samples, with little difference between the two crack widths. Note that REF1 and CA1 refer to the series with cracks of 100 μm , while REF3 and CA3 refer to the series with cracks of 300 μm .

Although ASTM C1157⁽¹⁵⁾ targets sulfate resistance in mortars, its expansion limits—0.10% at 6 months (moderate exposure) and 0.05% at 6 months/0.10% at 12 months (severe exposure)—are often applied to concrete. Monteiro and Kurtis⁽¹⁶⁾ highlighted the importance of long-term



field data from institutions such as the U.S. Bureau of Reclamation, which supports the use of the 0.10% expansion limit as a performance threshold for concrete under prolonged sulfate exposure^(17,18).

The CA series (CA1, CA3, CA) demonstrated excellent sulfate resistance, with expansions consistently below the 0.10% critical threshold, regardless of their crack width. CA1 and CA3 both showed limited expansion ($\leq 0.09\%$ at 18 months), suggesting that the dense matrix and potential self-healing mechanisms effectively mitigated sulfate ion ingress. In addition to transport limitation, the presence of crystalline admixtures may also have influenced the chemistry of sulfate interaction, potentially altering or delaying expansive reaction mechanisms. In contrast, the REF series exhibited significantly lower resistance, with cracked specimens (REF1 and REF3) surpassing the 0.10% expansion limit after 6 months and continuing to expand (up to 0.23% at 18 months for the REF1 series). Even the uncracked REF series reached the threshold by 12 months, indicating marginal compliance.

The superior performance of the CA concrete in preventing expansion under sodium sulfate exposure is primarily attributed to its ability to establish a waterproofing effect within the concrete matrix⁽¹⁹⁾. This effect reduces permeability, thereby limiting the penetration of aggressive substances into the bulk concrete. Furthermore, it has an impact on chemical attack by reducing the availability of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ through its reaction with silicates present in the CA healing agent^(20,21). By filling pores, capillaries, and cracks, the CA promotes the formation of an insoluble crystalline structure that minimizes chemical interactions between the cementitious matrix and sodium sulfate.

The thin section images presented in Figure 2 (b) were captured under consistent lighting conditions to enable direct visual comparison across the different series. A key observation from these images is the intensified fluorescent coloration near the surface exposed to the sodium sulfate solution. In the REF and CA series, damage manifested as increased porosity and microcrack formation; it was predominantly confined to the surface directly in contact with the sodium sulfate solution. For the REF series, the depth of degradation extended up to 2.0 mm from the exposed surface, whereas the CA series showed less pronounced damage, with degradation limited to a depth of 1.5 mm. The analysis also included cracked concrete samples to examine the extent of degradation along the crack walls and deeper within the specimens. Among the cracked samples, the CA series exhibited significantly less damage, with reduced crack propagation and lower porosity increases resulting from sodium sulfate attack observed along the crack length.

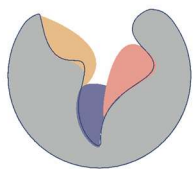
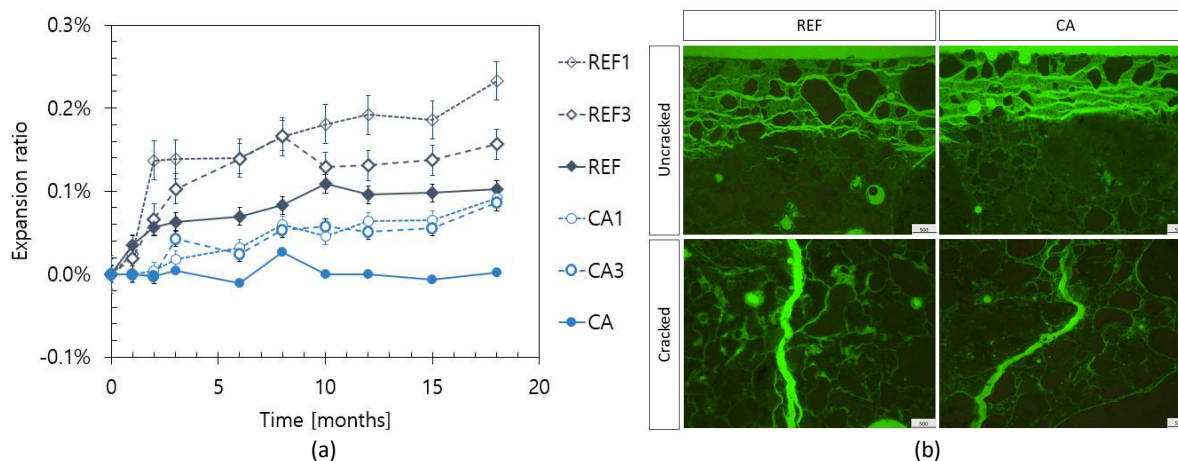


Figure 2 – a) Expansion in concrete beams, both uncracked and cracked. The error bars represent the standard error, n=4 for uncracked samples and n=6 for cracked samples; b) Thin sections analysed by fluorescent light of the concrete exposed to sulphate solution after 18 months in submerged condition, the scale bars represent 500 μm .



Source: Owned by the authors.

3.2 Mass and visual changes

In Figure 3 (a), the mass changes for both the REF and CA series (considering the uncracked samples) remained minimal, not exceeding 0.7% after 18 months of immersion in a sodium sulfate solution. The CA series exhibited a slight mass gain, reaching 0.63%, while the REF series showed negligible mass variation, staying near zero. Notably, all samples initially experienced a mass increase up to the third month, followed by a reduction in the REF series. This decline is attributed to surface scaling caused by sulfate attack, which became evident when the samples were wiped with a damp cloth prior to mass measurements. This process revealed a consistent degradation pattern, characterized by the loss of cement paste covering the surface aggregates.

Figure 3 (b) presents photographs taken over 18 months of exposure to the sodium sulfate solution, documenting the progression of damage in all series. Both REF and CA series showed similar degradation types, primarily surface scaling that exposed small aggregates due to paste loss. However, fewer cracks were observed in the corners of the CA samples. Damage appeared more severe in the REF series, with noticeable swelling at the cube corners. Among the series analyzed, the CA healing agent exhibited the least degradation, as confirmed by visual inspections, mass change data, and expansion measurements.

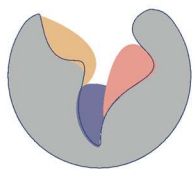
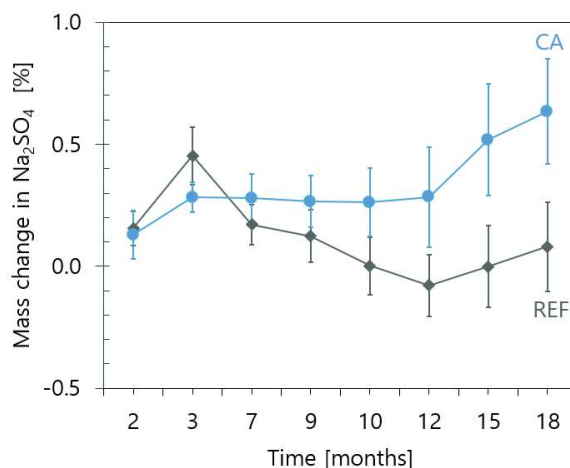
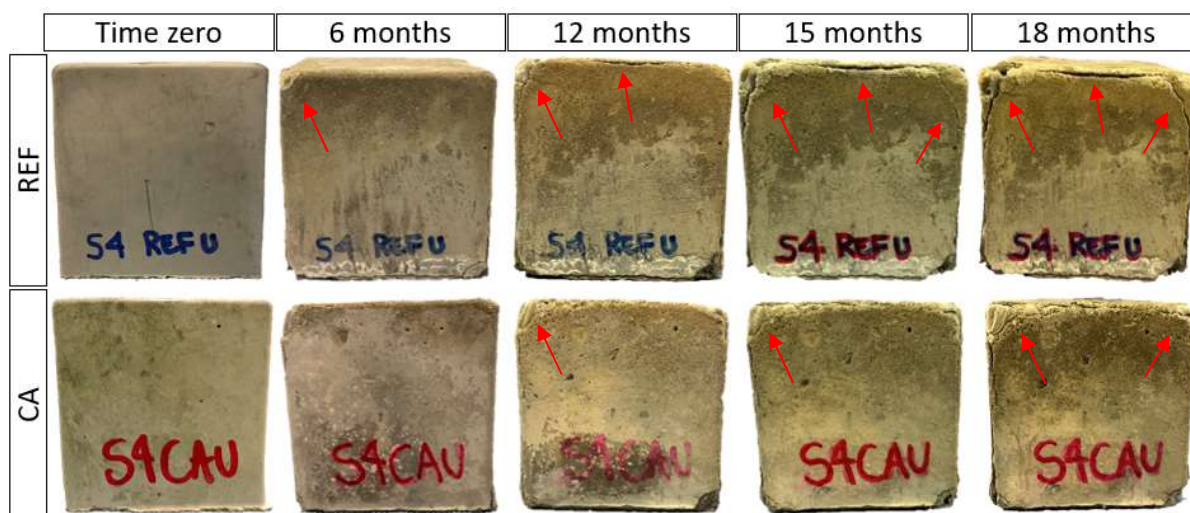


Figure 3 – a) Evolution of mass in uncracked concrete cubes under sulphate environment. The error bars represent the standard deviation, $n=5$; b) Visual examination of the concrete cubes after 18 months of submersion in a sodium sulphate solution, with red arrows indicating the damage caused.



(a)

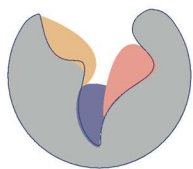


(b)

Source: Owned by the authors.

4. CONCLUSIONS

In conclusion, for uncracked samples the crystalline admixture (CA) healing agent effectively minimized the detrimental effects of sodium sulfate attack, outperforming the reference concrete (REF). The material's performance is reflected in the absence of mass, minimal expansion, reduced surface scaling, and limited microstructural damage, even after prolonged exposure. These results support the CA agent's ability to decrease pore connectivity and permeability, thereby enhancing resistance to sulfate-induced degradation. This highlights the CA healing agent as a promising solution for enhancing concrete durability in sulfate-rich environments.



ACKNOWLEDGEMENTS

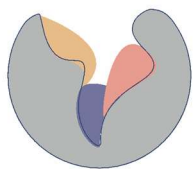


This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 860006.

The authors would like to thank Penetron Italia Srl. for providing the crystalline admixture agent.

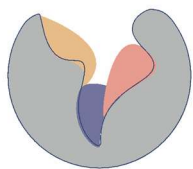
REFERÊNCIAS

1. SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I. **Sulfate Attack on Concrete**, 1st Edition, CRC Press, 2002.
2. NEHDI, M.L., SULEIMAN, A.R., SOLIMAN, A.M. **Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack**, Cement Concrete Research 64, 42–53, 2014.
3. ZHAO, G., LI, J., SHI, M., FAN, H., CUI, J. XIE, F. **Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack**, Construction Building Materials 248, 118683, 2020.
4. MEHTA, P., MONTEIRO, P. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**, 4th ed., McGraw-Hill Education, New York, 2014.
5. SANTHANAM, M., COHEN, M.D., OLEK, J. **Mechanism of sulfate attack: A fresh look**, Cement Concrete Research 32, 915–921, 2002.
6. QIAO, X., CHEN, J. **Correlation of propagation rate of corrosive crack in concrete under sulfate attack and growth rate of delayed ettringite**, Eng Fract Mech 209, 333–343, 2019.
7. HE, P., YU, J., WANG, R., DU, W., HAN, X., GU, S., LIU, Q. **Effect of ion chelator on pore structure, mechanical property and self-healing capability of seawater exposed mortar**, Construction Building Materials 246, 118480, 2020.
8. BASSUONI, M.T., RAHMAN, M.M. **Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure**, Cement Concrete Research 79, 395–408, 2016.
9. CAPPELLESSO, V.G., DI SUMMA, D., POURHAJI, P., PRABHU KANNIKACHALAM, N., DABRAL, K., FERRARA, L., CRUZ ALONSO, M., CAMACHO, E., GRUYAERT, E., DE BELIE, N. **A review of the efficiency of self-healing concrete technologies for durable and sustainable concrete under realistic conditions**, International Materials Reviews 68, 556–603, 2023.
10. HE, P., YU, J. WAN, Y., WANG, R., HAN, X., GU, S., LIU, Q. **Effect of ion chelator on microstructure and properties of cement-based materials under sulfate dry-wet cycle attack**, Construction Building Materials 257, 119527, 2020.
11. TRENTIN, P.O., DA LUZ, C.A., DE MEDEIROS-JUNIOR, R.A. **Effect of self-healing in closing cracks from the sulfate attack in Portland**, supersulfated and alkali-activated cement, Ambiente Construído 24, 2024.



12. DU, W., LIN, R., LIU, Q. **Investigation of isophorone diisocyanate microcapsules to improve self-healing properties and sulfate resistance of concrete**, Construction Building Materials 300, 124438, 2021.
13. CAPPELLESSO, V.G. **Self-healing concrete in aggressive environments**, Ghent University and KU Leuven University, 2024.
14. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1012 - 4**, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2010.
15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1157-08A**, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, 2010.
16. MONTEIRO, P.J.M., KURTIS, K.E. Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate **Attack**, Cement and Concrete Research, 33, 987-993, 2003.
17. KALOUSEK, G.L., PORTER, L.C., HARBOE, E.M. **Past, present, and potential developments of sulfate-resisting concretes**, ASTM J. Test. Eval. 4 (5) 347 – 354, 1976.
18. HOOTON, R.D. **Are sulfate resistance standards adequate?** in: J. Marchand, J. Skalny (Eds.), Materials Science of Concrete—Sulfate Attack. Mechanisms, American Ceramic Society, Westerville, OH, 1999
19. OLIVEIRA, A. DE S., TOLEDO FILHO, R.D., DE MORAES REGO FAIRBAIRN, E., DE OLIVEIRA, L.F.C., DA FONSECA MARTINS GOMES, O. **Microstructural characterization of self-healing products in cementitious systems containing crystalline admixture in the short- and long-term**, Cement Concrete Composites 126, 104369, 2022.
20. DE NARDI, C., BULLO, S., FERRARA, L., RONCHIN, L., VAVASORI, A. **Effectiveness of crystalline admixtures and lime/cement coated granules in engineered self-healing capacity of lime mortars**, Materials and Structures 50, 191, 2017.
21. CAPPELLESSO, V.G., DOS SANTOS PETRY, N. DAL MOLIN, D.C.C., MASUERO, A.B. **Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete**, Journal of Building Pathology and Rehabilitation 1, 1–12, 2016.

SUSTENTABILIDADE



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

ANÁLISE DA CAPACIDADE AUTOCICATRIZANTE DA CINZA VOLANTE EM CONCRETOS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.20>

Júlia da Rosa Costa

Email: juliadarcosta@hotmail.com

Gabrieli Lazzari Vieira

Email: gabilazzarivieira@gmail.com

Lais Zucchetti

Email: lais.zucchetti@ufrgs.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Email: dmolin@ufrgs.br

RESUMO

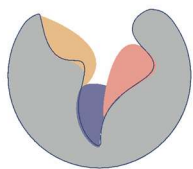
O estudo da autocicatrização em materiais cimentícios vem crescendo nos últimos anos. Dessa forma, diferentes agentes autocicatrizantes estão sendo testados e analisados. Com isso, este trabalho busca avaliar a autocicatrização em concretos com uso de cinza volante, quando comparado a um concreto convencional. Para isso, foi realizado o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, a fim de analisar o fechamento interno da fissura, por meio da autocicatrização. Diferente do esperado, o concreto com cinza volante teve uma cicatrização menos eficiente do que o concreto referência, nas condições estudadas. Isso provavelmente está relacionado com a granulometria das partículas, que faz com que elas demorem mais tempo para reagir.

Palavras-chaves: concreto, autocicatrização, cinza volante.

ABSTRACT

The study of self-healing in cementitious materials has been growing in recent years. Thus, different self-healing agents are being tested and analyzed. Therefore, this study aims to evaluate self-healing in concretes using fly ash, when compared to conventional concrete. For this purpose, an ultrasonic wave propagation test was performed in order to analyze the internal closure of the crack, through self-healing. Contrary to expectations, the concrete with fly ash had less efficient healing than the reference concrete, under the conditions studied. This is probably related to the particle size, which causes them to take longer to react.

Palavras-chaves: concrete, self-healing, fly ash.



1. INTRODUÇÃO

Os concretos usados em estruturas podem vir a fissurar por diversos fatores, o que ocorre tanto na passagem do estado fresco para o estado endurecido, como também ao longo da sua vida útil. Entre as principais causas de fissuração do concreto, oriundo das primeiras idades, ressalta-se, dentre outros, a dessecação superficial, a retração plástica, a movimentação das fôrmas, a cura inadequada e o carregamento precoce ⁽¹⁾.

Em resposta a essa problemática das fissuras nos concretos e do aumento de manifestações patológicas, pesquisadores começaram a estudar o fenômeno da autocicatrização nos materiais cimentícios. Os materiais com habilidade autocicatrizante, conhecidos também como self-healing, podem ter capacidade interna para reparar danos, chamados autógenos. Ou também, podem ter ajuda de algum estímulo externo, desenvolvendo reparação de maneira autônoma ⁽²⁾.

A autocicatrização autógena é produzida pela hidratação contínua do cimento. Ela se caracteriza como o fenômeno de selamento parcial ou total das fissuras em matrizes cimentícias. Quando são usados materiais pozolânicos, como o caso da cinza volante, a reação causada por eles, de posterior formação do C-S-H, também é capaz selar estas fissuras. Isso recupera, em parte, a durabilidade e o desempenho mecânico destes materiais ⁽³⁾.

A cinza volante proporciona uma cicatrização autógena no concreto, uma vez que ela acontece pelas reações pozolânicas causadas por este material ⁽⁴⁾. A hidratação secundária das cinzas volantes em estágios avançados pode modificar a microestrutura do concreto e contribuir positivamente para o comportamento de autocicatrização ⁽⁵⁾. Dessa forma, este trabalho busca analisar qual a diferença de capacidade autocicatrizante entre um concreto sem adições (concreto referência) e um concreto com cinza volante. Para isso, os concretos foram fissurados em duas idades diferentes: 3 e 28 dias, a fim de observar o efeito da idade na capacidade autocicatrizante do material pozolânico. Visando analisar o fechamento interno dos concretos, foi realizado o ensaio de velocidade propagação de ondas ultrassônicas no dia de abertura de fissuras e após 56 dias de cicatrização. Por fim, os resultados foram analisados e discutidos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

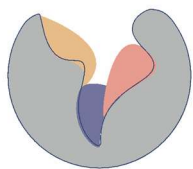
Nesta seção serão apresentados os materiais e a metodologia utilizados no estudo, a fim de explicar o processo experimental adotado.

2.1 Materiais

Inicialmente estão descritos e caracterizados os materiais utilizados no experimento. A caracterização completa dos materiais é apresentada no trabalho de Costa (2024) ⁽⁶⁾.

2.1.1 Agregados

Devido às dimensões dos corpos de prova, a brita 0 foi escolhida como agregado graúdo utilizado nos corpos de prova, com faixa granulométrica entre 4,75 e 12,5mm, conforme NBR 17054:2022 ⁽⁷⁾.



Foi selecionada uma areia quartzolítica média como agregado miúdo. A granulometria desse material foi estabelecida com base na NBR 17054:2022 ⁽⁷⁾ e ficou entre 0,15 e 4,75mm.

2.1.2 Cimento

Foi escolhido o cimento CPV ARI para essa pesquisa, porque em sua composição não se encontra adições quimicamente ativas. Essa característica possibilita um estudo mais preciso da influência do aditivo cristalizante no concreto. Estabelecido conforme a NBR 16605:2017⁽⁸⁾, o diâmetro médio encontrado para esse material foi de 12 μm e a massa específica foi de 3,01g/cm³.

2.1.3 Aditivo Superplastificante

Nos dois concretos foi empregado um aditivo superplastificante, o que possibilitou a padronização do abatimento do tronco de cone, com a porcentagem do aditivo ajustada conforme necessário. Conforme informações do fabricante, o aditivo utilizado tem base de éter policarboxílico.

2.1.4 Cinza Volante

A cinza volante foi usada em um dos concretos, substituindo 50% do cimento em massa. A massa específica desse material é de 1,90g/cm³ e o diâmetro médio é de 42,15 μm . Esses parâmetros foram definidos como descrito na NBR 16605:2017⁽⁸⁾.

Observa-se que a granulometria do material foi maior que a granulometria do cimento, o que indica uma possível falta de moagem da cinza volante. No entanto, percebe-se que existem grãos menores neste material, possibilitando as reações pozolânicas.

Ao analisar a caracterização química do material, obtida através de ensaios de Difração de raios-X e de fluorescência de raios X, percebeu-se que este material possui altos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, o que indica que é um material com potencial pozolânico. Além disso, se observou que o material tem várias fases amorfas, o que o torna reativo.

2.2 Métodos

Neste item serão apresentados e explicados os métodos, bem como os ensaios, utilizados no experimento. Este estudo faz parte de um grande grupo, onde diversos trabalhos estão sendo realizados simultaneamente. Dessa forma, a metodologia mais detalhada das moldagens e dos ensaios pode ser verificada em Costa (2024)⁽⁶⁾.

2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Na tabela 1 a seguir, são apresentados os corpos de prova utilizados para cada ensaio realizado com suas respectivas dimensões.

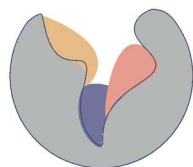


Tabela 1 – Corpos de prova utilizados no experimento

Avaliação da autocicatrização dos concretos	
Análise interna do fenômeno da autocicatrização Propagação de ondas ultrassônicas CP's cilíndricos 100x35mm	3 dias
	
	28 dias
	
Legenda:  íntegro  fissurado CP: corpo de prova	

Quanto aos concretos, é importante apresentar que o concreto referência teve um abatimento de 145mm e foi usado 0,067% de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento. Já o concreto com cinza volante, o abatimento encontrado foi de 170mm e foi utilizado 0,119% de aditivo superplastificante neste.

Após a moldagem, os corpos de prova ficaram armazenados em câmara úmida (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade de no mínimo 99%) até o dia da fissuração. Para realizar a abertura de fissuras nos corpos de prova, foi usado um aparato desenvolvido pelo grupo NORIE-UFRGS, que possibilita que o corpo de prova não rompa completamente no momento de abrir as fissuras. Para a cicatrização foi escolhido o ambiente submerso em água para todos os corpos de prova, baseado no trabalho de Petry ⁽⁹⁾, que observou que esse ambiente era favorável para o fechamento das fissuras.

2.2.2 Ensaios realizados

a) Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado no dia de abertura de fissuras e 56 dias depois. Para isso, os corpos de prova sempre foram secos em ambiente com temperatura e umidade controlados 24h antes da realização do ensaio e, com o equipamento de medição, obteve-se o tempo de propagação das ondas ultrassônicas. Conforme a NBR 8802:2019⁽¹⁰⁾, foi calculada a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

Para se obter a taxa de autocicatrização, utilizou-se a seguinte fórmula, de acordo com metodologia de Costa (2024) ⁽⁶⁾.

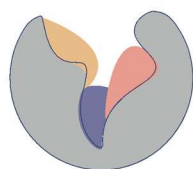
$$Tt0 = \frac{V_{ti}}{V_{ml}} \times 100$$

Onde:

Tt0 = taxa de autocicatrização (%);

V_{ml} = velocidade média de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova íntegros, nas idades de acompanhamento;

V_{ti} = velocidade de propagação de onda ultrassônica após a abertura da fissura, nas idades de acompanhamento.



3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio de velocidade propagação de ondas ultrassônicas

Na tabela 2 são apresentados os resultados encontrados no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para cada um dos concretos estudados.

Tabela 2 – Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Concreto	Idade de abertura de fissuras (dias)	% de cicatrização aos 56 dias	Média	Coefficiente de variação	Desvio Padrão
Referência	3	95,27	94,61	1,79	1,69
Referência		96,28			
Referência		92,29			
Referência	28	54,72	53,55	1,57	0,84
Referência		53,17			
Referência		52,76			
Cinza volante	3	60,91	62,23	1,54	0,96
Cinza volante		62,65			
Cinza volante		63,14			
Cinza volante	28	61,85	62,52	1,60	1,00
Cinza volante		61,77			
Cinza volante		63,93			

Percebe-se que o concreto referência, quando fissurado aos 3 dias tem uma capacidade de fechamento de fissuras bastante significativa. No entanto, quando as fissuras são abertas aos 28 dias, essa capacidade reduz cerca de 43%.

Já no concreto com cinza volante, a capacidade cicatrizante para fissuras abertas aos 3 dias foi menor do que o referência. Mas, essa capacidade se manteve quando as fissuras foram abertas aos 28 dias.

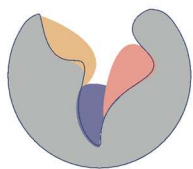
A partir dos resultados obtidos, foi realizada a ANOVA, apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – ANOVA dos resultados obtidos

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Concreto	411,1381	1	411,1381	199,4533	6,14E-07	S
Idade	1247,256	1	1247,256	605,075	7,97E-09	S
Concreto * Idade	1282,16	1	1282,16	622,0078	7,15E-09	S
Erro	16,4906	8	2,061325	-	-	-

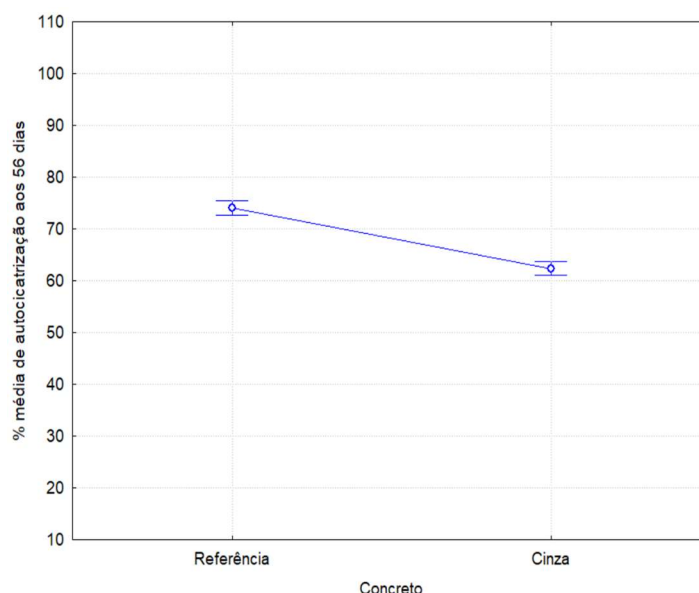
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; se $p < 5\%$ = efeito significativo. S: significativo. NS: não significativo

Com isso, percebe-se que tanto os efeitos isolados como a interação entre os efeitos são significativos. A seguir serão apresentados os gráficos destes efeitos e a discussão dos respectivos resultados encontrados.



No primeiro gráfico (figura 1), observa-se o efeito do tipo de concreto quanto a cicatrização aos 56 dias obtida através do ensaio de velocidade propagação de ondas ultrassônicas. Então, percebe-se que o concreto referência apresenta maior capacidade cicatrizante do que o concreto com cinza volante. Isso pode ser explicado pelo fato de o concreto com cinza volante possuir a metade do cimento que o concreto referência possui. A hidratação tardia do cimento, que causa a expansão da matriz cimentícia, segundo WU et al. ⁽¹¹⁾ e DE ROOIJ et al. ⁽²⁾, é a principal causa da autocicatrização em materiais cimentícios. Dessa forma, pode-se dizer que o concreto referência possui maior capacidade cicatrizante por possuir maior quantidade de grãos anidros no seu interior, dada a maior quantidade de cimento.

Figura 1 - Efeito isolado do tipo de concreto na % de cicatrização aos 56 dias, através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: produzido pelos autores

Quando se avalia o efeito da idade de abertura de fissuras na capacidade cicatrizante dos concretos (figura 2), percebe-se que os concretos fissurados aos 3 dias possuem maior fechamento de fissuras do que os concretos fissurados aos 28 dias. Novamente, isso pode estar relacionado com a quantidade de grãos anidros existentes no concreto. Uma vez que, após os 28 dias de idade, as reações do cimento tendem a estabilizar, então existe uma quantidade menor de grãos anidros.

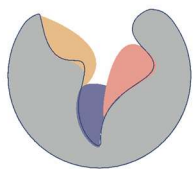
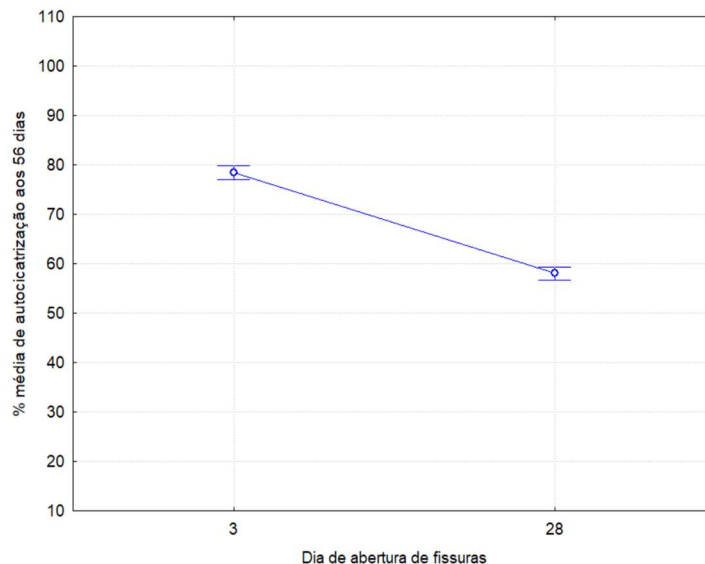


Figura 3 - Efeito isolado da idade de abertura de fissuras na % de cicatrização aos 56 dias, através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: produzido pelos autores

Por fim, na figura 3, observa-se a interação entre o tipo de concreto e a idade de abertura de fissuras desses concretos. Neste gráfico, percebe-se que quando as fissuras são abertas aos 3 dias, existe uma diferença bastante notável entre o concreto referência e o concreto com cinza volante. O concreto referência, possivelmente, possui maior capacidade cicatrizante nas idades iniciais por conta da quantidade de cimento e, consequentemente, da quantidade de grãos anidros, responsáveis por esse fechamento interno.

Quando as fissuras são abertas aos 28 dias, observa-se uma inversão nesse cenário. O concreto com cinza volante apresenta estabilidade na sua capacidade autocicatrizante, enquanto que o concreto referência tem uma perda significativa de capacidade. Isso pode ser explicado porque a cinza volante é uma pozolana, e essas tendem a reagir mais intensamente após os 28 dias de idade. Sendo assim, nas idades iniciais o cimento presente neste concreto consegue fechar parte das fissuras e, nas idades mais avançadas, esse fechamento se dá pelas reações pozolânicas proporcionadas pela cinza volante. O concreto referência, quando fissurado aos 28 dias, possui uma capacidade cicatrizante inferior pois as reações do cimento já estabilizaram e não existe outro material capaz de reagir por mais tempo nesse concreto.

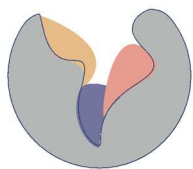
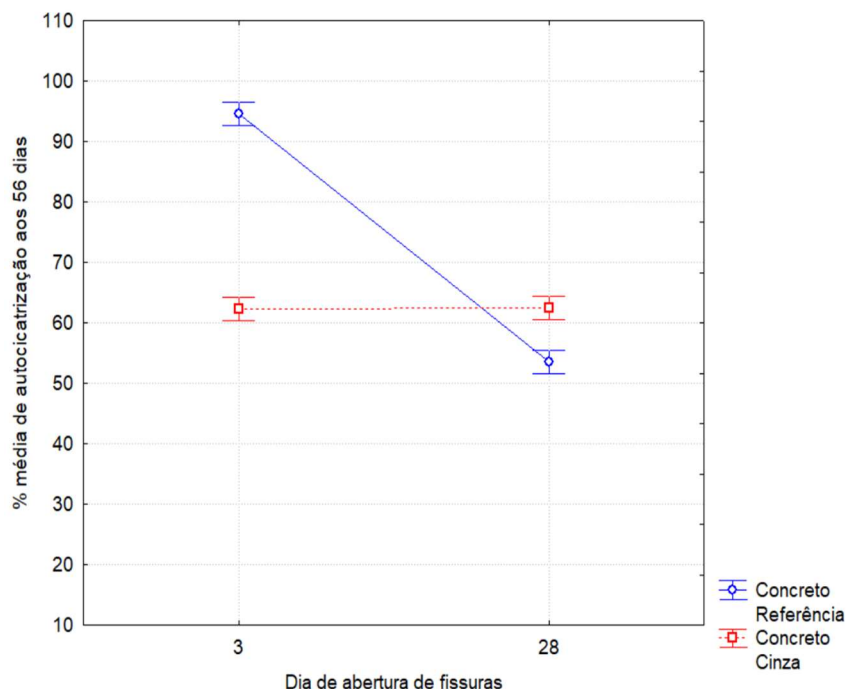


Figura 3 – Interação entre o tipo de concreto e a idade de abertura de fissuras na % de cicatrização aos 56 dias, através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



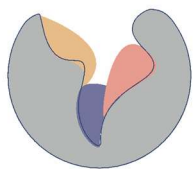
Fonte: produzido pelos autores

4. CONCLUSÕES

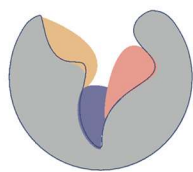
A partir do experimento realizado, pode-se concluir que, conforme esperado, a adição de materiais pozolânicos no concreto causa uma melhora na cicatrização em idades mais avançadas. Também, percebe-se que, para concretos sem pozolanas existe uma perda significativa de capacidade cicatrizante com o aumento da idade de abertura de fissuras. Por fim, é importante ressaltar que os dois concretos analisados apresentaram uma cicatrização interna favorável dentro do período de 56 dias, sendo sempre maior que 50% e podendo chegar a mais de 90%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
2. DE ROOIJ, M.; TITTELBOOM, K. V.; DE BELIE, N. SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
3. DE BELIE, N., GRUYAERT, E. et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, 2018.
4. VAN TITTELBOOM, K; GRUYAERT, E; RAHIER, H; BELIE, N de. **Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation**. Construction And Building Materials, v. 37, p. 349-359, 2012.



5. TERMKHAJORNKIT, P. NAWA, T. YAMASHIRO, Y. SAITO, T. **Self-healing ability of fly ash–cement systems**. Cement and Concrete Composites, Volume 31, Issue 3, Pages 195-203, 2009.
6. COSTA, J. R. **Análise comparativa de diferentes agentes de autocicatrização em concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2024.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 17054**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da umidade. Rio de Janeiro, 2023.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
9. PETRY, N. S. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.
10. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
11. WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials**, v. 28, 2012.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

ANÁLISE DO MECANISMO AUTOGÊNICO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS CONTENDO CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.21>

Leonardo Masiero Gil
leonardomasierog@gmail.com

Marlova Piva Kulakowski
marlovak@unisinios.br

Fernanda Pacheco
fernandapache@unisinios.br

Claudio de Souza Kazmierczak
claudiok@unisinios.br

Mauricio Mancio
mancio@unisinios.br

RESUMO

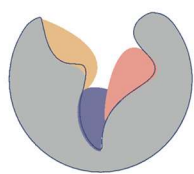
O objetivo do trabalho é avaliar a autocicatrização autógena de argamassas contendo cimento tipo LC³. As argamassas foram fissuradas e submetidas a cura submersa. Analisou-se resistência à compressão, cicatrização das fissuras por microscopia, e absorção de água por capilaridade. Na comparação com argamassas com o CP-II-F-40 (NBR), o LC³ demonstrou menor capacidade de cicatrização na análise por microscopia, com menos precipitação de cristais. Entretanto, a absorção de água foi reduzida nas argamassas com LC³. Tal comportamento provavelmente está atrelado à microestrutura mais compacta desenvolvida na hidratação do cimento LC³.

Palavras-chaves: cimento LC³; fissuras, autocicatrização autógena; durabilidade; argamassa.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the autogenous self-healing of mortars containing LC³ type cement. The mortars were cracked and subjected to moist curing. Compressive strength, crack healing by microscopy, and water absorption by capillarity were analyzed. In comparison with mortars with limestone cement type II (NBR), LC³ demonstrated lower healing capability in the microscopy analysis, with less crystal precipitation. However, water absorption was reduced in mortars with LC³. This behavior is probably due to the more compact microstructure developed during the hydration of LC³.

Palavras-chaves: LC³ type cement; cracking; autogenous self-healing; durability; mortar.



1. INTRODUÇÃO

O avanço da construção civil está atrelado ao desenvolvimento da sociedade, destacando sua grande importância para a economia. Embora traga benefícios econômicos, a construção civil é um dos setores que mais gera impactos ambientais, especialmente pela exploração de recursos naturais e emissão de dióxido de carbono, oriundo principalmente da produção do cimento ⁽¹⁻³⁾. Na busca de materiais de menor impacto ambiental e mais eficientes, vem sendo desenvolvido e avaliados os cimentos ternários do tipo LC³. O LC³ é classificado como uma família de cimentos, compostos de argila calcinada e calcário, em substituição ao clínquer ⁽⁴⁾.

A construção civil também possui uma constante preocupação no desenvolvimento de estruturas cada vez mais duráveis. Mesmo com a incorporação de armaduras as estruturas ainda são sujeitas à fissuração, que prejudicam o desempenho mecânico e facilitam a penetração de agentes agressivos ⁽⁵⁻⁶⁾. Um fenômeno que pode contornar tal problema é a autocicatrização das fissuras formadas na matriz cimentícia. A autocicatrização é classificada como a capacidade que um material tem de se regenerar sem que ocorra nenhuma intervenção externa ^(6,7,8).

Neste cenário, o objetivo do trabalho é avaliar a autocicatrização autógena de argamassas contendo o cimento ternário do tipo LC³, comparando argamassas com LC³ e com CP-II-F-40 (NBR), fissuradas e submetidas a cura submersa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os cimentos e os materiais cimentícios suplementares empregados foram caracterizados quimicamente e fisicamente, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Caracterização química dos cimentos e materiais cimentícios suplementares

Óxidos	CPII F40	CPV ARI	Metacaulim	Fíler calcário
CaO (%)	60,07	61,53	0,04	42,09
SiO ₂ (%)	17,66	17,76	54,71	12,87
Al ₂ O ₃ (%)	3,28	3,26	32,76	1,00
Fe ₂ O ₃ (%)	2,92	3,10	3,84	ND
MgO (%)	4,97	5,22	0,53	0,16
SO ₃ (%)	2,28	1,91	0,00	ND
K ₂ O (%)	0,94	0,99	1,62	0,03
Na ₂ O (%)	0,62	0,84	0,15	0,81
TiO ₂ (%)	0,25	0,26	1,69	0,07
SrO (%)	0,13	0,13	0,00	ND
P ₂ O ₅ (%)	0,12	0,10	0,25	1,08
MnO (%)	0,08	0,08	0,00	ND
ZnO (%)	0,02	0,02	0,00	ND
Cr ₂ O ₃ (%)	0,01	0,01	0,00	ND
PF (%)	6,66	4,80	4,41	41,89
Total	100	100	100	100



Tabela 2 – Caracterização física dos cimentos e materiais cimentícios suplementares

Característica	CPII F40	CPV ARI	Metacaulim	Fíler calcário	
Área Superficial Específica (m²/g)	1,69	1,44	20,43	0,77	
Massa Específica (g/cm³)	3,06	3,09	2,55	2,70	
Análise	D10 (µm)	6,24	5,85	2,043	2,605
Granulométrica	D50 (µm)	12,43	12,47	5,97	6,89
	D90 (µm)	23,38	25,87	17,27	12,90

O agregado miúdo empregado é de origem natural e quartzosa. A composição granulométrica é apresentada na Tabela 3, e indica um módulo de finura de 2,02.

Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa cumulada (%)
2,40	2	2
1,20	5	7
0,60	16	23
0,30	47	70
0,15	30	100
TOTAL	100,00	

Além disso, também foi realizado o ensaio de massa específica e massa unitária, conforme ABNT NBR 16916:2021 e ABNT NBR 16972:2021, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de massa unitária e massa específica do agregado miúdo

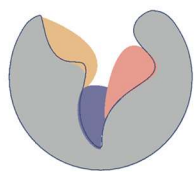
Ensaio	Resultado (kg/m ³)
Massa Unitária – Método A	1617,92
Massa Unitária – Método C	1493,73
Massa Específica	2.650,00

Visando proporcionar uma consistência similar para todas as misturas, foi utilizado aditivo promotor de plasticidade com alta capacidade de dispersão na composição da mistura.

O traço empregado no estudo é apresentado na Tabela 5. Em sua composição foi utilizada uma relação de uma parte de cimento para duas partes de agregado miúdo, em massa. A umidade da mistura foi mantida em 12%, conforme ABNT NBR 7215: 2019, resultado uma relação água/cimento de 0,36.

Tabela 5 – Traços em massa empregados no estudo

Material	T-LC ³ (g)	T-F40 (g)
Cimento	2838	4834
Metacaulim	1450	-
Fíler Calcário	546	-
Agregado Miúdo	9667	9667
Água	1740	1740
Aditivo	91,22	15,32



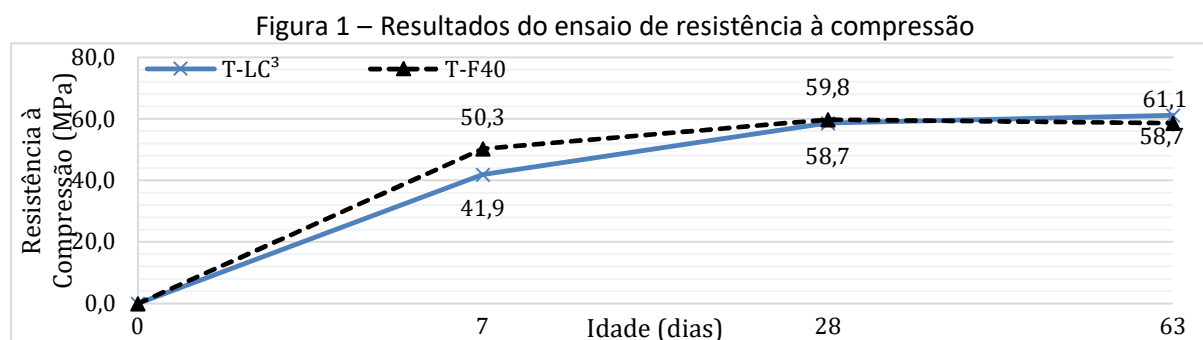
O ensaio de resistência à compressão foi executado nas idades de 7 dias, 28 dias e 63 dias, em corpos de prova cilíndricos, conforme ABNT NBR 7215:2019.

Para avaliar o mecanismo de autocicatrização, moldou-se corpos de prova prismáticos com 40x40x160 mm de dimensões. Para evitar o colapso do corpo de prova durante a fissuração, foi incorporada uma barra de aço CA 60 a 1 cm da base do corpo de prova. Procedeu-se cura submersa por 7 dias em água saturada com cal até o momento de indução das fissuras.

A fissuração dos corpos de prova deu-se através do ensaio de tração na flexão em 3 pontos, conforme indicado pela ABNT NBR 13279:2005. Após, os corpos de prova permaneceram submersos em água até a avaliação da autocicatrização. Uma das metodologias utilizadas para avaliar a autocicatrização foi a absorção de água por capilaridade, adaptando o método proposto pela RILEM TC 116-PCD:1999⁽⁹⁾. O ensaio foi executado na idade de 63 dias. Ao final do ensaio, também foi feita a lixiviação dos produtos formados na fissura, utilizando ácido clorídrico, para avaliar o corpo de prova antes e depois da autocicatrização. Cabe destacar que nessa etapa não foi realizado um banho de ácido no corpo de prova inteiro, de forma de manter sua integridade. Além disso, com o intuito de visualizar e registrar o processo de autocicatrização das amostras, utilizou-se microscópicos que possibilitam a ampliação e registro de imagens. Os registros ocorreram nas idades de 7, 14, 28 e 63 dias. Além disso, foi avaliado a espessura máxima cicatrizada no corpo de prova.

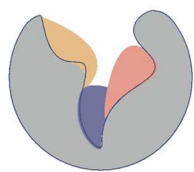
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 1, calculados de acordo com o que a ABNT NBR 7215:2019 prescreve.



Em 7 dias o cimento que apresentou maior resistência entre os três avaliados é o CII F 40, sendo 16,7% superior ao LC³. Esse comportamento está em desacordo com grande parte da literatura, em que o cimento LC³ costuma apresentar resistências superiores quando comparado aos demais cimentos^(4,10,11).

Esse comportamento pode estar ligado ao fato da necessidade de uma quantidade muito superior do aditivo superplastificante para a composição ternária do tipo LC³. Autores destacam a necessidade de maior quantidade de aditivo em função das partículas de argila calcinada, fato esse que pode prejudicar as resistências iniciais⁽¹²⁾. Além disso, a quantidade de clínquer presente na composição de LC³ é de cerca de 45%, enquanto a do CII F 40 é de 85%, fato esse que impacta diretamente no desenvolvimento da resistência. Aos 28 dias



ambos os cimentos apresentaram patamares de resistência semelhantes já estava num patamar muito semelhante ao CII F40, estando de acordo com o que bibliografia muitas vezes observa. Destaca-se a estabilização da evolução da resistência entre as idades de 28 e 63 para ambos os cimentos.

3.1 Análise visual por microscopia

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os registros de imagem realizados do processo de autocicatrização das argamassas com ambos os cimentos. É importante destacar que para cada cimento analisou-se 3 corpos de prova, entretanto são apresentadas as imagens de somente um deles, com comportamento mais relevantes do estudo.

Figura 2 – Análise visual da argamassa composta pelo cimento CII F 40

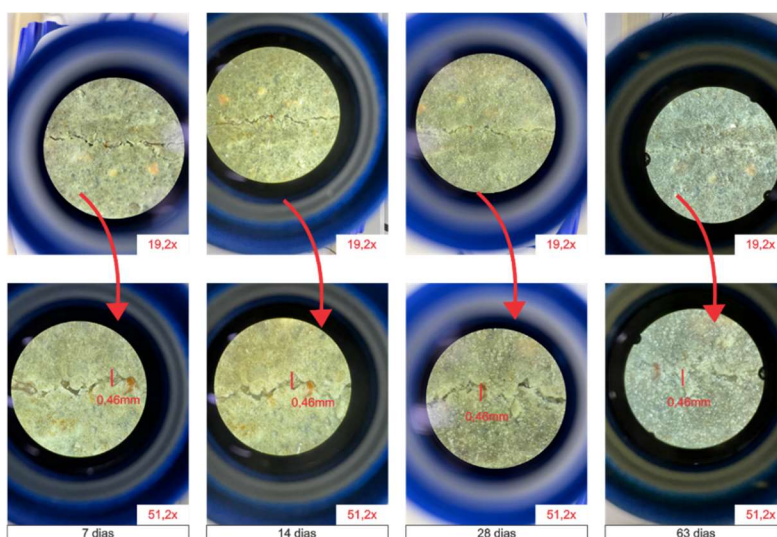
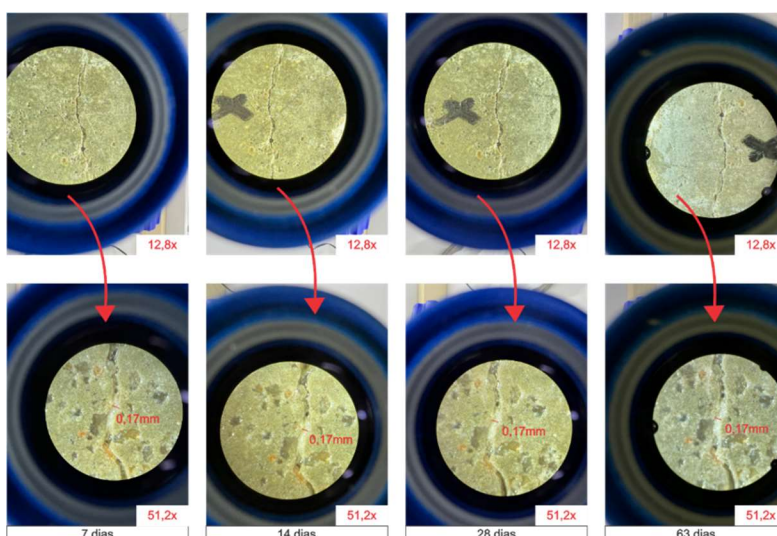
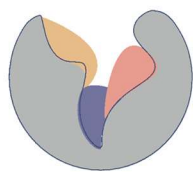


Figura 3 – Análise visual da argamassa composta pelo cimento LC³



A argamassa contendo o cimento CII F40 já apresentava locais de cicatrização após 7 dias de cura. É possível visualizar que o processo se desenvolveu ao longo do tempo, isto é, que a



cicatrização avançou ao longo da fissura (e talvez em profundidade também). Em se tratando do cimento ternário do tipo LC³ também se verificou a presença de cristais precipitados já aos 7 dias, podendo, ainda, observar que esse processo continuou ocorrendo ao longo do comprimento, conforme avanço das idades de análise. De forma a facilitar o entendimento dos resultados obtidos na análise visual foi elaborada a Tabela 6, contendo um resumo dos principais pontos observados.

Tabela 6 – Resumo dos resultados observados da análise visual

Cimento	Amostra	Espessura Máxima Cicatrizada (mm)	Média (mm)	Tipo
LC ³	LC ³ -SUB-1	0,12	0,25	Parcialmente Contínua
	LC ³ -SUB-2	0,17		Parcialmente Contínua
	LC ³ -SUB-3	0,45		Parcialmente Contínua
CPII F40	F40-SUB-1	0,46	0,33	Contínua
	F40-SUB-2	0,24		Parcialmente Contínua
	F40-SUB-3	0,28		Parcialmente Contínua

Parcialmente contínua: observado formação de cristais na espessura completa da fissura e, ao longo do comprimento da fissura, é visível a sua quase cicatrização completa

Contínua: observado formação de cristais na espessura completa da fissura e, ao longo do comprimento da fissura, é visível a sua cicatrização completa

O cimento ternário do tipo LC³ apresentou um comportamento inferior em termos de autocicatrização, entendido através das menores espessuras cicatrizadas e pela sua formação permanecer, em grande parte da fissura, de forma pontual. Levando em consideração a baixa quantidade de estudos avaliando a autocicatrização do cimento LC³ acredita-se que tal comportamento estão ligados a três particularidade desse tipo de cimento.

A formação de parte dos produtos de hidratação é mais estável que os demais cimentos. Além disso, a matriz cimentícia é mais densa pelo refinamento dos poros. Essas duas características dificultariam a movimentação dos produtos de hidratação na matriz cimentícia. Por fim, embora o cimento LC³ disponha de elevada quantidade de adições em sua composição, existe a reação química entre o pó de calcário e o metacaulim que diminui a quantidade de metacaulim disponível para reagir e formar mais compostos ^(4,10,13,15,16,18).

Os resultados de absorção de água por capilaridade são apresentados na Figura 4. Cabe destacar que os cimentos seguidos da nomenclatura “REF” se trata dos resultados após lixiviação dos cristais com ácido, de forma a atuar como estado referência antes da fissuração.

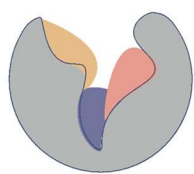
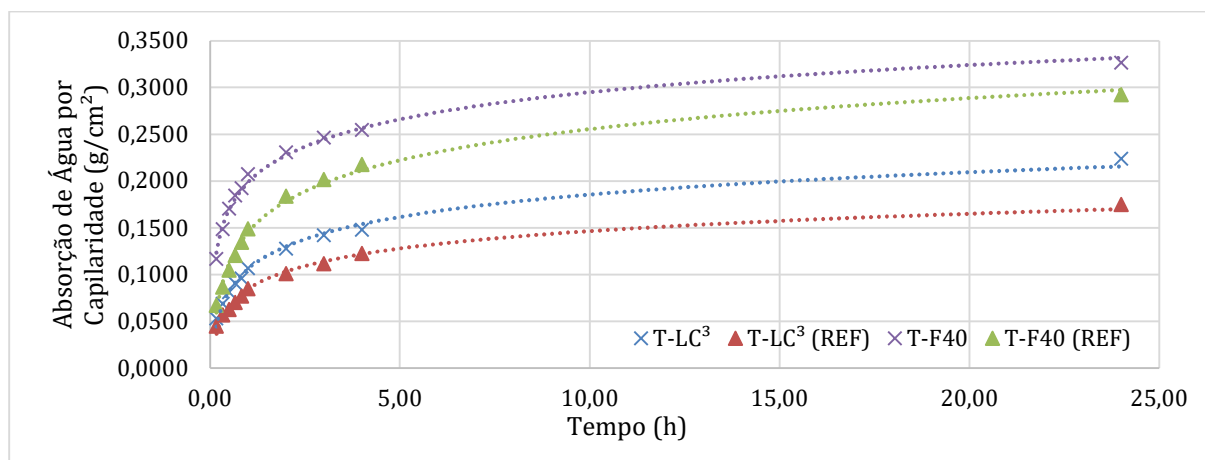


Figura 4 – Resultados de absorção de água por capilaridade



Com o intuito de proporcionar uma melhor visualização dos resultados e possibilitar facilidade no entendimento das comparações, foi elaborada a Tabela 7. A coluna nomeada como “Percentual de Cicatrização” trata-se do percentual que a coluna “Diferença” representa em relação a coluna “Referência”, podendo indicar o quanto a amostra autocicatrizou até os 63 dias, idade final avaliada nesse estudo.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade

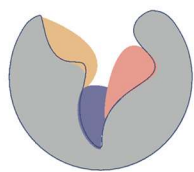
Cimento	Referência [a] (g/cm²)	Cicatrizado [b] (g/cm²)	Diferença [a-b] (g/cm²)	Teor de Autocicatrização (%)
LC³	0,2240	0,1750	0,0490	21,9%
CPII F40	0,3266	0,2922	0,0344	10,5%

Conforme é possível notar nos resultados, o cimento LC³ foi o que dispôs de maiores resultados no percentual de autocicatrização, embora tenha sido o que apresentou um comportamento inferior quando comparado aos demais cimentos na análise visual.

Embora tenha apresentado um comportamento menos satisfatório em relação aos demais cimentos na análise visual, o cimento ternário do tipo LC³ foi o que dispôs do maior percentual de autocicatrização. Por apresentarem produtos mais estáveis, que não migrariam para superfície, e uma reação entre o carbonato de cálcio moído e o metacaulim, além da reação pozolânica do metacaulim, a autocicatrização pode ser mais intensa na parte interna da matriz cimentícias (4, 10, 14, 17).

5. CONCLUSÕES

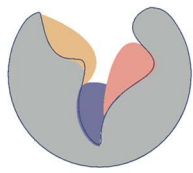
O ensaio de resistência à compressão mostrou que o cimento LC³ já apresentava um comportamento semelhante ao CPII F40 aos 28 dias de idade, cenário esse que se repetiu aos 63 dias. Aos 7 dias foi visualizado que o LC³ dispôs de uma resistência intermediária entre os outros dois cimentos analisados, fato esse não comumente observado na literatura. Com base nos resultados obtidos é possível perceber que o cimento ternário do tipo LC³ demonstrou um comportamento inferior na análise visual, com menos precipitação de cristais. Em



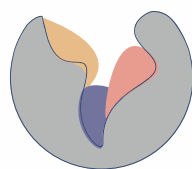
contrapartida, os resultados de absorção de água por capilaridade demonstraram uma capacidade superior em termos de cicatrização. Tal comportamento provavelmente está atrelado às reações de hidratação desse tipo de cimento.

REFERÊNCIAS

1. MARQUES, Henrique Fernandes et al. Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. *Brazilian Journal Of Development*, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 21912-21930, 2020.
2. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
3. SILVA, Guilherme Tavares de Melo et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia do concreto: uma revisão. *Brazilian Journal Of Development*, [S.L.], v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.
4. ZUNINO, Franco; MARTIRENA, Fernando; SCRIVNER, Karen. Limestone Calcined Clay Cements (LC3). *ACI Materials Journal*, [S.L.], v. 118, n. 3, p. 49-60, 1 maio 2021. American Concrete Institute.
5. VAN MULLEM, Tim et al. Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: an inter-laboratory study on concrete with macrocapsules. *Science And Technology Of Advanced Materials*, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 661-682, 31 jan. 2020.
6. ZHANG, Wei et al. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. *Composites Part B: Engineering*, [S.L.], v. 189, p. 107892, maio 2020.
7. GHOSH, Swamp Kumar. *Self-healing materials: fundamentals, desing strategies and aplications*. Pune: WILEY-VCH, 2009. 291 p.
8. RILEM 221-SHC: Self-healing phenomena in cement-based materials. (2013). *Materials and Structures*. Vol 1, 256 p.
9. RILEM TC 116-PCD. Permeability of Concrete as a Criterion od its Durability. *Materials and Structure*, v. 32, p. 174-179, 1999.
10. FRÖHLICH, Jéssica. *Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC³: estudo dos produtos da hidratação*. 2019. 224 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
11. SHARMA, Meenakshi et al. Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review. *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 149, p. 106564-106582, nov. 2021.
12. NAIR, Nithya et al. A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 254, p. 119326-119338, set. 2020.



13. AVET, François; SCRIVENER, Karen. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 107, p. 124-135, maio 2018.
14. MOREIRA, Christian. Efeitos do teor de gipsita na microestrutura de pastas de cimento de LC³. 2020. 184 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
15. TANG, Jin et al. Synergistic effect of metakaolin and limestone on the hydration properties of Portland cement. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 223, p. 177-184, out. 2019.
16. TOMCZAK, Kamil; JAKUBOWSKI, Jacek. The effects of age, cement content, and healing time on the self-healing ability of high-strength concrete. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 187, p. 149-159, out. 2018.
17. KRISHNAN, Sreejith; BISHNOI, Shashank. Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay. *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 108, p. 116-128, jun. 2018.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO COM VISTAS À MIGRAÇÃO DE CLORETOS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.22>

Heitor Antonio Tschaen Rangel

Email: heitor1003@hotmail.com

Leonnardo Postighel Barreto

Érica Bastista Santos Assis

Gabriel Agrisi Paigel

Geilma Lima Vieira

RESUMO

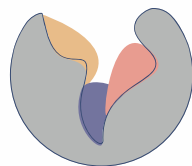
A autocicatrização é vista como um meio de impedir o acesso dos íons cloreto às armaduras. Este trabalho analisou tal fenômeno por meio do ensaio regido pela ASTM C1202(2022), com uma voltagem reduzida de 50% em função do aumento da temperatura. Foram realizadas duas faixas de fissuração induzidas nos corpos de prova de concreto, produzidos com cimento CP-V ARI puro (referência) e com adição de escória de alto-forno (75%). O resultado da carga passante total foi associando ao desempenho de autocicatrização, sendo obtido melhor resultado para o concreto com adição em todas as faixas de fissuração.

Palavras-chaves: Concreto; Autocicatrização; ASTM C1202; Penetração de íons cloreto.

ABSTRACT

Self-healing is seen as a means of preventing the access of chloride ions as armor. This work analyzed the characteristics of the test medium governed by ASTM C1202(2022), with a voltage reduced by 50% due to the increase in temperature. Two cracking strips were created in concrete test specimens, produced with pure CP-V ARI cement (reference) and with the addition of blast furnace slag (75%). The result of the total through load was associated with the self-healing performance, obtaining the best result for the concrete with addition in all cracking ranges.

Palavras-chaves: Concrete; Self-healing; ASTM C1202; Penetration of chloride ions.



1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas de concreto armado, a ocorrência de fissuras está entre as manifestações patológicas mais recorrentes e podem surgir em diferentes estágios ao longo da sua vida útil. Elas atuam como uma porta de entrada para água, ar e íons cloreto. Com o surgimento das fissuras, a entrada dos íons cloreto pode desencadear um processo de deterioração acelerada nas barras de aço, causando corrosão das armaduras (El-Newihy, 2018, p.1)⁽³⁾.

A autocicatrização é conceituada como sendo um processo realizado pelo próprio material com a recuperação e melhoria na performance após dano por algum processo (Pacheco, 2020, p.58)⁽⁷⁾. Ela pode favorecer a elevação da estanqueidade de elementos de concreto, e assim reduzir a difusão dos gases e outros agentes agressivos dentro do concreto, tornando-os menos suscetíveis ao ingresso de íons cloreto, por exemplo (Helene *et al.*, 2018, p.1)⁽⁴⁾. Sob essa perspectiva, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da autocicatrização do concreto CP V ARI puro utilizado como referência comparado ao concreto com adição da escória de alto-forno (75%), por meio da carga passante total (Q) no ensaio acelerado de penetração de íons cloreto regido pela ASTM C1202(2022)⁽¹⁾, onde ainda se fez o uso de um método estatístico de análise de variância (ANOVA) para tratar os dados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho possuiu como variável dependente, a carga passante total do ensaio da ASTM C1202(2022)⁽¹⁾ e duas variáveis independentes, sendo os tipos de concretos avaliados (dois níveis - concreto referência e com adição de escória de alto-forno) e a faixa de fissuração induzida (três níveis – Faixa 0 CP's íntegros; Faixa 01 com fissuras de 0,1mm até 0,2mm e; Faixa 02 com fissuras de 0,2mm até 0,4mm). Já as variáveis de controle neste trabalho, observou-se quatro, sendo: 1 - Relação a/c; 2 – Idade e dias de cura úmida; 3 - Aparato de abertura; 4 - Voltagem de 30 V - Redução de 50% do ensaio padronizado da ASTM C1202(2022)⁽¹⁾. Além disso, foram considerados dois fatores de ruídos neste trabalho: 1- Possíveis vazamentos e a; 2 - Calibração dos equipamentos. Para este ensaio, foi elaborado um fluxograma, conforme a Figura 1.

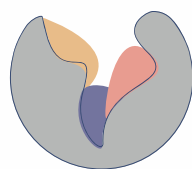
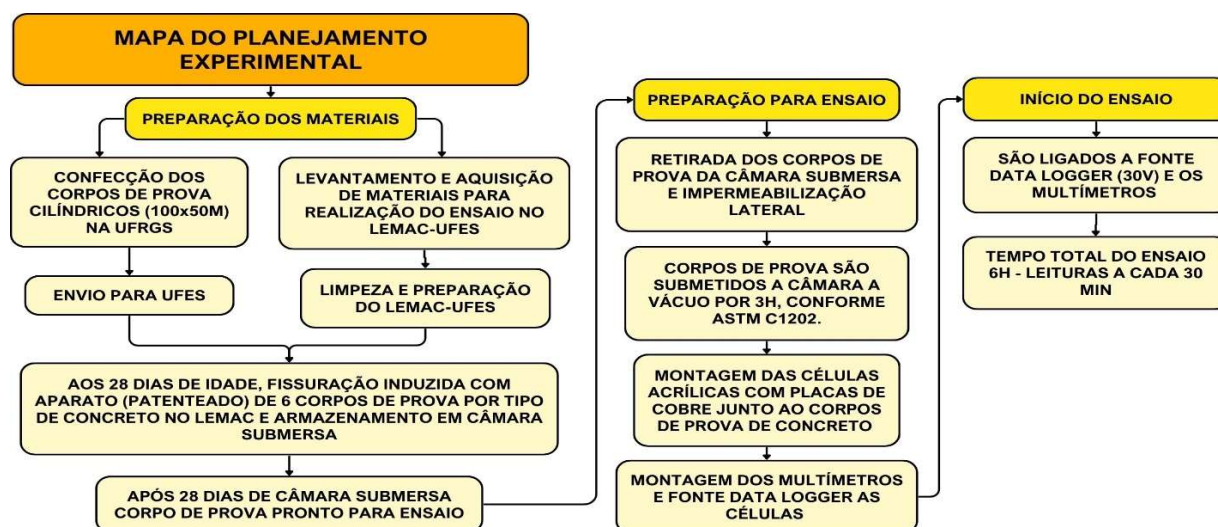


Figura 1- Fluxograma do planejamento experimental



Fonte: Os autores.

2.1 Materiais

A confecção dos corpos de prova ocorreu no laboratório da UFRGS, devidamente caracterizados no trabalho de Costa (2024)⁽²⁾, sendo utilizando em todas as amostras cimento CP-V ARI, relação a/c de 0,6, e agregados constantes, e após enviados para a UFES, onde foram realizados os ensaios. Também foram necessários 6 multímetros, uma fonte de alimentação digital regulável (*Data Logger*), bomba a vácuo, impermeabilizante, 12 doze células de acrílico, água deionizada, hidróxido de sódio (concentração 0,1M) e cloreto de sódio (concentração de 3%).

2.2 Métodos

O procedimento da norma ASTM C1202(2022)⁽¹⁾ consistiu em posicionar corpos de provas cilíndrico de aproximadamente 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro entre células de acrílico, e injetar solução de cloreto de sódio, concentração de 3% (ânodo) em um lado e solução de hidróxido de sódio, concentração de 0,1 M (cátodo) no outro, formando uma espécie de pilha. Ao término dos ensaios, insere-se os valores das leituras em uma formula, que permite se obter a carga passante total. Nesse ensaio, a norma orienta que seja utilizado uma voltagem de 60V, porém Mehta e Monteiro (2014, p.20)⁽⁶⁾ relatam a voltagem recomendada pela norma é demasiada, sendo encontrados na literatura casos de elevação da temperatura dos fluídos do sistema, proporcionando aceleração de penetração de íons cloreto.

2.2.1 Confecção e preparação dos corpos de prova de concreto

Após 28 dias da confecção, os corpos de prova passaram pelo procedimento de fissuração induzida em um molde metálico (patenteado sob o número BR10201900794), que promove a fissuração com auxílio da prensa hidráulica, conforme a Figura 2. Foram produzidos 3 corpos de prova para cada faixa de fissuração, totalizando 18 CP's para essa pesquisa. Na sequência, eles foram armazenados em câmara úmida por mais 28 dias, até a idade de realização do ensaio de penetração de íons cloreto.

RANGEL, H.A.T; BARRETO, L. P; ASSIS, E. B. S; PAIGEL, G. A; VIEIRA, G. L

Autocicatrização do concreto com adição de escória de alto-forno com vistas à migração de cloretos. SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025

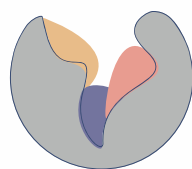
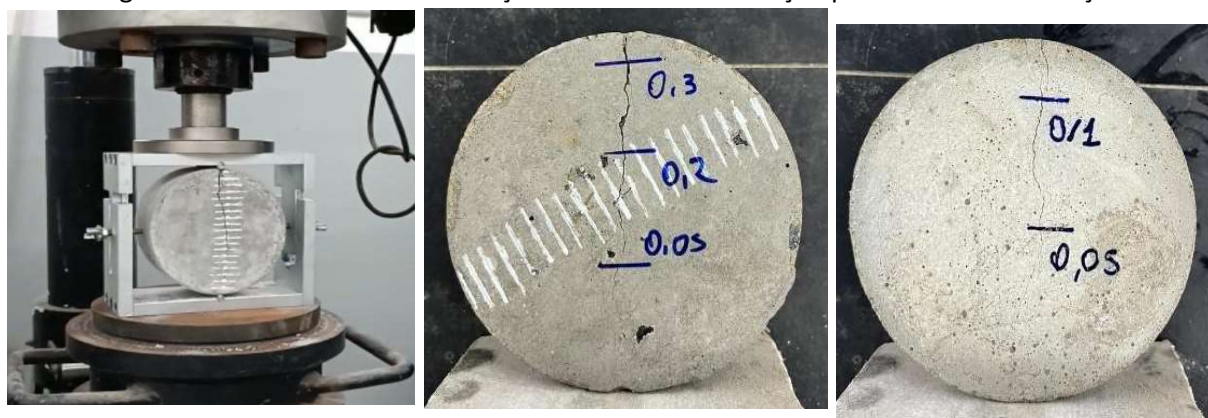


Figura 2- Procedimento de fissuração induzida e mensuração para devida classificação



Fonte: Os autores.

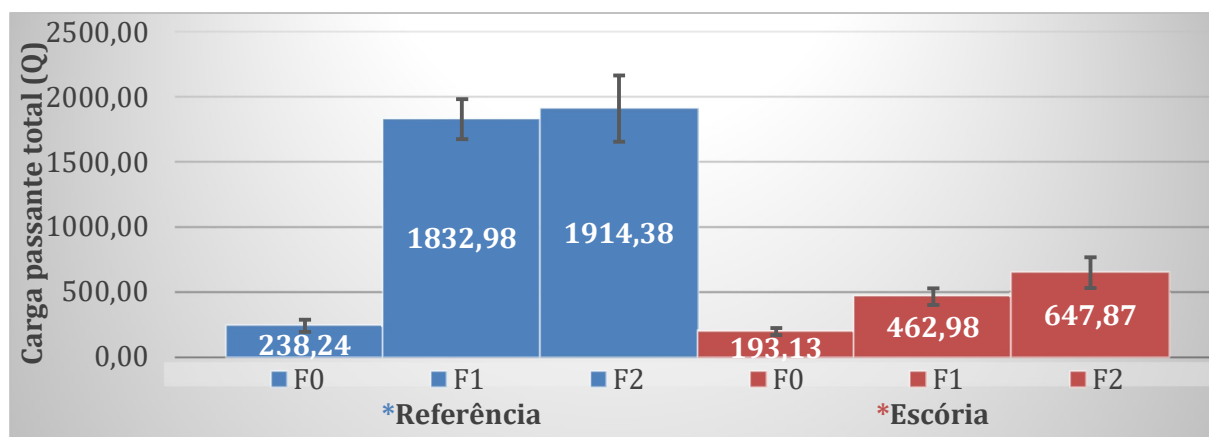
2.2.2 Montagem dos equipamentos

Montadas as células de acrílico aos corpos de prova, foram inseridos o cátodo (cloreto de sódio) e ânodo (hidróxido de sódio a 0,3M). Foram conectados os cabos que ligam o *data logger* e multímetros às hastes de cobre que ficam em contato com as soluções. Na Figura 2, foi criado um esquema com o auxílio do programa *sketchup* e ao lado um registro do ensaio em funcionamento.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

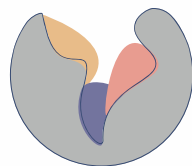
Considerou-se que quanto maior for a carga passante total (Q), maior é a penetração de íons cloreto, e assim pior é considerado o desempenho do concreto, frente a este agente deletério. O Gráfico 1 apresenta a média do resultado da carga passante no ensaio de penetração cloretos para os concretos, em suas respectivas faixas de abertura de fissuras.

Gráfico 1 – Resultado da carga passante total dos concretos avaliados



Fonte: Os autores.

A classificação quanto a penetrabilidade de íons cloreto no concreto, conforme a ASTM C1202(2022)⁽¹⁾, foi considerada para o concreto referência, muito baixa para os corpos de prova íntegros e baixa para o Faixa 1 e Faixa 2, porém analisando o desvio padrão para faixa



2, a classificação pode ser considerada como moderada. Quanto a penetrabilidade do concreto com escória de alto-forno, em todas as faixas ela foi considerada muito baixa. Em relação aos resultados do Gráfico 01, foi possível constatar que o concreto com adição de escória de alto-forno (75%) apresentou redução da carga passante total (Q) de 123,35% para o Faixa 0, 395,91% para o Faixa 1 e 295,49% para o Faixa 02, quando comparado ao concreto referência.

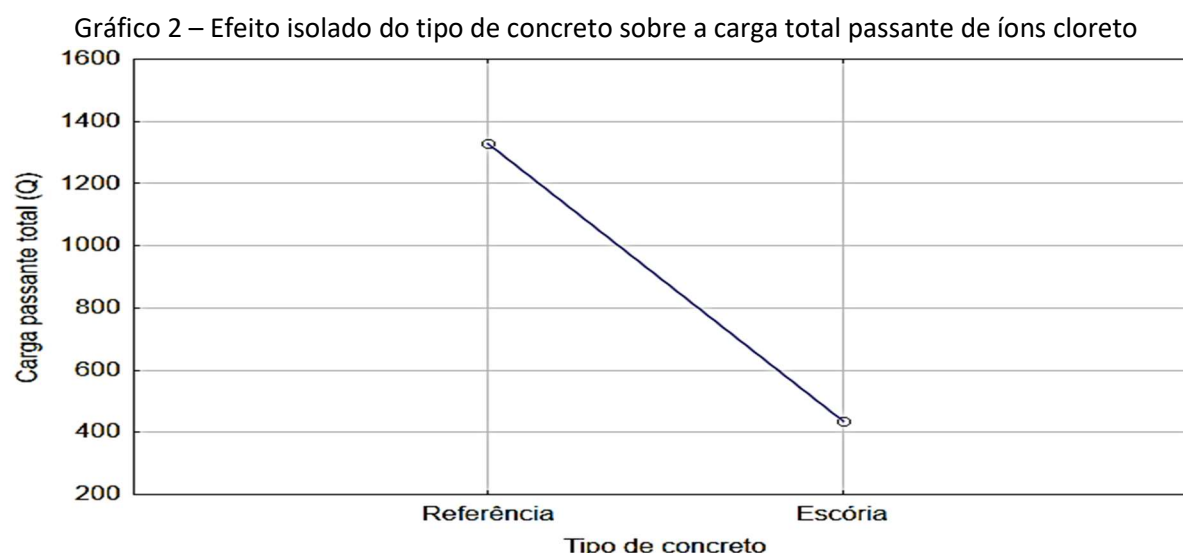
Com os resultados do ensaio, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), com o auxílio do *Software Statistica*, que apresentou os resultados conforme Tabela 1, onde o valor de significância estabelecido previamente foi $p < 0,05$.

Tabela 1 – Análise de variância dos concretos produzida com auxílio do *Software Statistica*.

Efeito	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	p	Signific.
Interce.	13989793	1	13989793	764,77	0,000000	
Tipos de concreto	3595537	1	3595537	196,55	0,000000	S
Fx de fissuração	4044126	2	2022063	110,53	0,000000	S
Tipos de concr. X Fx de fissur.	1628934	2	814467	44,52	0,000003	S
Erro	219513	12	18293			

Fonte: Próprio autor.

Com um nível de confiança de 95%, a ANOVA possibilitou verificar que as variáveis “tipo de concreto”, “faixa de fissuração”, isoladamente, foram significativas, bem como a interação entre essas variáveis. O Gráfico 2 mostra o efeito isolado do tipo de concreto.



Fonte: Os autores.

Apartir dos resultados, foi possível confirmar que substituição do clínquer do concreto referência por 75% de escória de alto-forno, reduziu a passagem de íons cloreto em cerca de 750 Coulombs, demonstrando um potencial efeito de autocicatrização da escória, atuando como um material cimentício suplementar. Na sequência, o Gráfico 3 apresenta o efeito isolado da faixa de fissuração.

RANGEL, H.A.T; BARRETO, L. P; ASSIS, E. B. S; PAIGEL, G. A; VIEIRA, G. L

Autocicatrização do concreto com adição de escória de alto-forno com vistas à migração de cloretos. SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025

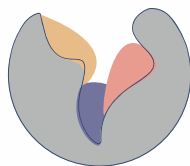
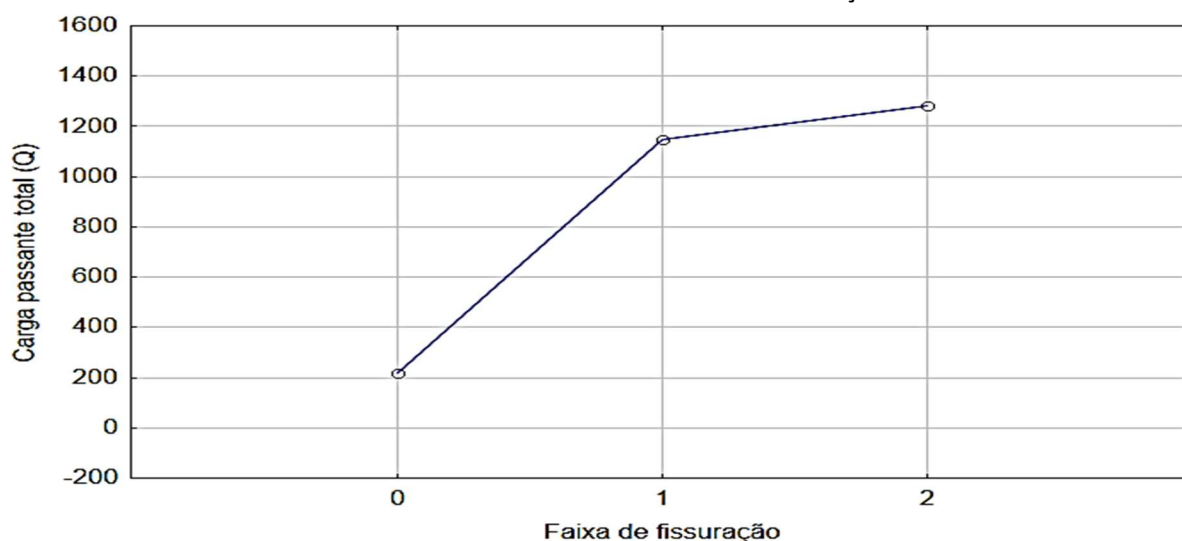


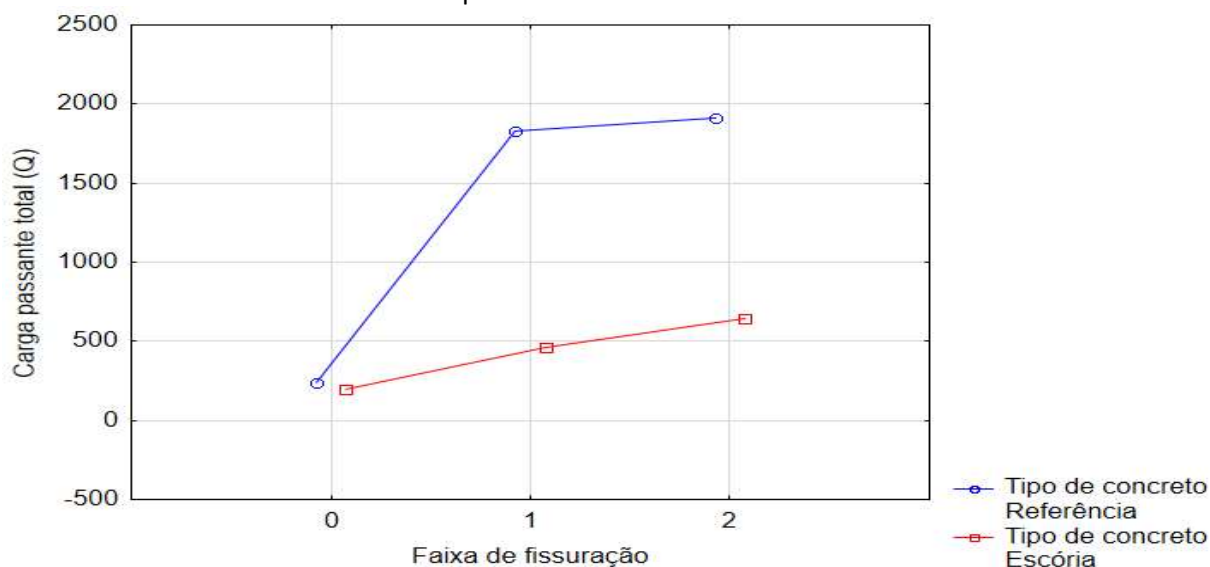
Gráfico 3 – Efeito isolado da faixa de fissuração



Fonte: Os autores.

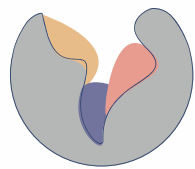
Nessa análise dos concretos agrupados pela faixa, observou-se que a fissuração induzida do Faixa 02 apresentou maior carga passante total (Q) quando comparado ao Faixa 01, conforme esperado. Acredita-se que, quanto maior as fissuras, maior tende a ser também a taxa de recuperação delas pelos mecanismos de autocicatrização, o que pode interferir na carga passante total (Q). Por fim, no Gráfico 4, é apresentado o efeito combinado entre o tipo de concreto e a faixa de fissuração.

Gráfico 4 – Efeito da interação entre o tipo de concreto e da faixa de fissuração sobre a carga total passante de íons cloreto



Fonte: Os autores.

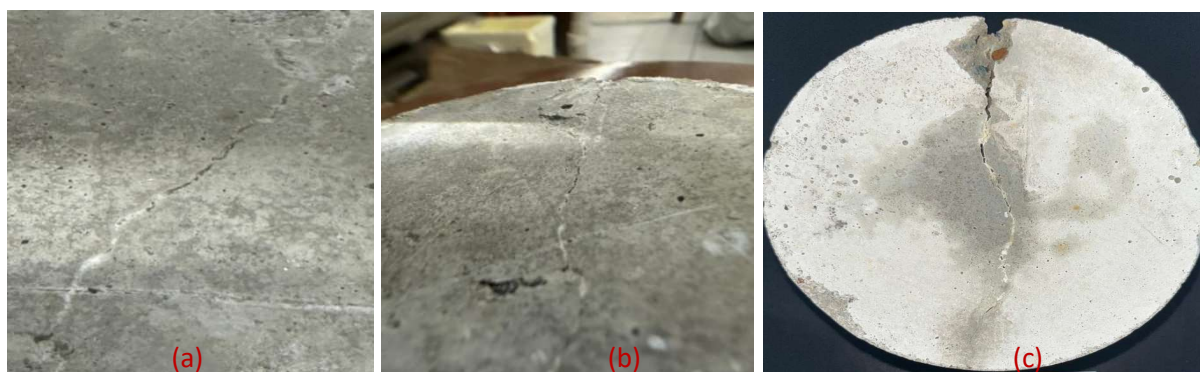
De acordo com o gráfico 4, observa-se que os valores da carga total passante no ensaio de penetração de íons cloreto foram menores para o concreto contendo escória de alto-forno, RANGEL, H.A.T; BARRETO, L. P; ASSIS, E. B. S; PAIGEL, G. A; VIEIRA, G. L
Autocicatrização do concreto com adição de escória de alto-forno com vistas à migração de cloretos. SIBRACIC - 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO. Porto Alegre – RS – Brasil, 22 e 23 de maio de 2025



em todas as faixas de fissuração. Do ponto de vista de durabilidade, o desempenho do concreto com escória de alto-forno reduziu a carga passante de cloretos. Observa-se uma redução de mais de três vezes em relação ao valor da carga total passante do concreto de referência, estatisticamente comprovado. Este comportamento pode indicar uma possível atividade de autocicatrização, configurando-se em uma barreira para entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto. Este efeito pode estar associado à composição química da escória de alto-forno, que possibilita a formação de novos compostos cimentícios quando entra em contato com a água.

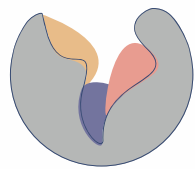
Apesar de ser um concreto de lentas reações, já era aguardado que o concreto com adição de escória de alto-forno (75%) teria um melhor desempenho, pois ele é rico em SiO_2 (30,54%) e Al_2O_3 (13,03%), conforme caracterização do trabalho de Costa (2024, p. 68)⁽²⁾, o que poderia lhe conferir uma atividade pozolânica, capaz de diminuir a passagem acelerada dos íons cloreto devido a um refinamento dos poros, redução da impermeabilidade e menor difusividade de íons cloreto no concreto, incorporando cátions que influenciam na maior ou menor penetração de cloretos. Uma outra vertente para justificar a melhora é no quesito autocicatrização. Sun *et al.* (2022, p.1)⁽⁸⁾, apontam a escória de alto-forno como um material capaz de aumentar a autocicatrização autógena, possivelmente resultado de uma hidratação adicional de partículas não hidratadas devido as reações químicas lentas, e ainda afirma que a escória tem mostrado melhor performance frente a outros materiais pozolânicos. As substituições de 50-75% de cimento Portland por escória, podem promover o fechamento de até 0,20mm de fissuras, por precipitação de carbonato de cálcio (Van Tittelboom *et al.*, 2012 *apud* Sun *et al.*, 2022, p.1)⁽⁸⁾. Visualmente, constatou-se um fechamento parcial das fissuras, conforme visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Fechamento parcial de fissuras. (a) e (b) formação de minerais nas fissuras em CP de escória (75%) com 56 dias de cura úmida, (c) CP de escória (75%) fora da faixa de fissuração não usado na pesquisa, mas com elevada formação de minerais nas fissuras.



Fonte: Os autores.

Além da precipitação de carbonato de cálcio, existe a possibilidade de formação de outros compostos. Os íons cloreto no interior do concreto, podem ser quimicamente ligados, chamados de cloretos fixos, que após reagirem com compostos anidros do cimento, como o aluminato de cálcio (C_3A), reagem e formam compostos como os cloroaluminatos de cálcio ou sal de Friedel ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), substância esta que não ataca a armadura. Entende-se que



quanto mais alto é o teor de C_3A do cimento, maior é a quantidade de íons cloreto retidos, o que incrementa a resistência à corrosão induzida por estes agentes. No entanto, a escória de alto-forno combinada com íons cloreto é capaz de aumentar a velocidade e a taxa de formação do Sal de Friedel, devida à alumina reativa, quando comparado apenas ao C_3A proveniente do cimento (Baroghel-Bouny; Capra; Laurens, 2014 apud Zago, 2019, p.49)⁽⁹⁾.

Mesmo em quantidades reduzidas, acredita-se que possa ter havido a formação de sal de Friedel durante ensaio, possibilitando um melhor desempenho do concreto com escória de alto-forno. No processo de carbonatação com a redução do pH, o teor de cloretos combinados na formação do sal de Friedel é decomposto (Magalhaes, 2019, p.55)⁽⁵⁾, logo, como não houve condições que possibilitassem esse processo durante o ensaio, criou-se a hipótese de surgimento deste sal durante o ensaio.

4. CONCLUSÃO

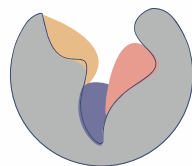
Neste estudo, verificou-se que em todas as amostras de concreto ocorreram a autocicatrização, que pode ser percebida visualmente. Era esperado que a adição promoveria melhorias no desempenho da penetração acelerada de íons cloreto mensurado no ensaio da ASTM C1202(2022)⁽¹⁾, pois a escória é um material capaz de promover tal propriedade ao concreto. Com os resultados deste trabalho, foi possível afirmar que a autocicatrização, com a incorporação de 75% de escória em substituição ao cimento, propiciou uma redução de 395,91% na carga passante em relação ao concreto de referência para os concretos fissurados na faixa 1. Sob esta perspectiva, no entanto, recomenda-se que sejam realizados estudos mais aprofundados a respeito do fenômeno da autocicatrização, com maiores idades de cura úmida e principalmente estudos dos compostos formados nas fissuras e de suas possíveis capacidades de criarem barreiras para a penetração dos íons cloreto, que poderiam gerar assim, o aumentar a vida útil das edificações.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a parceria realizada entre a UFRGS e UFES, que integram um projeto de pesquisa desenvolvido pelo NORIE, em conjunto com o Laboratório LAMTAC da UFRGS e o Laboratório LEMAC da UFES, que possibilitaram realizar este trabalho. Também agradecemos ao CNPq, pelo apoio financeiro do projeto, e à CAPES, pela bolsa de mestrado dos pesquisadores.

REFERÊNCIAS

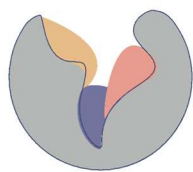
1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: **ASTM C 1202**. Philadelphia, 2022.
2. COSTA, J. R. **Análise comparativa de diferentes agentes de autocicatrização em concretos**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

3. EL-NEWIHY, A; AZARSA, P; GUPTA, R; BIPARVA, A. Effect of Polypropylene Fibers on Self-Healing and Dynamic Modulus of Elasticity Recovery of Fiber Reinforced Concrete. Special Issue "**Fibers and Techniques for Upgrading of Concrete and Masonry Constructions**", p.17, 2018.
4. HELENE, P; GUIGNONE, G; VIEIRA, G; RONCETTI, L; MORONI, F. Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, nº 3, p. 554-563, 2018.
5. MAGALHAES, T. A. **Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno**. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
6. MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J. M; Concreto: estruturas, propriedades e materiais. In: HASPARYK, N. P. (ed.). **Concreto, microestrutura e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.
7. PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020.
8. SUN, J; KONG, K. H; LYE, C. Q; QUEK, S. T. Effect of ground granulated blast furnace slag on cement hydration and autogenous healing of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 13, 2022.
9. ZAGO, S. C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de acaria LD**. 260 f. Tese (Doutorado em Ciências) –Escola de Engenharia de Lorena, da Universidade de São Paulo, Lorena 2019.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO UTILIZANDO POZOLANAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA NO PERÍODO DE 2014 A 2024

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.23>

ROCHA, Marielle Vieira Felix
Email: marielle.felix@usp.br

DAMINELLI, Bruno Luís
Email: bruno.daminelli@usp.br

CASCUDO, Oswaldo
Email: ocascudo@gmail.com

RESUMO

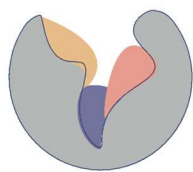
Os compósitos cimentícios, como o concreto, são fundamentais na construção civil pela versatilidade e durabilidade, mas fissuras comprometem sua vida útil. A autocicatrização, por meio de cura autógena ou mecanismos autônomos, oferece soluções inovadoras. Esta pesquisa analisa avanços nacionais e internacionais em "autocicatrização", "pozolanas autocicatrizantes" e "self-healing concrete", destacando o uso de pozolanas como sílica ativa, cinzas volantes e metacaulim, que promovem formações químicas benéficas. Tecnologias como microcápsulas de sílica e geopolímeros também são promissoras. No entanto, desafios incluem eficácia em concretos com idades avançadas e fissuras maiores, apontando para a necessidade de abordagens mais integradas e sustentáveis.

Palavras-chaves: autocicatrização, pozolanas, concreto.

ABSTRACT

Cementitious composites, such as concrete, are essential in civil construction due to their versatility and durability; however, cracks compromise their lifespan. Self-healing, through autogenous healing or autonomous mechanisms, offers innovative solutions. This research analyzes national and international advancements in "self-healing," "self-healing pozzolans," and "self-healing concrete," highlighting the use of pozzolans like silica fume, fly ash, and metakaolin, which promote beneficial chemical formations. Technologies such as silica microcapsules and geopolymers also show promise. Nonetheless, challenges remain regarding efficacy in older concretes and larger cracks, underscoring the need for more integrated and sustainable approaches.

Palavras-chaves: Self-healing, Pozzolans, Concrete.



1. INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios, como os materiais à base de cimento, destacam-se como recursos essenciais na construção civil. Dentre eles, o concreto é amplamente reconhecido como o material de construção mais utilizado no mundo. Além disso, é a segunda substância mais consumida anualmente no planeta, ficando atrás apenas da água, devido à sua versatilidade e facilidade de moldagem em diversas formas quando no estado fresco, aliado ao seu bom desempenho em resistir aos esforços solicitantes²⁰.

A durabilidade das estruturas de concreto pode ser afetada por efeitos físicos e químicos. Esses dois fatores estão frequentemente interligados, de modo que as causas físicas podem intensificar os danos causados por fatores químicos. Essa estreita relação torna desafiador identificar com precisão as origens e causas das manifestações patológicas que afetam o desempenho do concreto. Entre essas manifestações, a fissuração destaca-se como a mais comum¹³.

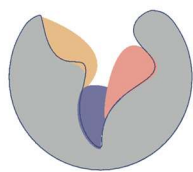
Atualmente, pesquisas relacionadas à autocicatrização de materiais cimentícios, com o uso de tecnologias avançadas incorporadas à matriz, têm apontado alternativas promissoras para prevenir a deterioração de estruturas fissuradas. Os materiais de autocicatrização, denominados *self-healing*, possuem a capacidade de reparar danos de forma autógena ou com estímulo externo mínimo, desenvolvendo reparação de maneira autônoma⁶. A autocicatrização autógena pode ser aprimorada por meio de adições minerais. Estudos demonstram os benefícios do uso de cinzas volantes e escória de alto forno nesse contexto^{21; 25; 10; 29; 19}.

Com o objetivo de contribuir para o aprimoramento do conhecimento sobre matrizes cimentícias com capacidade de autocicatrização, esta pesquisa tem o foco de analisar o estado do conhecimento, tanto no Brasil quanto no exterior, em relação às pesquisas sobre os termos "autocicatrização", "pozolanas autocicatrizantes" e "*self-healing concrete*". Adicionalmente, a pesquisa busca descrever os mecanismos de autocicatrização proporcionados pelas pozolanas, e o papel desses materiais como agentes de autocicatrização. Para tanto, será realizada uma revisão de estudos nacionais e internacionais, promovendo uma análise comparativa e crítica dos avanços nesse campo.

2. METODOLOGIA

Os termos pesquisados foram "self-healing concrete", "pozzolans", "pozolanas autocicatrizantes", "concreto autocicatrizante" e variantes, foram aplicados filtros nas bases de dados para artigos revisados por pares e no título e/ou no assunto e/ou nas palavras chave utilizando as seguintes bases de dados nacionais: Catálogo de teses e dissertações CAPES, Portal de busca integrada (USP), Portal de periódicos CAPES, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e para artigos internacionais foi utilizada a base Science Direct. O período de publicação definido foi entre 2014 e 2024 para artigos nacionais e internacionais.

Inicialmente, foram exportados 69 artigos internacionais na plataforma *science direct*, resultado do uso dos filtros: revisados e de pesquisa e referente às subáreas: engenharia e ciência dos materiais dos quais 22 foram selecionados após a remoção de duplicatas e



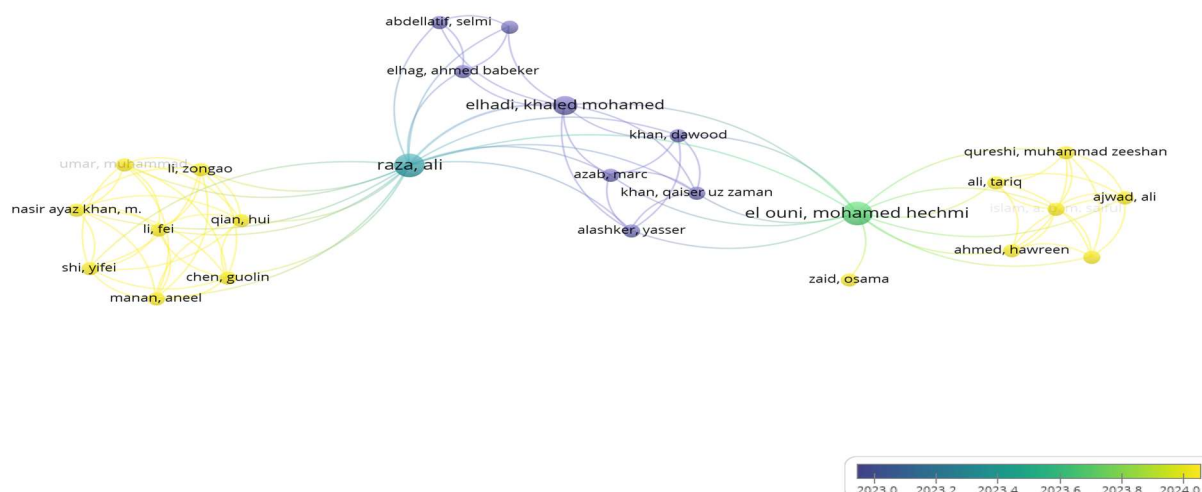
filtragem dos documentos não relevantes. Também foram analisadas pesquisas nacionais para criação de correlação com as pesquisas internacionais, sendo selecionados 15 artigos de maior relevância.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Resultados bibliométricos

O *software VOSviewer* foi utilizado para criar visualizações das redes de coautoria e co-ocorrência de palavras nos 22 artigos internacionais exportados, gerando infográficos que representam a correlação de autoria, onde se observa que muitos artigos se baseiam e citam um autor principal. As redes de coautoria foram mapeadas para examinar colaborações conforme ilustrado na Figura 1. O *software VOSviewer* foi utilizado para criar visualizações das redes de coautoria e co-ocorrência de palavras nos 22 artigos internacionais exportados.

Figura 1. Rede de co-autoria exportada pelo Science Direct



Fonte: própria autora.

Na Figura 1 acima, se observa que o autor principal que trata sobre o assunto é Raza Ali³¹ com maior número de artigos publicados (3) e citações (18), onde o principal artigo do autor se trata de uma extensa revisão de várias características do concreto microbiano autocurativo, sendo de grande contribuição para a área de pesquisa. Na figura 1 também pode se observar que esses artigos se referem ao período de 2023 a 2024 através da análise de cor.

Na Figura 2 abaixo, correlaciona-se as palavras chaves de todos os artigos. Pode-se observar que o termo mais encontrado “*self healing*” aparece como palavra chave em 14 artigos e é citado 67 vezes no geral. De acordo com as cores representadas, observa-se que os artigos que citam e que utilizam o termo são datados entre 2018 e 2024, justificando a relevância do tema na atualidade.

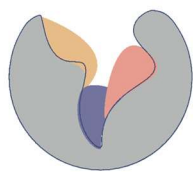
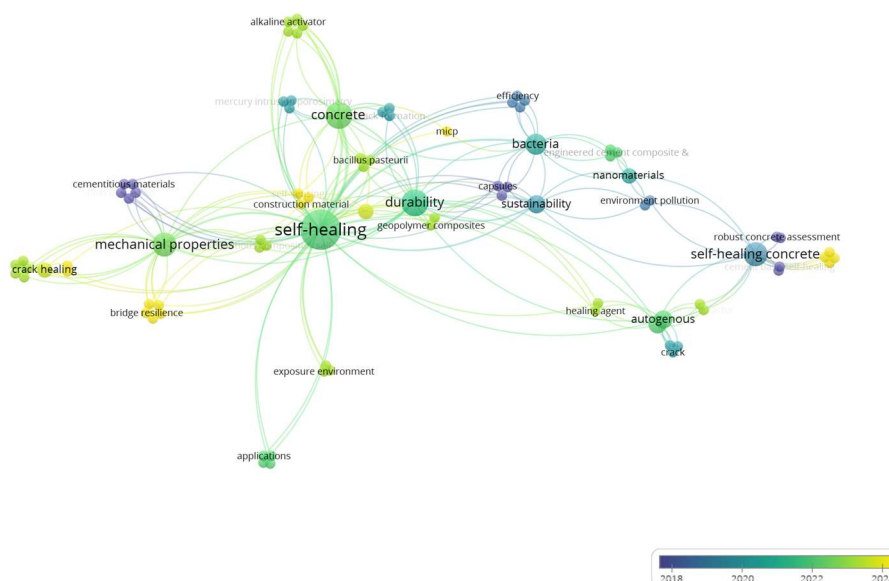


Figura 2. Análise de co-ocorrência de palavras exportada pelo Science Direct



Fonte: própria autora

3.2 Discussão técnica

3.2.1 Autocicatrização de materiais cimentícios

A pesquisa sobre concretos autocicatrizantes busca desenvolver ou aprimorar tecnologias que permitam ao concreto se autorreparar diante da fissuração, com a divisão do fenômeno em duas classificações: autocicatrização autógena e autônoma. A primeira ocorre devido à hidratação contínua dos compostos do concreto, enquanto a segunda envolve o uso de adições minerais, bactérias ou agentes adesivos para o reparo das fissuras ^{24, 10}.

A autocicatrização autógena é atualmente mais relevante para a aplicação prática. Isso ocorre porque, ao modificar a matriz cimentícia, é possível intensificar a autocicatrização já presente no concreto, utilizando medidas que são mais facilmente aplicáveis. Estudos realizados com esse objetivo inseriram adições minerais na matriz cimentícia, sendo os componentes mais conhecidos a escória de alto-forno¹⁰ e as cinzas volantes ^{21, 19, 29}. A cicatrização autógena já é conhecida há muitos anos, e esse efeito justifica a durabilidade de construções antigas que receberam pouca manutenção.

Os mecanismos autógenos são geralmente limitados à cicatrização de fissuras de largura de cerca de 100-150 µm. Em contraste, a maioria dos mecanismos autônomos que podem fechar fissuras de 300 µm, e, às vezes, até mais de 1 mm ²⁴.

A autocicatrização autógena refere-se à hidratação contínua de materiais anidros com a nucleação de carbonato de cálcio e formação de cristais ^{10, 24} entre outros. No entanto, esse fenômeno pode ser melhorado quando se restringe a abertura das fissuras (Figura 3A) e há presença de água (Figura 3B). Assim, se intensifica a possibilidade de hidratação ou cristalização contínua (Figura 3C).

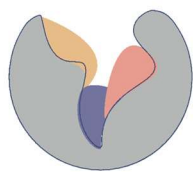
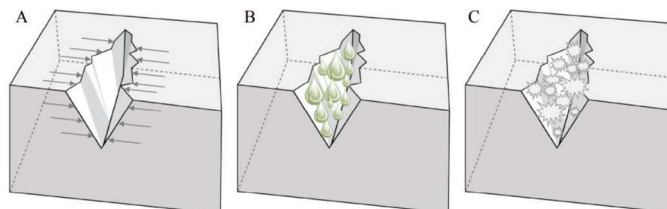


Figura 3. Abordagens da autocicatrização autógena (A) restrição da abertura de fissura; (B) fornecimento de água; (C) hidratação contínua e cristalização



Fonte: Van Tittelboom e De Belie (2013)

Há várias abordagens para estimular a autocicatrização autógena em materiais cimentícios, uma das quais envolve a adição de materiais pozolânicos ou latentes, como cinzas volantes e escórias de alto-forno, que substituem parcialmente o cimento. Esses materiais, que são hidraulicamente ativos, permanecem não hidratados por longos períodos, o que pode prolongar o processo de hidratação e, assim, melhorar a capacidade de autocicatrização autógena ao longo do tempo. Além disso, estudos têm mostrado que a adição de aditivos expansivos pode otimizar esse processo, ampliando a recuperação das fissuras ²⁴.

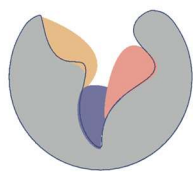
3.2.2 Pozolanas como agentes de autocicatrização

As pozolanas são materiais silicosos ou aluminosos que reagem com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, para formar compostos semelhantes ao gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse processo é conhecido como reação pozolânica. Segundo ¹⁶ a adição de pozolanas em concreto melhora suas propriedades em várias frentes:

1. Redução da Permeabilidade: O C-S-H formado pela reação pozolânica reduz a porosidade do concreto, dificultando a penetração de água e de agentes agressivos, como cloretos, que poderiam acelerar a corrosão das armaduras e outras formas de deterioração.
2. Autocicatrização: Quando o concreto sofre fissuração, a água que entra nas fissuras pode promover novas reações pozolânicas, formando C-S-H que sela as fissuras, o que caracteriza a autocicatrização. Este processo é limitado a fissuras pequenas e requer a presença de umidade para ser eficaz.

Devido aos benefícios proporcionados pelas adições, tem-se observado uma tendência crescente de usar cimentos Portland compostos ou pozolânicos, ao invés dos cimentos puros ⁹. O efeito positivo das adições, como sílica ativa, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz, sobre a resistência do concreto em relação à penetração de agentes agressivos, foi evidenciado ao longo de mais de cem anos de pesquisas ^{9, 4, 14, 16, 28} entre outros.

A sílica ativa é amplamente reconhecida por sua alta reatividade. Estudos indicam que ela aumenta significativamente a produção de C-S-H e reduz a permeabilidade do concreto. A sílica ativa não só melhora a durabilidade do concreto, mas também ajuda na autocicatrização ao reagir com o Ca(OH)_2 para formar compostos que preenchem as fissuras⁹.



O metacaulim é outro material pozolânico que tem mostrado grande potencial na autocicatrização de concreto. Um estudo destacou que o metacaulim, ao ser adicionado ao concreto, contribui para a formação de C-S-H, o que aumenta a densidade do material e melhora a resistência ao desgaste e à fissuração. também demonstrou que o metacaulim pode ser eficaz na redução da permeabilidade e na autocicatrização de fissuras ^{29,24}.

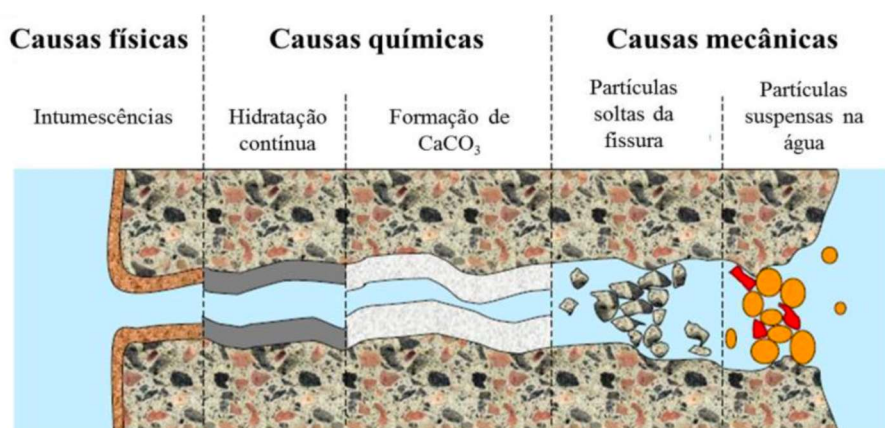
3.2.3 Mecanismos de autocicatrização em concretos com pozolanas

Quando o concreto sofre fissuração e entra em contato com a água, ocorre uma continuação da hidratação e das reações pozolânicas. A água ajuda a dissolver o Ca(OH)_2 , que, por sua vez, reage com as pozolanas para formar novos compostos. Esses novos compostos de C-S-H ajudam a preencher as microfissuras, promovendo a auto-recuperação da estrutura.

Estudos²² experimentais mostram que a utilização dessas adições pode intensificar a capacidade do concreto de se autocicatizar e discutem como essas pozolanas ajudam a reduzir a porosidade do concreto, contribuindo para a impermeabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos, o que também facilita o processo de autocicatrização. Adição de sílica ativa e cinzas volantes favorecem a autocicatrização por meio da formação de novos compostos, sugerindo que esses materiais pozolânicos podem contribuir para a formação de produtos que ajudam a selar microfissuras ^{24,22,9,1,26}.

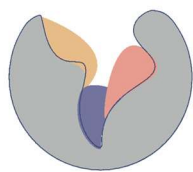
Na publicação do volume 11 do comitê técnico da RILEM SHC 221⁶ é apresentado um esquema que descreve as causas físicas, químicas e mecânicas associadas ao processo natural de colmatação autógena das fissuras (Figura 4). Esse processo pode ser aprimorado, por exemplo, por meio da utilização de adições.

Figura 4. Diferentes causas que podem levar à colmatação natural de uma fissura



Fonte: DE ROOIJ et al., 2013

A causa física das intumescências está relacionada ao possível inchaço da pasta de cimento hidratada devido à absorção de água, o que pode reduzir a entrada de fluidos pelas fissuras em até 10%. As causas químicas, por sua vez, ocorrem devido à hidratação de cimento anidro, que, na ausência de água, permanece sem reação. Com a presença de água, novos produtos são formados, os quais se estendem ao longo da fissura. A hidratação tardia (ou contínua) geralmente não é capaz de reparar completamente a fissura, mas, quando as espessuras são



inferiores a 0,1 mm e associada a outras causas, pode ocorrer a autocicatrização, o segundo processo químico que pode ocorrer é a formação de CaCO_3 , resultante da interação dos íons de cálcio (Ca^{2+}) provenientes dos poros do concreto com os íons de carbonato (CO_3^{2-}) presentes na água da fissura. Esse processo é influenciado por fatores como temperatura, pH e concentração dos reagentes, e é o principal responsável pela autocicatrização das fissuras⁶.

Também foi observada^{29,19} a presença de CaCO_3 nas fissuras em seus estudos e relataram que a concentração de CO_3^{2-} próxima à superfície da fissura é maior do que em seu interior, devido às condições de dissolução do CO_2 . Esse nível de supersaturação, presente na região próxima à abertura da fissura, é ideal para a precipitação do CaCO_3 , o que explica a tendência de precipitação neste local.

3.2.4 Revisão bibliográfica de estudos Nacionais e Internacionais

3.2.4.1 Nacionais

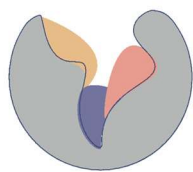
Os estudos realizados no Brasil sobre a autocicatrização de concretos com adições de pozolanas têm ganhado destaque, especialmente devido ao uso de materiais locais como cinzas volantes e pozolanas naturais, que são amplamente disponíveis no país. Estudos²⁶ mostram que a cinza volante contribui para a geração de compostos que reagem com o hidróxido de cálcio, promovendo a autocicatrização e melhorando a durabilidade. Da mesma forma, a pesquisa⁵ sobre a cinza de bagaço de cana-de-açúcar destaca sua capacidade de formar microestruturas mais densas, o que beneficia a resistência e a impermeabilidade, além de auxiliar na autocicatrização.

A dissertação³⁰ explora o uso de agentes biológicos, como *Bacillus subtilis*, e a casca de arroz para promover a autocicatrização. Os resultados indicam que as argamassas com esses componentes apresentam melhorias significativas na resistência e na reparação de fissuras. A pesquisa¹⁸ também demonstrou a eficácia das amostras pozolânicas e bacterianas na cicatrização de fissuras, com destaque para a formação de calcita e C-S-H como produtos de reparação.

3.2.4.2 Internacionais

O estudo³¹ investigou o uso de materiais pozolânicos ultra-finos, como sílica ativa (USF) e cinza volante ultra-fina (UFFA), para promover a autocicatrização de concretos de ultra-alto desempenho (UHPC) sob condições de carbonatação. Os resultados mostraram que ambos os materiais estimulam a hidratação secundária, com a sílica ativa formando gel de sílica que melhora a resistência mecânica do UHPC, especialmente sob carga flexural. Por outro lado, a UFFA acelera a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), melhorando a impermeabilidade do concreto, com desempenho superior no fechamento de fissuras e recuperação da impermeabilidade.

Foi investigado⁷ microcápsulas de sílica encapsulando epóxi e nanopartículas de sílica funcionalizadas com amina, as quais, ao serem incorporadas ao concreto, liberam um agente curativo quando as fissuras se formam, restaurando as propriedades mecânicas e de durabilidade. A interação entre as nanopartículas e a matriz de cimento melhora a compatibilidade e promove o fechamento de fissuras de até 150 μm .



Em relação aos materiais cimentícios suplementares (SCMs)²¹ relataram que a escória de alto-forno, sílica ativa, cinzas volantes e metacaulim estimulam reações de hidratação retardada, promovendo a autocicatrização mesmo em concretos com idades avançadas com a reação pozolânica sendo mais eficaz com a substituição do cimento.

No caso de geopolímeros, ¹⁷investigaram o uso de cinzas volantes em geopolímeros, mostrando que a cura com água favorece a formação de géis N-A-S-H, promovendo a autocura e reduzindo fissuras nos concretos geopoliméricos.

^{10,21} também destacaram os benefícios da utilização de pozolanas híbridas e da relação pozolana/cimento na melhoria das propriedades de autocicatrização, com a formação de compostos como C-S-H, que ajudam na reparação de fissuras. Os estudos exploraram a adição de pozolanas, como cinza volante e metacaulim, em diferentes proporções, avaliando seu impacto na resistência mecânica e no comportamento de autocura. Além disso, a presença desses materiais híbridos aumentou a densidade da matriz e contribuiu para a durabilidade do SHCC (Compósito Cimentício Reforçado com Fibras do tipo Strain Hardening).

Por fim, o estudo²¹ demonstrou que a autocicatrização de concretos com idades avançadas, como os compostos cimentícios com cinzas volantes, escória de alto-forno e fibras de PVA, pode ser reduzida em materiais mais velhos, mas a cura em ambiente "CO₂-water" resultou em excelente desempenho, com fissuras de até 0,5 mm sendo fechadas em 30 dias e completamente seladas em 90 dias.

Para aberturas de 0,1 a 0,3 mm, a taxa de autocicatrização pode atingir 85%; para fissuras entre 0,3 e 0,5 mm, a taxa varia de 50% a 70%; e para fissuras superiores a 0,8 mm, é inferior a 30%. Apesar desses avanços, a literatura sugere que poucas pesquisas integram testes de durabilidade, macro e micromecânica, microestrutura e nanoestrutura, sendo essa combinação crucial para avaliar com maior confiabilidade a eficiência da autocicatrização⁷.

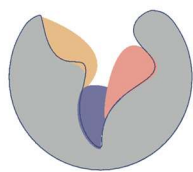
4. CONSIDERAÇÕES

Os estudos revisados revelam avanços significativos no desenvolvimento de concretos autocicatrizantes, especialmente aqueles que utilizam materiais pozolânicos e sistemas inovadores como microcápsulas e geopolímeros.

Apesar dos avanços, existem lacunas significativas que precisam ser abordadas:

1. Há uma falta de estudos que integrem testes de durabilidade, mecânica macroscópica e micromecânica, além de testes de micro e nanoestrutura para avaliar a eficiência da autocicatrização de forma mais abrangente^{31,7}
2. Muitos estudos indicam que mesmo com alta quantidade de pozolanas, apresentam menor eficácia na autocicatrização devido à disponibilidade limitada de portlandita e umidade sugerindo a necessidade de investigações mais detalhadas sobre como melhorar a autocicatrização em concretos mais antigos²¹.

Estudos futuros poderão abordar essas lacunas ao integrar diferentes abordagens de avaliação além de investigar novas metodologias para melhorar a eficácia da autocicatrização em concretos com maiores idades e em fissuras maiores.

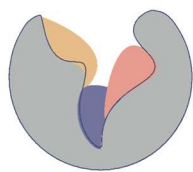


AGRADECIMENTOS

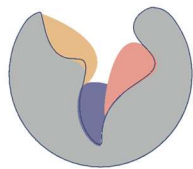
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

1. American Concrete Institute (ACI 236R-13). (2013). Autocicatrização de concreto. American Concrete Institute.
2. AYUB, S.; ALI, B.; KHAN, S. (2013). Sustainable Concrete with Pozzolanic Materials: Applications and Performance. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2(2), 91–99.
3. BARBOSA, A. S. et al. (2019). Influência da adição de cinza volante na resistência e durabilidade do concreto. *Engenharia de Construção*, v. 11, p. 28-35.
4. BERRY, E. E.; MALHOTRA, V. M. (1986). Fly Ash in Concrete: Properties and Performance. *ACI Special Publication*, 98, pp. 175–204.
5. Costa, F. A. et al. (2020). Utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como pozolana para o concreto: Aspectos da durabilidade e autocicatrização. *Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Aplicadas*.
6. DE ROOIJ, M. et al. (2013). Self-healing phenomena in cement-based materials: State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC. Dordrecht: Springer.
7. GUERRERO, A.; PEREZ, G.; ERKIZIA, E.; GAITERO, J. J.; KALTZAKORTA, I. (2015). Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete. *Materials Chemistry and Physics*, p. 1–10. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.08.047.
8. GJØRV, O. E. (1983). Durability of Concrete: Investigation of the Effects of Mineral Admixtures on the Durability of Concrete. A. A. Balkema.
9. GJØRV, O. E. (2015). Durability of Concrete: Factors Affecting Performance and Durability of Concrete Structures. Springer.
10. Huang, H.; Ye, G.; Damidot, D. (2014). Influence of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 60, p. 68-82.
11. JONKERS, H. M. et al. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, v. 36, p. 230-235.
12. LI, H.; LIU, C.; ZHU, X. (2017). Study on the self-healing behavior of concrete with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 82, 131-141.
13. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014). Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON.
14. MEHTA, P. K. (1998). Durability of Concrete. *ACI Materials Journal*, 95(4), 468–479.



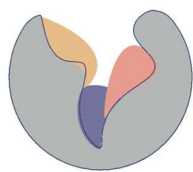
15. NEVES, E. R. M.; COELHO, F. L. (2020). *Materiais de construção civil: conceitos e aplicações*. São Paulo: Editora Blucher.
16. NEVILLE, A. M. (2013). *Properties of Concrete*. 5th ed. Pearson Education Limited.
17. OHNO, M.; LI, V. C. (2014). A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.045.
18. PACHECO, Fernanda. (2020). *Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto*. Tese de Doutorado apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo.
19. QIAN, X.; LI, J.; LIU, C.; LI, Z. Mechanisms of crack self-healing in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 12, p. 1825–1834, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.08.004.
20. SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, p. 441-454.
21. ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. (2009). Durability properties of microcracked ECC containing high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 39, n. 11, p. 1033-1043.
22. SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. *Use of waste materials in concrete: potential for developing countries*. Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-17891-6.
23. SILVA, P. A. et al. (2016). Efeitos das pozolanas na durabilidade do concreto: uma revisão. *Revista Engenharia e Tecnologia*, v. 8, n. 2, p. 56-66.
24. VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. (2013). Self-healing in cementitious materials: A review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217.
25. WANG, J. et al. (2016). Application of microencapsulated healing agents in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 122, p. 398-417.
26. WU, H.; WANG, X.; LI, J.; LIU, Z.; ZHAO, X. (2012). Self-healing concrete: A review on its mechanisms, materials and applications. *Construction and Building Materials*, 28(1), 16-28.
27. XIA, B.; AL-OBAIDI, S.; FERRARA, L. (2022). Effect of different environments on the self-healing performance of Ultra High-Performance Concrete – A systematic literature review. Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Roads and Transportations Engineering Department, University of Al-Qadisiyah.
28. ZAYED, H. H.; SALAMA, A.; RASHAD, A. M. (2016). Influence of Pozzolanic Materials on the Performance of Concrete. *Construction and Building Materials*, 107, 199–209.
29. ZHU, W.; ZHANG, Y.; WANG, X. (2015). Pozzolanic materials in self-healing concrete. *Journal of Materials Science*, 50(4), 2375-2387.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

30. ZOTTIS, A. L. (2023). "Avaliação da Capacidade de Autocicatrização em Argamassas Especiais Contendo Adições Pozolânicas e Agentes Biológicos Incorporados em Casca de Arroz." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.
31. RAZA, ALI ET AL. (2023) Sustainability assessment, structural performance and challenges of self-healing bio-mineralized concrete: A systematic review for built environment applications, Journal of Building Engineering, Volume 66, 2023.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DE FISSURAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO POR MEIO DA RESISTÊNCIA À INFILTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.24>

Eduardo Kloeckner Sbardelotto

Email: eduardoklsb@gmail.com

Berenice Martins Toralles

Email: toralles@uel.br

Romel Dias Vanderlei

Email: rdvanderlei@uem.br

RESUMO

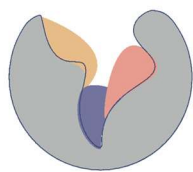
A autocicatrização autóloga de materiais cimentícios tem potencial de aumentar sua durabilidade à ação de íons cloreto. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a autocicatrização autóloga de fissuras em materiais cimentícios com adição de 50% e 75% de escória de alto-forno reativa (EAF). O método consistiu em fissurar corpos de prova de modo controlado e submetê-los a um ensaio de resistência à infiltração de íons cloreto após 0, 9 e 18 ciclos de condicionamento. Os resultados mostraram que a carga elétrica passante nos corpos de prova fissurados reduziu, o que demonstra o potencial de autocicatrização autóloga de fissuras nas misturas.

Palavras-chave: autocicatrização; fissura; escória; durabilidade.

ABSTRACT

Self-healing in cementitious materials has the potential to improve durability against chloride ions actions. The aim of this research was to evaluate the autogenous self-healing of cracks in cementitious materials with the addition of 50% and 75% reactive ground blast furnace slag (GGBFS). The method involved generating controlled cracks in test specimens and then subjecting them to a test to measure resistance to chloride ion penetration after 0, 9, and 18 cycles of conditioning. The results showed a reduction in electric charge passing through the test specimens, demonstrating the potential for autogenous self-healing of cracks in the mixtures.

Palavras-chaves: self-healing; crack; slag; durability.



1. INTRODUÇÃO

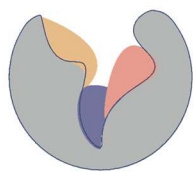
Na indústria da construção civil são utilizados diversos tipos de materiais de cimento Portland, nomeadamente concretos, argamassas e pastas. Com exceção de deteriorações mecânicas provenientes de impacto, erosão, abrasão e cavitação, a maioria das influências desfavoráveis à durabilidade de materiais cimentícios decorrem do transporte de fluidos através da sua microestrutura, sejam eles água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono (CO_2) ou oxigênio ⁽¹⁾. A fissuração pode prejudicar a sua durabilidade ao facilitar esse transporte, mas é uma característica intrínseca e difícil de ser completamente controlada, podendo surgir em poucos minutos após a moldagem até mais de 10 anos de idade ⁽¹⁾. Portanto, repensar técnicas e métodos que diminuam a permeabilidade a esses agentes agressivos pode aumentar a durabilidade desses materiais e indiretamente promover a sua sustentabilidade.

Uma técnica/fenômeno que tem demonstrado potencial para isso é a autocicatrização autógena. Relatado pela primeira vez em 1836, os estudos sobre o assunto aumentaram no século XX com o objetivo de procurar soluções para o fechamento de fissuras em estruturas de reservatórios e pontes ⁽²⁾. Conforme uma classificação geral proposta por um comitê de pesquisadores, a autocicatrização pode ser dividida entre autógena e autônoma. Na autógena (ACG), os mecanismos envolvendo os processos de autocicatrização ocorrem a partir de partículas de determinados materiais presentes na mistura, que são potencialmente capazes de promover o fechamento de vazios, mas que não necessariamente são adicionados com essa finalidade, como o próprio cimento Portland, adições minerais reativas e hidróxido de cálcio. Já na autônoma (ACN), os processos ocorrem a partir de elementos adicionados propositalmente para esta finalidade, como cápsulas contendo polímeros, bactérias ou pós reativos, agentes expansivos e tubos de vidro com material de fechamento suplementar ⁽²⁾.

Diversas técnicas de pesquisa já foram utilizadas para estudo da autocicatrização que, em geral, têm o intuito de verificar a ocorrência do fenômeno e/ou a eficiência de adições autocicatrizantes. Alguns desses métodos adaptaram ensaios e técnicas que já existem para outras finalidades, como microscopia ótica e eletrônica, difração e fluorescência de raios X, microtomografia, análises não destrutivas por ondas mecânicas e eletromagnéticas, absorção de água por imersão e capilaridade, avaliações de resistência elétrica e recuperação de resistência mecânica. Já outros, foram criados a partir da necessidade de outras análises em que não há técnicas normatizadas ou tecnologias amplamente conhecidas, como ensaios de permeabilidade de água e infiltração de gases ⁽³⁻⁶⁾.

Uma forma de avaliar o fechamento de fissuras devido a autocicatrização é através de ensaios de resistência à infiltração de íons cloreto. Diversos estudos já utilizaram técnicas semelhantes com esse foco ⁽⁷⁻¹⁵⁾, que de modo geral, buscaram correlacionar a redução da quantidade de carga elétrica passante em um intervalo de tempo (fato atribuído ao aumento da dificuldade de passagem dos elétrons pela matriz) com o fechamento parcial/total dos poros e fissuras.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios com escória de alto forno por meio de uma adaptação de um ensaio normatizado de avaliação de resistência à infiltração de íons cloreto.



2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para produção das misturas foram o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), areia normal brasileira (ANB), escória de alto forno (EAF), fibra de PVA e água potável da rede pública. As principais propriedades químicas e físicas do CPV-ARI, EAF e da ANB são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades químicas e físicas do CPV-ARI, EAF e ANB

Elemento/Propriedade	CPV-ARI	EAF	ANB
CaO	62,41	47,8	
SiO ₂	18,69	32,8	95,5
Al ₂ O ₃	4,36	9,53	
MgO	3,49	5,63	
SO ₃	2,7	2,3	
Fe ₂ O ₃	2,88	0,569	
Outros	5,47	1,371	4,5
Massa Específica (g/cm ³)	3,09	2,99	2,60
Blaine (m ² /kg)	439,2		
BET (m ² /kg)		763,1	
D10 (μm)		1,47	
D60 (μm)		11,41	
D95 (μm)		23,7	
CQEAF (NBR 16697)		1,75	

Fonte: O autor

O resultado do ensaio de chappelle modificado foi 0 mg $CaOH_2$ /g de EAF, o que demonstrou que o material não é pozolânico. Apesar disso, o DRX mostrou um halo de variação entre 25 e 35° e ausência de picos cristalinos, o que indica a sua estrutura amorfa e reativa. A areia normal brasileira foi utilizada nas mesmas proporções (distribuição granulométrica) da ABNT NBR 7215 ⁽¹⁶⁾. A fibra PVA foi utilizada na dosagem recomendada pelo fabricante com o objetivo de promover maior distribuição das fissuras nos corpos de prova durante a ruptura induzida. A escolha dessa fibra foi motivada pelo seu módulo de elasticidade, que é semelhante ao dos materiais cimentícios, o que favorece a ocorrência de um modo de ruptura mais dúctil. As principais propriedades da fibra PVA são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades da fibra PVA

Massa Específica (g/cm ³)	Comp. (mm)	Diâm. (μm)	Relação l/D	Resist. à tração (MPa)	E (GPa)	Along. Máx. (%)	Dosagem	
1,3	12	100	120	1200	28	12,5	Volume 1%	Kg/m ³ ≅ 13

Fonte: Fabricante

As proporções (traços) das misturas são apresentadas na tabela 3. Foram produzidas 3 misturas diferentes, uma sem EAF, uma com adição de 50% de EAF e outra com adição de 75% de EAF, já a quantidade de água foi definida com base em um estudo semelhante ⁽¹⁷⁾ e a relação água/cimentícios foi aplicada sobre o total de ligantes (cimento + EAF).

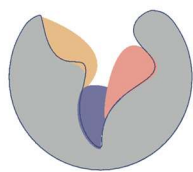


Tabela 3 – Traço unitário e consumo de materiais (kg/m³)

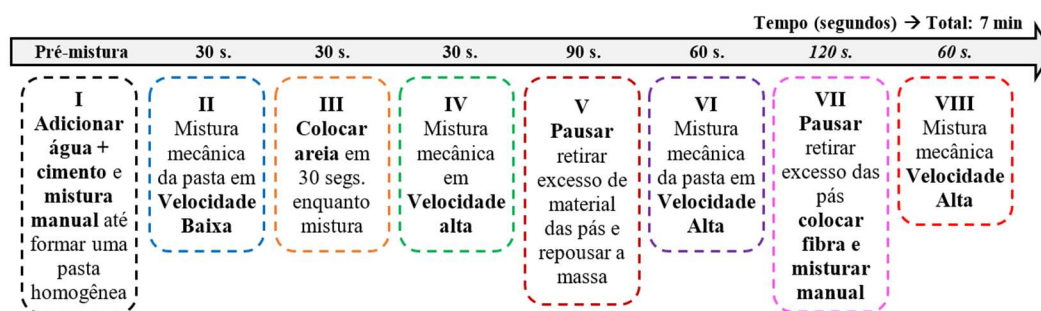
Mistura	Traço Unitário	Cimento	ANB	EAF	Água	Fibra PVA	Total
REF	1 : 3 : 0 : 0,54	482,6	1447,8	-	260,6	13,0	2204
A50	1 : 3 : 0,5 : 0,54	403,2	1209,6	201,6	326,6	13,0	2154
A75	1 : 3 : 0,75 : 0,54	375,8	1127,3	281,8	355,1	13,0	2153

Fonte: O autor

2.2 Método

O método da pesquisa foi experimental e iniciou com a moldagem de 8 CP's cilíndricos Ø50x100 mm (diâmetro x altura) de cada traço, sendo no total 24 CP's. Após alguns testes preliminares, foi definido um método de mistura com tempos suficientes para permitir a homogeneização das fibras. A mistura foi feita com uma misturadora mecânica (argamassadeira) de 3 litros. A figura 1 apresenta o método de mistura detalhado.

Figura 1 – Método de mistura

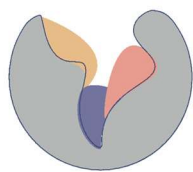


Fonte: O autor

Após 28 dias de cura foi realizado um método de fissuração parcialmente controlado de 12 CP's (4 cada traço) através da compressão simples até a sensibilidade da célula de carga de uma prensa hidráulica acusar força máxima resistente. As fibras controlaram a ruptura para não haver concentração de tensões e destruição dos CP's. Os outros 12 CP's não foram rompidos e foram utilizados como referência sem fissuras.

Após a ruptura, todos os 24 CP's foram condicionados em ciclos de molhagem e secagem (2 dicas seco e 7 dias imersos em água) com a finalidade de simular condições ambientais de exposição intermitente da matriz a um meio aquoso alcalino (promover a autocicatrização por meio de reações de cimentação da EAF) e períodos secos (promover a autocicatrização por carbonatação). Os ensaios de avaliação da resistência à infiltração de íons cloreto foram realizados após 0, 9 e 18 ciclos de condicionamento, que equivalem aproximadamente a 0, 3 e 6 meses.

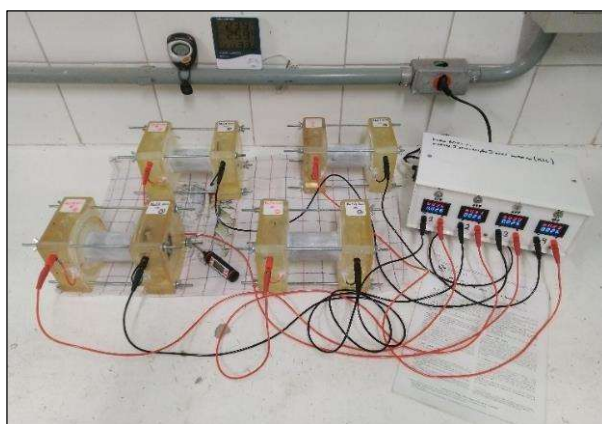
O método de ensaio consistiu em uma adaptação da norma ASTM C1202 ⁽¹⁸⁾. O ensaio, conforme a norma, é uma avaliação da habilidade de infiltração e migração de íons cloreto em corpos de prova cilíndricos, feita através da aferição da carga elétrica passante em CP's submetidos à uma diferença de potencial de 60V DC, aplicada em duas soluções eletrolíticas



de NaCl e NaOH, em que os íons cloreto Cl^- migram de um lado dos CP's para o outro através das soluções.

O equipamento utilizado para o ensaio é um protótipo construído com base na norma e consiste em 4 células de 120x120x50 mm (largura x altura x espessura) com reservatórios de Ø90x30 mm (diâmetro x altura), uma fonte elétrica de 60V CC e cabos de ligação. O método padrão é realizado com CP's de concreto Ø100x50 mm, mas nesta pesquisa o equipamento foi adaptado para realização do ensaio em CP's Ø50x100 mm. A figura 2 apresenta uma foto do equipamento durante o ensaio.

Figura 2 – Ensaio de resistência à infiltração de íons cloreto

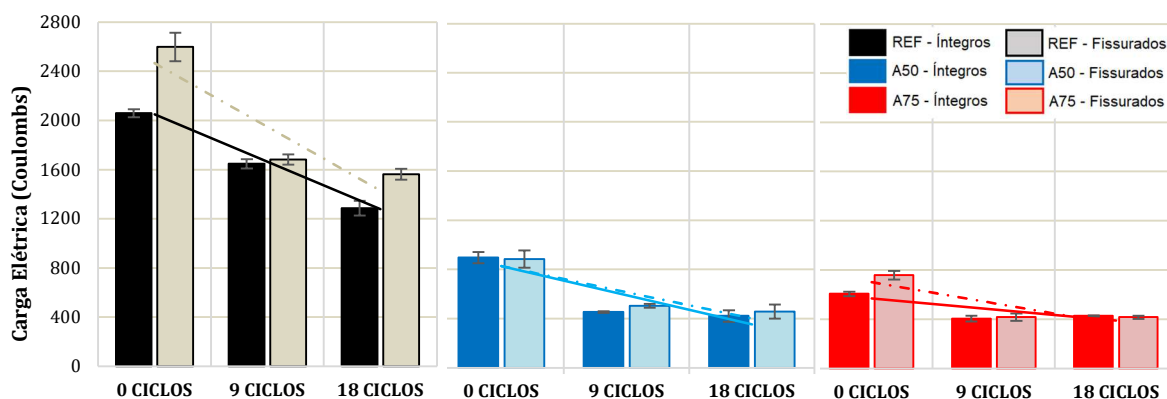


Fonte: O autor

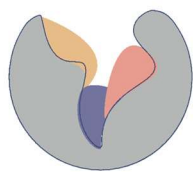
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados de 2 formas. Na primeira forma (transversal) foram comparados os dados entre os CP's fissurados e não fissurados em cada um dos ciclos. Na segunda forma (longitudinal) foram comparados os dados no decorrer das idades, após 9 e 18 ciclos de condicionamento. Além disso, foram analisadas as tendências de mudança da carga elétrica com o tempo. A figura 3 apresenta esses resultados que correlacionam a carga elétrica passante de acordo com o traço e a quantidade de ciclos de condicionamento.

Figura 3 – Carga Elétrica Passante após os ciclos de condicionamento



Fonte: O autor



Para a mistura REF, observa-se que houve um aumento da carga elétrica passante logo após a fissuração, já para as misturas com EAF a carga elétrica praticamente não se alterou. Isso demonstra que, mesmo fissurados, os CP's com EAF são mais resistentes à infiltração de íons cloreto.

Na mistura de referência houve a maior redução da carga elétrica passante após 9 ciclos de condicionamento, que estabilizou após 18 ciclos. Nos CP's fissurados, a carga elétrica reduziu para valores semelhantes aos não fissurados após os 9 ciclos, o que indica a ocorrência da autocicatrização autógena devido a carbonatação do hidróxido de cálcio.

Nas misturas A50 e A75 também houve redução da carga elétrica após 9 ciclos de condicionamento, mas em menor intensidade, provavelmente porquê nessas misturas a porosidade capilar já era menor que a referência desde a idade inicial. Após 9 ciclos de condicionamento a redução da carga elétrica nos CP's fissurados estabilizou para valores semelhantes aos não fissurados, o que indica também a ocorrência da autocicatrização. Nesse caso, diferentemente de REF, nos CP's com EAF além da carbonatação do hidróxido de cálcio a autocicatrização ocorreu também devido as reações cimentantes tardias da EAF que ocorrem devido ao meio alcalino proporcionado pela matriz cimentícia hidratada.

Outros autores também observaram resultados semelhantes em materiais cimentícios com EAF. Após 14 dias de cura por imersão em água, as concentrações de cloretos reduziram cerca de 40% em materiais cimentícios fissurados produzidos com adição de EAF ⁽¹⁹⁾. Em outro estudo com materiais semelhantes fissurados, também foram observadas reduções na carga elétrica passante após 28 dias ⁽²⁰⁾.

Em alguns casos também foram utilizadas combinações de EAF com pozolanas para potencializar a ação autocicatrizante. Em um estudo foram observadas reduções na carga elétrica passante de materiais com EAF e cinza volante após 90 dias ⁽²¹⁾. Por outro lado, outro estudo indicou não haver diferença entre a redução da carga elétrica passante em materiais cimentícios com e sem aditivos cristalizantes ⁽²²⁾.

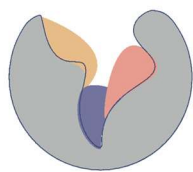
Apesar das reações diminuírem após 9 ciclos de condicionamento, as linhas de tendência indicam que a autocicatrização pode ocorrer em idades mais avançadas, mesmo para misturas sem EAF, fato que também já foi observado na literatura de referência da área ⁽¹⁾.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se com base nos resultados e na discussão que o ensaio de resistência à infiltração de íons cloreto pode ser utilizado para avaliar indiretamente a autocicatrização autógena. Além disso, observa-se que misturas com EAF possuem mais resistência a infiltração de íons cloreto, mesmo que o material esteja fissurado e em maiores idades. Por fim, conclui-se de forma indireta que houve autocicatrização nos materiais cimentícios com EAF ao serem submetidos a ciclos de molhagem e secagem por períodos de tempo prolongados.

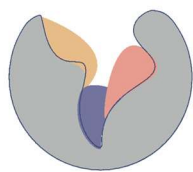
AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa durante a período do mestrado.

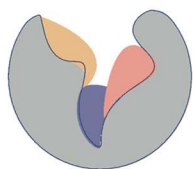


REFERÊNCIAS

1. NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
2. DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. 2013.
3. DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; AL-TABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T.; LITINA, C.; MILJEVIC, B.; OTLEWSKA, A.; RANOGAJEC, J.; ROIG-FLORES, M.; PAINE, K.; LUKOWSKI, P.; SERNA, P.; TULLIANI, J.-M.; VUCETIC, S.; WANG, J.; JONKERS, H. M. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.
4. SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Effect of exposure conditions on self-healing behaviour of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 217-224, 2013.
5. TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 233-247, 2015.
6. ZAKARI, N. M.; SHAFAGHAT, A.; KEYVANFAR, A.; ABD. MAJID, M. Z.; GHOSHAL, S. K.; MOHAMMADYAN YASOUJ, S. E.; GANIYU, A. A.; SAMADI KOUCHAKSARAEI, M.; KAMYAB, H.; TAHERI, M. M.; REZAZADEH SHIRDAR, M.; MCCAFFER, R. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1123-1132, 2016.
7. WANG, H.-L.; DAI, J.-G.; SUN, X.-Y.; ZHANG, X.-L. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 216-225, 2016.
8. VAN BELLEGHEM, B.; VAN DEN HEEDE, P.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Quantification of the Service Life Extension and Environmental Benefit of Chloride Exposed Self-Healing Concrete. **Materials**, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2017.
9. SARKAR, M.; CHOWDHURY, T.; CHATTOPADHYAY, B.; GACHHUI, R.; MANDAL, S. Autonomous bioremediation of a microbial protein (bioremediase) in Pozzolana cementitious composite. **Journal of Materials Science**, v. 49, n. 13, p. 4461-4468, 2014.
10. SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T. K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 89-101, 2013.
11. ŞAHMARAN, M. Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 22, p. 9131-9136, 2007.



12. MAES, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 528-537, 2014.
13. MAES, M.; SNOECK, D.; DE BELIE, N. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 114-124, 2016.
14. JI, Y.; HU, Y.; ZHANG, L.; BAO, Z. Laboratory studies on influence of transverse cracking on chloride-induced corrosion rate in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 69, p. 28-37, 2016.
15. CHAHAL, N.; SIDDIQUE, R.; RAJOR, A. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 351-356, 2012.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
17. DEIMLING, K. A. S. **Avaliação da Influência da Escória de Alto Forno no Potencial da Autocicatrização Autógena em Materiais Cimentícios**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.
18. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken: ASTM, 2019.
19. DARQUENNES, A.; OLIVIER, K.; BENBOUDJEMA, F.; GAGNÉ, R. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 1017-1028, 2016.
20. TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno Ativados por Catalisador Cristalino**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.
21. YILDIRIM, G.; KHIAMI, A. H.; YEŞILMEN, S.; ŞAHMARAN, M. Self-healing performance of aged cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 172-186, 2018.
22. AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 17-31, 2019.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE AUTOCICATRIZANTE DE CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO Forno QUANTO AO POTENCIAL DE CORROSÃO POR CLORETOS

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.25>

Gabrieli Lazzari Vieira

Email: gabilazzarivieira@gmail.com

Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Email: dmolin@ufrgs.br

Júlia da Rosa Costa

Email: juliadarcosta@hotmail.com

Angela Borges Masuero

Email: angela.masuero@ufrgs.br

RESUMO

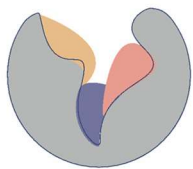
A corrosão por cloretos é um dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, sendo responsável por comprometer sua durabilidade e vida útil. Neste sentido, a autocicatrização pode ser uma solução para esta problemática. O objetivo desse trabalho é avaliar a corrosão por cloretos em concretos de referência e com escória de alto forno através do ensaio de potencial elétrico. Para isso, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem em solução de cloretos em condições controladas de laboratório. Diferente do esperado, a escória de alto forno não foi capaz de melhorar as propriedades do concreto.

Palavras-chaves: concreto, autocicatrização, escória de alto forno, cloretos, corrosão.

ABSTRACT

Chloride corrosion is one of the main mechanisms of deterioration of concrete structures, being responsible for compromising their durability and service life. In this sense, self-healing can be a solution to this problem. The objective of this study is to evaluate chloride corrosion in reference concretes and with blast furnace slag through the electric potential test. For this purpose, the test specimens were subjected to wetting and drying cycles in chloride solution under controlled laboratory conditions. Contrary to expectations, the blast furnace slag was not able to improve the properties of the concrete.

Palavras-chaves: concrete, self-healing, blast furnace slag, chlorides, corrosion.



1. INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo ⁽¹⁾, isso se deve à abundância de seus componentes e à sua versatilidade de uso. O cimento Portland, devido à sua capacidade aglomerante quando em contato com a água, é o componente principal na fabricação de concreto convencional ⁽²⁾.

Um grande desafio das matrizes cimentícias é a formação de fissuras ⁽³⁾, que podem estar relacionadas a fatores mecânicos, químicos e ambientais ⁽⁴⁾. As fissuras, por serem descontinuidades na matriz, facilitam a entrada de substâncias prejudiciais e aceleram a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado ⁽⁵⁾. Isso resulta na redução da vida útil das edificações e na necessidade precoce de manutenção ^{(6) (7)}.

Uma das abordagens para mitigar fissuras é o fenômeno de autocicatrização, que se refere ao processo de preenchimento ou selagem de fissuras que ocorre automaticamente na matriz cimentícia, sem intervenção externa ⁽⁸⁾. Sendo assim, uma alternativa para evitar grande parte dos trabalhos manuais de reparação de estruturas de concreto armado. Desta forma, as fissuras seriam reparadas no momento do seu aparecimento e seriam reduzidos os problemas de durabilidade relacionados a entrada de agentes agressivos por meio delas ⁽⁹⁾.

O processo de autocicatrização do concreto é dividido em duas classificações, com base em seu mecanismo de cura, chamado de cura autógena e autônoma ⁽¹⁰⁾. Nesse estudo é usado escória de alto forno, que é um tipo de cura autógena, que segundo Rooij et. al ⁽⁸⁾ é intrinsecamente ativada sem nenhuma operação externa. Nesse trabalho, concreto de referência e com escória de alto forno serão submetidos ao ensaio de potencial de corrosão por cloretos. Assim, o objetivo dessa pesquisa é prover resultados para verificar a eficiência da autocicatrização de concretos na corrosão de armaduras.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

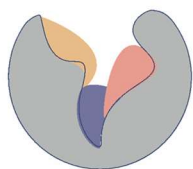
Esta seção apresenta a descrição dos materiais e da metodologia utilizados, com o propósito de detalhar o desenvolvimento do estudo. Este trabalho faz parte de um grupo de estudos sobre autocicatrização em materiais cimentícios. A caracterização detalhada dos materiais utilizados pode ser encontrada em Costa (2024) ⁽¹¹⁾.

2.1 Materiais

A seguir os materiais utilizados no experimento são apresentados e caracterizados.

2.1.1 Agregados

Por conta das dimensões dos corpos de prova e pela presença de barras de aço, optou-se por utilizar um agregado graúdo de menores dimensões. Dessa forma, foi usada uma brita basáltica com granulometria entre 4,75 e 12,5mm (NBR 17054:2022) ⁽¹²⁾. O agregado miúdo selecionado foi uma areia quartzolítica média, com distribuição granulométrica de 0,15 e 4,75mm (NBR 17054:2022) ⁽¹²⁾.



2.1.2 Cimento

Foi utilizado um cimento CPV ARI para o trabalho, uma vez que ele não possui adições quimicamente ativas, de forma a não afetar no desempenho da escória de alto forno. Esse cimento tem diâmetro médio de 12 μm e massa específica de 3,01g/cm³ (NBR 16605:2017)⁽¹³⁾.

2.1.3 Aditivo Superplastificante

Em ambos concretos foi usado aditivo superplastificante, afim de padronizar o abatimento dos mesmos. Este aditivo tem base de éter policarboxílico, de acordo com dados do fabricante.

2.1.4 Escória de alto forno

A escória de alto foi usada substituindo 75% da massa do cimento. O diâmetro médio encontrado para a escória foi de 13,36 μm , bem próximo ao do cimento utilizado. Quanto a massa específica, foi encontrado um valor de 1,12g/cm³ segundo NBR 16605:2017⁽¹³⁾.

Ao analisar a caracterização química do material, obtida através de ensaios de Difração de raios-X e de fluorescência de raios X, percebeu-se que este material possui cerca de 45% de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, o que indica que pode vir a ocorrer atividade pozolânica. Além disso, se observou que o material é totalmente amorfo, o que torna ele bastante reativo.

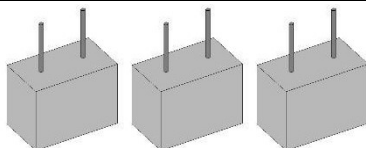
2.2 Métodos

Nesta seção, estão explicados os métodos de moldagem, fissuração e ensaios realizados no programa experimental.

2.2.1 Moldagem dos corpos de prova

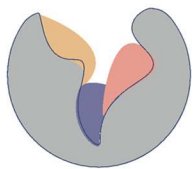
A Tabela 1 apresenta os corpos de prova utilizados no estudo.

Tabela 1 – Corpos de prova utilizados no experimento

Avaliação da autocicatrização dos concretos	
Análise do potencial de corrosão por cloretos Ensaio de potencial elétrico CP's prismáticos com barra de aço 75x100x150mm	

Quanto às informações referentes à moldagem, o concreto referência apresentou abatimento de 145mm e foi usado 0,067% da massa de cimento de aditivo superplastificante neste concreto. No concreto com escória de alto forno, foi utilizado 0,109% da massa de cimento de aditivo superplastificante e o abatimento encontrado foi de 190mm.

A cura, fissuração e cicatrização dos concretos também foi feita de acordo com o trabalho de Costa (2024)⁽¹¹⁾.



2.2.2 Ensaios realizados

a) Ensaio de potencial de corrosão

Há diversas técnicas de monitoramento da corrosão, entre as quais o potencial de circuito aberto (PCA) se destaca como uma das mais utilizadas, devido ao seu caráter não destrutivo e à simplicidade dos equipamentos necessários. Os resultados da técnica são obtidos medindo a diferença de potencial entre o eletrólito (aço/concreto) e o eletrodo de referência. Ocorre a passagem de corrente das regiões anódicas para as catódicas e o eletrodo de referência possui a capacidade de identificar a presença dessas linhas de corrente. Assim, quanto mais negativos os potenciais encontrados durante as medições, maior a probabilidade da corrosão estar ocorrendo ⁽¹⁴⁾.

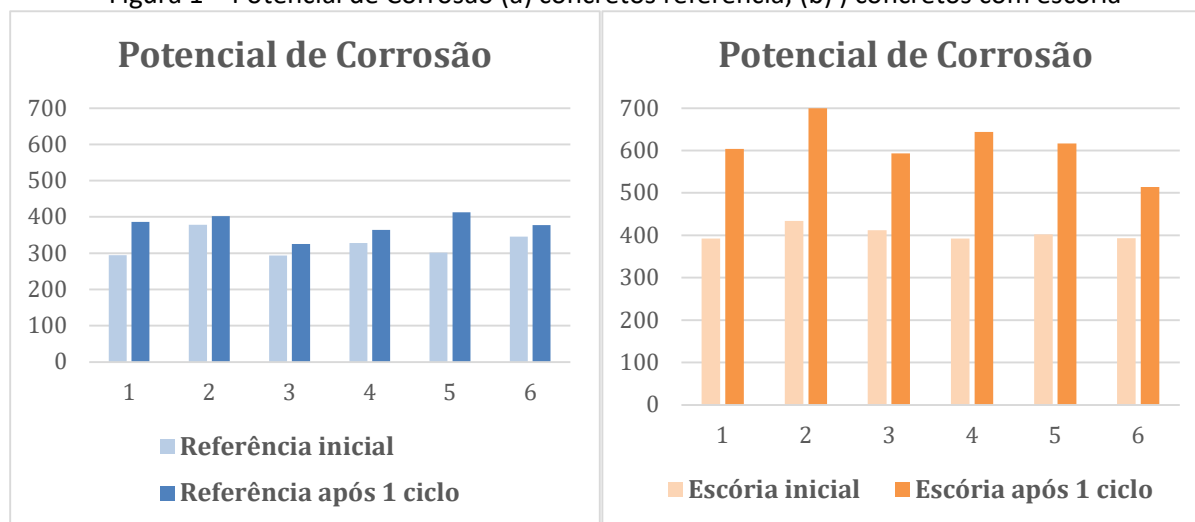
Neste estudo, foi utilizado o potenciostato Autolab em conjunto com o software Nova 2.1 para se obter as medidas. A aceleração da corrosão por ação de íons cloretos foi a realizada através de ciclos de molhagem e secagem conforme estudos anteriores ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾. A idade estabelecida para a realização das primeiras medidas eletroquímicas foi de 89 dias após a abertura de fissuras, as quais foram feitas antes da realização da aceleração por íons cloretos. Foi realizada nova leitura após as amostras serem submetidas a um ciclo completo de molhagem e secagem.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio de potencial de corrosão

Os resultados são apresentados na Figura 1 e Tabela 2.

Figura 1 – Potencial de Corrosão (a) concretos referência; (b) concretos com escória



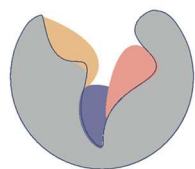


Tabela 2 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão

Concreto	Antes da exposição à cloretos				Após 1 ciclo de exposição à cloretos			
	PCA para Eletrodo de Cu/CuSO ₄ (mV)	Média (mV)	Coeficiente de variação	Desvio Padrão	PCA para Eletrodo de Cu/CuSO ₄ (mV)	Média (mV)	Coeficiente de variação	Desvio Padrão
Referência	-294,09	-323,49	0,0957	0,0309	-385,84	-378,01	0,0748	0,0282
	-378,57				-402,09			
	-293,68				-325,52			
	-327,97				-364,23			
	-301,50				-412,83			
	-345,17				-377,59			
Escória	-391,98	-404,10	0,0369	0,0149	-603,40	-611,90	0,0917	0,0561
	-433,47				-700,35			
	-411,63				-593,47			
	-392,26				-643,90			
	-402,42				-616,53			
	-392,86				-513,80			

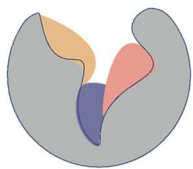
A norma ASTM C876⁽¹⁷⁾ define uma correlação entre os intervalos de potenciais e a probabilidade de ocorrência de corrosão, utilizando o eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA

Probabilidade de corrosão	PCA para Eletrodo de Cu/CuSO ₄	Estado da Corrosão
< 10%	PCA > -200 mV	Passivo
Incerta	350 mV < PCA < -200 mV	Incerto
> 90%	PCA < -350 mV	Ativo

Fonte: ASTM (2015) ⁽¹⁷⁾

Com base nos resultados dipostos (Tabela 2 e Figura 1) é possível observar que os valores para o concreto referência antes da exposição de cloretos estão na faixa de probabilidade de ocorrência de corrosão incerta, com estado de corrosão também incerto. Já depois de um



ciclo de exposição à cloretos, o valor médio de PCA passa para a classificação >90% de possibilidade de corrosão e estado de corrosão ativo.

O concreto com escória de alto forno, já apresentou na leitura inicial, e se manteve após o primeiro ciclo, >90% de possibilidade de corrosão e estado de corrosão ativo. Sendo, que após o primeiro ciclo de molhagem e secagem os valores de PCA foram significativamente mais negativos. É esperado que a substituição de 75% de cimento por escória de alto forno aumente a probabilidade de corrosão, visto que a escória de alto forno demora mais tempo para reagir que o clínquer. Isso faz com que o concreto se torne mais poroso e menos resistente, já que menos produtos foram formados na hidratação do concreto. Sendo assim, fica mais fácil que os agentes agressivos, como os cloretos, penetrem no material e facilitem a corrosão das armaduras.

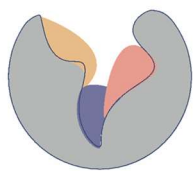
Babu et al. ⁽¹⁸⁾ destacam que a escória de alto-forno é um material com potencial pozolânico, sendo utilizada como um agente cimentante. Da mesma forma, Atiş et al. ⁽¹⁹⁾ classificam a escória de alto-forno como um material com propriedades hidráulicas. Assim, a escória de alto-forno apresenta capacidade de formar C-S-H, similar às pozolanas, embora esse processo ocorra de forma significativamente mais lenta. Possivelmente, devido a esse comportamento, neste estudo não foi observada uma melhora tão expressiva nos concretos contendo escória de alto-forno, uma vez que a análise não considerou um período prolongado.

Choi e Park (2019) ⁽²⁰⁾, investigaram o efeito da escória de alto forno na autocicatrização de concretos. Os resultados mostraram que o desempenho da autocicatrização de fissuras foi melhorado à medida que a taxa de substituição foi aumentada em até 30%. No estudo de Zeinali et al.(2019)⁽²¹⁾, o aumento no teor de escória até 45% aumentou a probabilidade de corrosão. No entanto, em qualquer caso, em todas as amostras contendo escória, o potencial de corrosão foi menor do que nas amostras de controle. Em comparação com os trabalhos citados, nesta pesquisa, a substituição de escória em um teor de 75% pode ter impactado negativamente a capacidade autocicatrizante do concreto, pois se trata de um valor relativamente elevado.

Tais resultados indicam que, nesse tempo de estudo, o fechamento pela autocicatrização, seja autônoma do próprio cimento, como avaliada no concreto referência, seja a observada pela escória de alto forno não estão impedindo a penetração de cloretos e a consequente corrosão das armaduras. Além disso, é importante ressaltar que a escória de alto forno, no tempo que foi acompanhado nesse estudo, não foi capaz de melhorar as propriedades do concreto. Apesar de o concreto referência já não apresentar bons resultados, o concreto com escória de alto forno teve resultados ainda inferiores, reforçando que a escória não foi capaz de reagir como esperado.

4. CONCLUSÕES

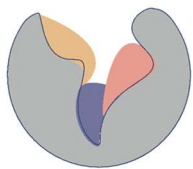
Neste estudo, verificou-se que, nas condições e no período analisados, tanto o concreto de referência quanto o concreto contendo escória de alto-forno não foram eficazes em impedir a penetração de cloretos e, consequentemente, a corrosão das armaduras. Ademais, é relevante destacar que, no intervalo de tempo considerado, a escória de alto-forno não demonstrou capacidade de melhorar as propriedades do concreto. Embora o concreto de



referência já apresentasse desempenho insatisfatório, o concreto com escória de alto-forno apresentou resultados inferiores, evidenciando que a escória não reagiu conforme o esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

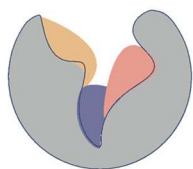
1. MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. **Towards sustainable concrete**. Nature Materials, v. 16, n. 7, p. 698–699, 2017.
2. SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. **Advances in understanding hydration of Portland cement**. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 38–56, 2015.
3. MOCH, Tiago. **Interface esquadria/alvenaria e seu entorno: análise das manifestações patológicas típicas e propostas de soluções**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
4. SILVA, Lucília Maria Bernardino da. **Desenvolvimento de um sistema especialista para diagnóstico de fissuras em concreto armado**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.
5. ERSAN, Y.; GRUYAERT, E.; LOUIS, G.; LORS, C.; DE BELIE, N.; BOON, N. **Self-protected nitrate reducing culture for intrinsic repair of concrete cracks**. Frontiers in Microbiology, v. 6, 2015.
6. DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; AL-TABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.
7. VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. **Self-Healing in Cementitious Materials—A Review**. Materials, v. 6, n. 6, 2013.
8. ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art**. Report of RILEM Technical Committee, 2013.
9. ROIG-FLORES, M.; FORMAGINI, S.; SERNA, P. **Self-healing concrete-What Is it Good For?** Materiales de Construcción, v. 71, n. 341, p. e237, 9 mar. 2021.
10. MIHASHI, H. NISHIWAKI, T. **Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report**. Journal Of Advanced Concrete Technology, v. 10, n. 5, p. 170-184, 16 jun. 2012.
11. COSTA, J. R. **Análise comparativa de diferentes agentes de autocicatrização em concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2024.
12. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 17054: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da umidade**. Rio de Janeiro, 2023.



1º SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

13. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.
14. CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.
15. BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 236p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.
16. VIEIRA, F. M. P. **Contribuição do estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre, 243p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, 2003.
17. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C876 - 15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete** Annual Book of ASTM Standards Philadelphia, 2015.
18. BABU, K. G.; RAO, G. D. N. **Efficiency of fly ash in concrete with age**. Cement and Concrete Research, Elsevier Science (ed). V. 26, p. 465-474, 1996.
19. ATIŞ, C. D; BILIM, C. **Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag**. Building and Environment, v. 42, p. 3060-3065, 2007.
20. CHOI, Y. C.; PARK, B. **Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars**. Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 4, 2019.
21. ZEINALI, F.; AHMADI, J.; RAHMANI, H. **Self-healing capacity assessment of cracked slag modified concrete under different re-curing conditions**. Construction and Building Materials. Volume 385, 2023



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

CINZA DE CASCA DE ARROZ: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.26>

Júnior Keller

Email: jnrkeller@gmail.com

Francieli Tiecher

Email: francieli.bonsembiante@atitus.edu.br

RESUMO

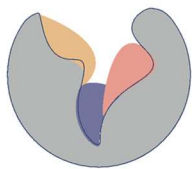
A cinza da casca de arroz é uma adição mineral largamente estudada e, dependendo das suas condições de obtenção, possui propriedades pozolânicas, o que significa que ela pode reagir com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento Portland, formando compostos adicionais de alta resistência que contribuem para a autocicatrização do concreto, favorecendo a reparação natural de fissuras. O objetivo desta pesquisa é analisar a capacidade de autocicatrização de concretos produzidos com o uso de cinza de casca de arroz. Foram estudados dois teores de cinza, 7,5 e 15%. A avaliação da autocicatrização dos concretos foi realizada a partir da resistência à compressão de concretos sãos e fissurados, a partir de um pré-carregamento. Os concretos ficaram expostos a ciclos de submersos e secos até a idade de 140 dias. Os resultados apontaram que a reação pozolânica foi mais intensa no traço 15CCA resultando em um ganho de resistência mais rápido em comparação aos REF. Já o traço com 7,5% apresentou evolução mais lenta, com o efeito do pré-carregamento sendo mais evidente em idades avançadas devido ao aumento gradual da atividade pozolânica.

Palavras-chaves: cinza da casca de arroz, hidratação do cimento, autocicatrização.

ABSTRACT

Rice husk ash is a widely studied mineral admixture that, depending on its production conditions, exhibits pozzolanic properties. This means it can react with calcium hydroxide resulting from the hydration of Portland cement, forming additional high-strength compounds that contribute to the self-healing of concrete, facilitating the natural repair of cracks. The objective of this research is to analyze the self-healing capacity of concrete produced with rice husk ash. Two ash contents were studied: 7.5% and 15%. The evaluation of the concretes' self-healing was carried out through the compressive strength of intact and pre-cracked concretes. The concretes were exposed to wetting and drying cycles up to the age of 140 days. The results showed that the pozzolanic reaction was more intense in the 15% RHA mix, resulting in faster strength gain compared to the reference concrete. Meanwhile, the 7.5% mix exhibited slower development, with the effect of pre-loading becoming more evident at later ages due to the gradual increase in pozzolanic activity.

Palavras-chaves: rice husk ash, cement hydration, self-healing.



1. INTRODUÇÃO

Obtida a partir da queima da casca do arroz, que é um subproduto da indústria agrícola, a cinza da casca d arroz (CCA) torna -se atrativa devido às suas propriedades físicas e químicas que podem contribuir para a formação de produtos de autocicatrização.

Para diversos autores ^(3,4,10), a temperatura e a duração do processo de queima governam a reatividade dessa adição, podendo existir em duas formas: sílica amorfa ou sílica cristalina. A sílica amorfa é reativa e adequada para ser utilizada como pozolana, substituindo parte do cimento Portland. Pode ser obtida através da queima da casca de arroz a temperaturas inferiores a 700°C.

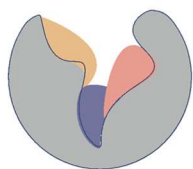
A atividade pozolânica da CCA é caracterizada pela capacidade da sílica amorfa, presente em misturas com cimento ou cal, de se solubilizar em meio alcalino. Essa sílica amorfa reage em solução com os íons de cálcio liberados durante as reações de hidratação do cimento, formando compostos estáveis, como os silicatos e aluminatos de cálcio, que possuem propriedades aglomerantes. Dessa forma, quanto maior a quantidade de sílica amorfa presente na CCA, maior será a possibilidade de obter melhorias na resistência ⁽⁹⁾.

Vários estudos investigaram a integração da CCA no concreto com o objetivo de reduzir a quantidade de cimento e avaliar os impactos na resistência à compressão. A substituição parcial do cimento pela CCA tem o potencial de melhorar a resistência à compressão do concreto, sendo que a porcentagem ideal para alcançar essa melhoria foi identificada entre 10% e 30%. Por exemplo, verificou-se que a substituição de 15% do cimento por CCA é a quantidade ideal para alcançar a maior resistência, enquanto reduções na resistência foram observadas em teores superiores a 15%. Além disso, o aumento da resistência à compressão e a redução da permeabilidade do concreto com CCA podem ser atribuídos à menor porosidade, à baixa concentração de hidróxido de cálcio e ao espaço reduzido da zona interfacial entre o agregado e a pasta. O crescimento adicional de gel C-S-H no concreto com CCA, resultante da reação química entre o hidróxido de cálcio e a cinza durante o processo de hidratação, também contribui para melhorar as qualidades do concreto ^(7,16).

Conforme relatado por diversos estudos, o concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) apresentou maior resistência à compressão em comparação ao concreto convencional aos 91 dias ⁽¹¹⁾. Além disso, o impacto do efeito filler também pode justificar o aumento da resistência dos concretos contendo CCA.

Estudos sobre as propriedades de durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz (CCA) mostraram que a menor permeabilidade aos cloretos e a maior resistividade elétrica foram obtidos substituindo o cimento por 10% a 15% de CCA ^(13,5). Adicionalmente, pesquisas combinaram a substituição do cimento por CCA com 10% de CaCO₃, indicando uma queda na resistência, como já era esperado, mas demonstrando grande potencial de cicatrização nas misturas ⁽⁶⁾.

Quanto à autocicatrização, resultados satisfatórios foram obtidos ao estudar os efeitos da cinza de casca de arroz (CCA) no concreto ⁽⁸⁾. O melhor empacotamento de partículas e a formação de gel C-S-H presente nos poros e fissuras podem contribuir para a melhoria da



durabilidade do concreto. Além disso, verificou-se que o conteúdo de sílica amorfa presente na CCA era suficiente para formar o gel C-S-H secundário por meio da reação pozolânica ⁽⁸⁾.

No entanto, é importante ressaltar que os resultados dos estudos podem variar dependendo das proporções e características específicas da cinza de casca de arroz utilizada, bem como das condições de cura e ambientais do concreto. Sendo assim é preciso avaliar adequadamente o desempenho da cinza de casca de arroz como adição para autocicatrização em diferentes aplicações e condições.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada nesse trabalho tem a finalidade de analisar o desempenho mecânico de concretos de referência e pré-fissurados dosados com 7,5 e 15% de CCA, em substituição ao cimento Portland, frente ao fenômeno da autocicatrização autógena, ao longo de 140 dias.

Takagi (2013), Van Tittelboom (2013) e Capellesso (2018) afirmam que a água promove e intensifica a autocicatrização de materiais cimentícios ^(14,15,2). Diante disso, optou-se por submeter as amostras a ciclos submersos e úmidos. Para essa pesquisa as amostras foram expostas a ciclos consecutivos, onde permaneceram 7 dias submersas em água potável, proveniente da rede pública, e 14 dias em temperatura ambiente e umidade controlada de 85±5%.

3. MATERIAIS

3.1 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI, escolhido por não possuir adições pozolânicas, permitindo a avaliação da influência da adição escolhida para o estudo.

3.2 Agregado miúdo

A Tabela 1 mostra as propriedades físicas da areia utilizada.

Tabela 1 – Propriedades físicas da areia utilizada

Módulo de finura	2,12
Dimensão máxima	4,75mm
Massa específica	2,95 g/cm ³
Absorção de água	1,11%

Fonte: Dados do fabricante (2023).

3.3 Cinza da casca de arroz (CCA)

A massa específica da CCA empregada nas misturas é 2.250 kg/m³ e sua composição química esta apresentada na Tabela 2.

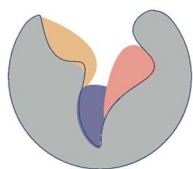


Tabela 2 – Composição química da CCA

Componente	Porcentagem em massa (%)
SiO ₂	89,41
Al ₂ O ₃	-
Fe ₂ O ₃	0,07
CaO	1,04
SO ₃	1,41
MnO	0,52
K ₂ O	2,34
SrO	-
TiO ₂	-
Perda ao fogo	5,9

Fonte: Dados do fabricante (2023).

Abood Habeeb e Bin Mahmud (2010) estudaram as propriedades da cinza de casca de arroz e seus usos como material de substituição de cimento ⁽¹⁾. A cinza do estudo tinha um percentual de SiO₂ de 88,32% valor bem próximo ao estudo em questão. O concreto proporcionou excelente melhoria na resistência para substituição de 10% (incremento de 30,8% em comparação com a mistura de controle), e até 20% do cimento poderia ser substituído de forma valiosa por CCA sem afetar adversamente a resistência. Portanto, a maior quantidade de sílica amorfa na CCA pode resultar na melhoria das propriedades do concreto em termos de resistência e durabilidade ao longo do tempo.

3.4 Agregado graúdo

Foi possível classificar o agregado graúdo na faixa que compreende aos tamanhos de grão mínimo de 6,3 mm e máximo de 19 mm. A distribuição granulométrica contida nesse intervalo é conhecida comercialmente pelo termo “brita 1”.

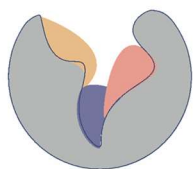
3.5 Água

A água empregada na mistura foi proveniente do sistema de abastecimento da Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN), da cidade de Passo Fundo - RS.

4. MÉTODOS

4.1 Produção dos concretos e moldagem dos corpos de provas

Para a confecção dos concretos foi empregado o traço unitário de 1:2,36:2,64 (aglomerante:areia:brita), em massa, e relação água/aglomerante de 0,5 (o ponto de partida foi um traço médio 1:5 - aglomerante:agregado, com teor de argamassa de 56%). Como forma de maximizar o processo de colmatação autógena dos concretos foram avaliados os teores de 7,5% e 15% de adição pozolânica, que no estudo foi a CCA, em substituição parcial ao cimento Portland tendo sido denominadas 7,5CCA e 15CCA.



4.2 Cura

Após 24h da concretagem foi realizada a desforma dos CP's de concreto, que foram devidamente identificados e alocados em um reservatório onde ficaram submersos em água durante 28 dias. Após 28 dias de cura, os concretos passaram pelo processo de pré-carregamento e fissuração, e em seguida deu-se início ao ciclo submerso e úmido, juntamente com os concretos de referência, que não passaram pelo pré-carregamento.

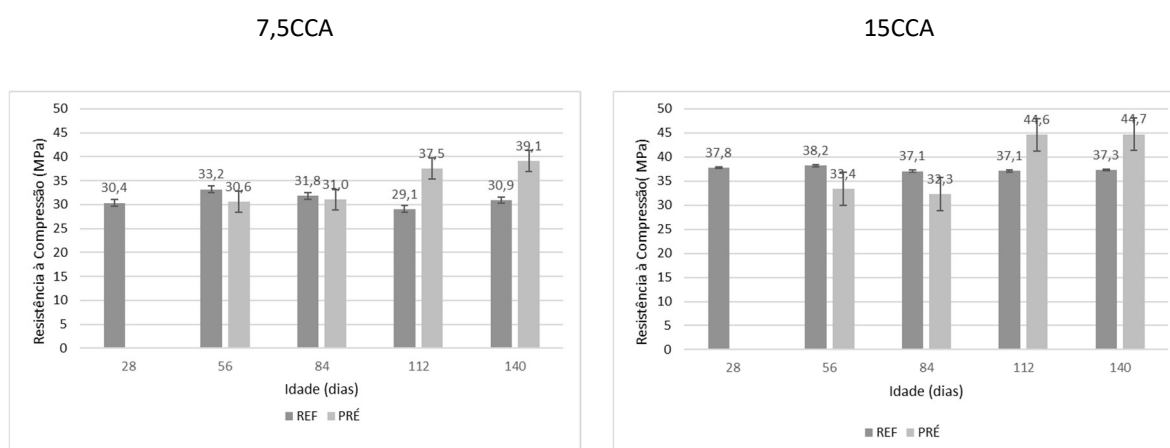
4.3 Processo de pré-carregamento e fissuração

A fissuração dos corpos de prova cilíndricos foi realizada através da aplicação de carregamento à compressão. Estipulou-se que a carga a ser aplicada seria aquela correspondente à 30% da resistência média à compressão dos concretos aos 28 dias. Iniciou-se então o período de ciclagem das amostras, onde permaneceram 7 dias submersos e 14 dias fora de imersão em umidade relativa de $85 \pm 5\%$ e temperatura ambiente, até as idades de realização dos ensaios propostos nesta pesquisa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

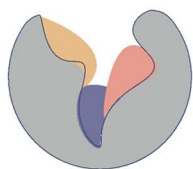
Ao observar os resultados apresentados na Figura 1 nota-se que os concretos pré-carregados apresentaram resistências à compressão superiores para ambos os traços.

Figura 1 – Resistência à compressão



Fonte: Autor (2024).

Também são superiores as resistências dos concretos 7,5CCA, o que pode ser corroborado pela Tabela 3, que mostra que tanto o traço quanto o carregamento influenciam significativamente nos resultados. A ANOVA também mostra que há influência significativa da idade nas resistências, ou seja, há crescimento significativo da resistência à compressão ao longo do tempo. Na mistura pré-carregada 7,5CCA as resistências aos 56 e aos 84 dias são praticamente iguais, havendo aumento de 16,2% entre 84 e 112 dias e um pequeno decréscimo de 2,7% entre 112 e 140 dias. Já a mistura pré-carregada 15CCA apresentou



aumento de resistência ao longo de todas as idades, e entre 56 e 140 dias o aumento foi de 10,1%.

Tabela 3 – ANOVA para resistência à compressão

Efeito Compressão	SQ	GL	MQ	F	p	Signif.
Traço	42,15	1	42,15	4,204	0,048585	S
Carregamento	139,47	1	139,47	13,912	0,000743	S
Idade	205,74	3	68,58	6,841	0,001087	S
Traço*Carregamento	2,70	1	2,70	0,269	0,001087	NS
Traço*Idade	8,92	3	2,97	0,296	0,607491	NS
Carregamento*Idade	8,67	3	2,89	0,288	0,827649	NS
Traço*Carregamento*Idade	14,99	3	5	0,498	0,833437	NS
Erro	320,81	32	10,03		0,686048	

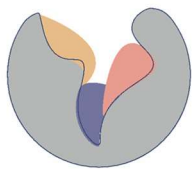
SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade, MQ: média dos quadrados, F: FisherSnedecor, P: probabilidade S: significativa, NS: não significativa

Fonte: Autor (2024).

O comportamento diferenciado observado pode ser atribuído a diversos fatores. Um deles é a concentração de cinza da casca de arroz (CCA) em cada traço, que pode influenciar a atividade pozolânica e, conseqüentemente, a resistência à compressão. O traço 15CCA, com maior teor de CCA, pode ter apresentado uma reação pozolânica mais intensa, levando a uma maior diferença nas primeiras idades.

O estudo de Abood e Mahmud (2010) mostra que o teor de 5% de CCA não foi adequado para aumentar significativamente a resistência nas primeiras idades, o que, de acordo com os autores ⁽¹⁾, ocorreu porque a sílica disponível a partir da adição de 5% de CCA reagiu com apenas uma pequena porção de portlandita liberada no processo de hidratação e, portanto, o C-S-H liberado na reação pozolânica foi relativamente limitado. Os autores verificaram que em misturas com até 10% de CCA a resistência foi superior; ao substituir por 15% os resultados da resistência a compressão foram semelhantes aos encontrados para 5%. A partir das análises realizadas, o comportamento foi justificado pela quantidade de sílica disponível na matriz do concreto hidratado, que provavelmente é muito alta, bem como pela insuficiente quantidade de portlandita disponível para reagir.

Fatores relacionados ao pré-carregamento, como a magnitude e a duração do carregamento aplicado, bem como as condições de exposição, podem interferir, afetando a resposta mecânica ao longo do tempo de misturas contendo adições pozolânicas. Por exemplo, o pré-carregamento pode acelerar a reação pozolânica mais em um traço do que no outro, conforme o trabalho de Sahmaran e Li (2008) ⁽¹²⁾. Além disso, outras características dos materiais constituintes, como a distribuição granulométrica da CCA, a relação água/cimento e as condições de cura desempenham papéis importantes no comportamento dos concretos ⁽¹⁰⁾.

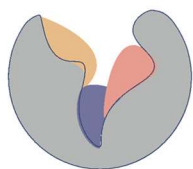


6. CONCLUSÕES

Em relação à presença de cinza de casca de arroz nos concretos, verificou-se que o traço com 15% da adição inicialmente apresentou maior diferença na resistência à compressão em relação ao concreto de referência, sendo esta redução mantida até 84 dias, quando o comportamento se inverteu e os concretos contendo 7,5% de cinza de casca de arroz fissurados apresentaram maiores diferenças em relação aos de referência. O comportamento diferenciado observado pode ser atribuído a uma reação pozolânica mais intensa nas idades iniciais para o traço com maior teor de cinza, resultando em um ganho de resistência mais acentuado. Já o traço contendo 7,5% da adição apresentou uma evolução mais lenta, e o efeito do pré-carregamento se tornou mais evidente em idades mais avançadas, devido ao aumento gradual da atividade pozolânica ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

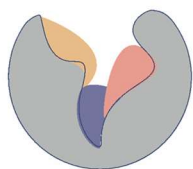
1. ABOOD HABEEB, G.; BIN MAHMUD, H. Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement **Materials Research**. v.13(2), p.185-190, 2010.
2. CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
3. CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 425–428, abr. 2005.
4. CORDEIRO, G. C. Cement & Concrete Composites Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 529–534, 2011.
5. DE SENSALÉ, G.R. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials, **Cem. Concr. Compos.** V. 32, p. 718–725, 2010.
6. EKAPUTRI, J. J.; ALRIZAL, F. F.; HUSEIN, I.; TRIWULAN; ABDULLAH, M. M. A. B. **An application of Rice husk ash (RHA) and calcium carbonate (CaCO₃) as material for self-healing cement**: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd. p. 03–12, 2016.
7. GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1675–1683, ago. 2008.
8. KANTHE, V.; DEO, S.; MURMU, M. Effect on Autogenous Healing in Concrete by Fly Ash and Rice Husk Ash. **Iranian Journal of Energy and Environment**, v. 10, n. 2, 2019.
9. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, p. 01-02, 1994.
10. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

11. RODRÍGUEZ DE SENSALÉ, G. Strength development of concrete with rice-husk ash, *Cem. Concr. Compos.* V. 28, p. 158–160, 2006.
12. ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 2, p. 72–81, fev. 2008.
13. SARASWATHY, V.; SONG, H. W.; Corrosion performance of rice husk ash blended concrete, *Constr. Build. Mater.* V. 21, p. 1779–1784, 2007.
14. TAKAGI, EMILIO MINORU. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2013.
15. VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.
16. ZHANG, W.; WANG, D.; HAN, B. Self-healing concrete-based composites. **Self-Healing Composite Materials: From Design to Applications.** Elsevier, p. 259–284, 2019.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

POTENCIAL DE CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

DOI: <https://doi.org/10.54236/sibracic.2025.27>

Enilda Maria da Silva Garcia de Freitas

Email: enilda.freitas@ufms.br

Sidiclei Formagini

Email: sidiclei.fromagini@ufms.br

RESUMO

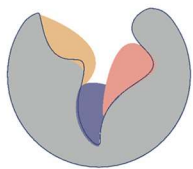
A cicatrização é denominada autógena quando ocorre por processo natural no concreto. Objetivo foi avaliar o efeito da cicatrização de forma autógena de fissuras em concreto de classe C30 com escória de alto-forno. Realizaram testes de percolação de água e análise visual para avaliar índices de cicatrização (I_c). A espessura inicial da fissura predominou no I_c e o ensaio de percolação de água foi primordial no desempenho na cicatrização de fissuras. Portanto os resultados colaboraram no entendimento da cicatrização autógenas em fissuras e identificou os limites das espessuras de fissuras com base no tempo e na de cura em água.

Palavras-chaves: cicatrização autógena, índice de cicatrização, teste de percolação de água, cura em água.

ABSTRACT

Healing is called autogenous when it occurs naturally in the concrete. The objective was to evaluate the effect of autogenous healing of cracks in a C30 concrete containing blast-furnace slag. Water percolation tests and visual analysis were carried out to assess the healing indices (IC). The initial thickness of the crack predominated in the IC and the water percolation test was paramount in the performance of crack healing. The results therefore contribute to the understanding of autogenous crack healing and identify the limits of crack thickness based on time and water curing.

Palavras-chaves: autogenic healing, healing index, water percolation test, water healing.



1. INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios compõem um dos grupos mais utilizados na cadeia produtiva da construção civil, pois possuem características como praticidade produtiva, adaptabilidade a várias fôrmas e formatos e o bom desempenho físico-mecânico.

As principais pesquisas buscam desenvolver compósitos cimentícios que permitam a redução de manifestação patológica, principalmente a fissuração na matriz cimentícia. A fissuração é uma manifestação patológica que afeta as estruturas de concretos, que compromete a durabilidade, pois uma vez acometida torna-se a porta de entrada de agentes agressores (HUANG et al., 2016)⁽¹⁾. Consequentemente, afetam a segurança, a estanqueidade dos elementos e comprometendo também a estética da peça.

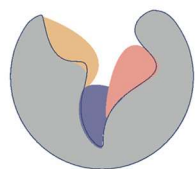
A cicatrização é a capacidade do concreto fechar parcialmente ou totalmente suas próprias fissuras, através da interação da água com a matriz cimentícia (SANTOS; FORMAGINI, 2023; TAKAGI, 2013)^(2,3). A cicatrização autógena é dada como um processo natural do concreto. Os mecanismos mais importantes envolvidos neste processo são a hidratação contínua dos compostos do clínquer e a carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), possibilitando com que as fissuras cicatrizem ao longo do tempo. Entretanto, a cicatrização autônoma acontece por meio de reações de um agente específico, como uso de adições minerais que são adicionadas intencionalmente na mistura do concreto para promover a autocicatrização (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013)⁽⁴⁾.

Muitos estudos se concentram exclusivamente no fechamento superficial das fissuras, no entanto, informações sobre como as fissuras cicatrizam, incluindo as alterações na permeabilidade à água, oferecem *insights* mais pertinentes para a durabilidade de uma estrutura (DOOSTKAMI et al., 2023)⁽⁵⁾. O ensaio de percolação de água tem sido utilizado por [?](DOOSTKAMI et al., 2022a, 2022b, 2023; LI; LI; XU, 2019; ROIG-FLORES et al., 2015; TANG; KARDANI; CUI, 2015; VIJAY; MURMU; DEO, 2017)^(6,7,8,9,10,11) como ferramenta de observação e avaliação da extensão de fissuras cicatrizadas.

O ensaio de percolação de água permite estimar como a formação e acumulação gradual de produtos de cicatrização nas fissuras reduzem o fluxo de água e a taxa de vedação das mesmas. Esses produtos preenchem os vazios das fissuras, diminuindo sua espessura e aumentando sua tortuosidade no plano, o que por sua vez reduz a capacidade de transmissão de água. Além disso, é possível estabelecer e analisar a relação quantitativa entre a geometria das fissuras e a eficácia da cicatrização com base na taxa de vedação determinada pelo teste de permeabilidade (HOU et al., 2022)⁽¹²⁾.

A cicatrização em materiais cimentícios tem como benefícios a extensão da vida útil das estruturas e a prevenção de reparos frequentes, resultando em maior durabilidade e redução dos custos de manutenção. Assim, a capacidade de cicatrização cimentícia em fissuras auxilia na extinção de etapas, como a entrada de agentes agressivos, a deterioração da estrutura e a execução de reparos (CAPPELLESSO, 2018)⁽¹³⁾.

A utilização de um material mais resistente, durável e que demanda menor quantidade de matérias-primas de alto consumo energético torna-se, uma opção mais sustentável. Portanto,



alternativas inovadoras na construção civil devem atender aos requisitos mínimos de durabilidade, desempenho térmico e físico-mecânico.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de cicatrização autógeno de fissuras com abertura de até 0,300 mm, em discos de concreto pré-fissurados e curados em água, por meio de ensaio de percolação de água sob baixa pressão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Composição e Amostragem do Concreto

O traço do concreto (Tabela 1) foi elaborado com Cimento Portland CII-F40, escória moída de alto forno (90% das partículas menores que 0,042 mm), areia fina natural (módulo de finura 1,16 e $D_{máx}$ = 0,600 mm), brita 9,5/25 de origem basáltica, aditivo químico redutor de água tipo RA1 e fibras de aço do tipo A-I com 60 mm de comprimento e 0,75 mm de diâmetro. A adição da fibra metálica na mistura foi utilizada para controlar e conservar as dimensões das fissuras, durante as etapas de fissuração e cura das amostras.

Tabela 1 – Materiais utilizados na mistura do concreto

(kg/m ³)	Cimento Portland	Escória de alto-forno	Areia fina	Brita 9,5/25	Fibra metálica	Aditivo (RA1)	Relação água/cimento	Abatimento (mm)	Resistência média, F_{cm28} (MPa)
C30	301	100	745	1146	34,9	2,5	0,56	130	36,31

Fonte: Autora (2024)

Foram moldados corpos de prova cilíndricos $\phi 100 \times 200$ mm de acordo com 5738 (ABNT, 2016)⁽¹⁴⁾. Os corpos de prova foram desmoldados com 24 horas de idade e mantidos em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa superior a 95%. Na idade de 6 dias, os corpos de prova cilíndricos foram seccionados em três partes iguais, formando amostragem com 11 discos de dimensão $\phi 100 \times 50$ mm.

2.2 Pré-fissuração e Determinação do Tamanho Inicial das Fissuras

Com 6 dias de idade, os discos foram pré-fissurados por compressão diametral, em uma prensa hidráulica, até formar uma fissura principal com abertura entre 0,100 mm a 0,300 mm. Em seguida, os discos foram identificados e marcados à caneta à prova de água em três pontos ao longo da fissura principal, em ambas as faces de corte, conforme descrito por Doostkami et al. (2022a, 2022b, 2023)^(6,7,9). Para cada disco, a fissura inicial principal foi fotografada por um microscópio óptico digital USB utilizando sempre um gabarito como escala padrão (Figura 1). Na sequência, a espessura da fissura foi determinada nos seis pontos marcados no disco com auxílio do *software* ImageJ versão 1.54d, utilizando como referência da medida o gabarito com espessura da linha de 0,200 mm, que serviu para a conversão de escala no ImageJ. Assim, o tamanho médio da abertura inicial da fissura é denotado por e_0 .

2.3 Ensaio de percolação de água

O teste de percolação de água sob baixa pressão através dos discos pré-fissurados foi adaptado da metodologia descrita por Doostkami et al. (2022a, 2022b, 2023)^(6,7,9). O disco pré-

fissurado foi acoplado na luva de PVC, que estava posicionada em uma das extremidades do tubo de PVC. Os discos foram selados nas superfícies laterais do conjunto com um selante e adesivo polimérico para evitar o vazamento de água pela lateral, permanecendo assim durante todo o ensaio de percolação de água (Figura 1).

Figura 1 - Infográfico da preparação das amostras e dispositivo para o teste de percolação de água



Fonte: Autora (2024)

Na idade de 7 dias, deu-se início da leitura do fluxo inicial de água que percolou através da fissura, antes do processo de cicatrização (Figura 2). O tubo de PVC foi preenchido com uma coluna de água de aproximadamente 200 mm (entre a superfície do disco e o nível superior da água). Executou-se a primeira leitura do nível superior da camada de água, o qual foi tomada como referencial para as demais leituras, bem como marcado o tempo inicial (t_0) do ensaio. As leituras das medidas de redução do nível superior da água durante cada ensaio, foram realizadas nos tempos decorridos de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos. Estes tempos foram especificados para ter representatividade no tempo de fluxo, em função dos diferentes tamanhos de e_0 e da variabilidade no fluxo de água. Com base nos fluxos determinados, optou-se por apresentar os resultados dos ensaios para o tempo de 60 minutos, por ser o tempo mais representativo para o cálculo do índice de cicatrização da fissura (I_c).

O ensaio de percolação foi realizado para as condições de cura:

- t_0 – tomado como referência (sem cicatrização);
- t_{28} – discos imersos em água por 28 dias a partir de t_0 ;
- t_{56} – discos imersos em água por 56 dias a partir de t_0 ;
- t_{84} – discos imersos em água por 84 dias a partir de t_0 .

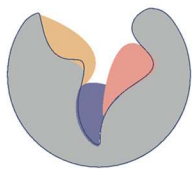


Figura 2 - Foto do ensaio de percolação de água



Fonte: Autora (2024)

2.4 Determinação do índice de Cicatrização

O potencial de cicatrização das fissuras autógenas foi avaliado para as idades de referência (t_0) e na sequência, as amostras permaneceram submersas em água para realizar a cura do concreto e só foram retirados desta condição, para execução dos testes nas idades programadas t_{28} , t_{56} e t_{84} . O potencial de cicatrização de cada disco pré-fissurado, foi calculado a partir do fluxo normalizado de água (1) e pela taxa de cicatrização (2).

$$Q_N = \frac{\text{fluxo de água em 60 antes da cicatrização}}{\text{Volume inicial de água}} \times 100 \quad (1)$$

$$I_C = 1 - \frac{\text{fluxo em 60 min. após cicatrização}}{\text{fluxo em 60 min. antes da cicatrização}} \quad (2)$$

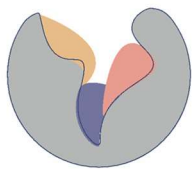
Sendo: Q_N o fluxo de água normalizado passante pela fissura durante os 60 minutos de ensaio; e I_C , o índice de cicatrização da fissura, que leva em conta o fluxo de água passante pela fissura em função das idades de cura do concreto imerso em água com o fluxo passante antes da cura.

Além disso, também foram estabelecidos subgrupos de fluxo normalizado de água através da fissura, sendo eles: Q_{N0} (referencial t_0); Q_{N28} (t_{28}), Q_{N56} (t_{56}) e Q_{N84} (t_{84}).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os discos avaliados apresentaram valor de $e_0 \leq 0,300$ mm, o que está dentro dos limites de abertura de fissura previstos para elementos de concreto de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023)⁽¹⁵⁾.

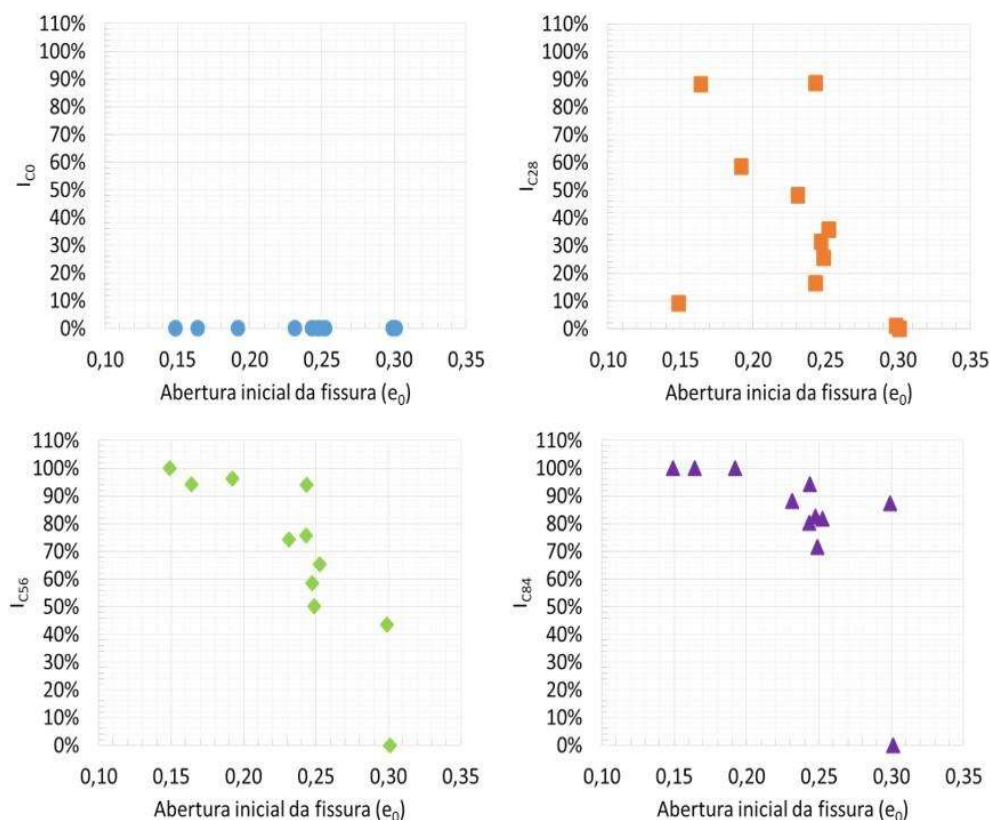
A Figura 3 indica a influência do tempo de cura em água das amostras de concreto, até a idade de 84 dias, através dos resultados dos índices de cicatrização (2) determinados pelo fluxo de água. Foi observado um aumento no I_C ao longo do tempo de cura. No período de cura entre t_0 a t_{28} cerca de 82% das amostras apresentaram $I_{C28} > 0\%$, denotando a evidência de formação



de produto cicatrizante no interior das fissuras no período de 28 dias. O intervalo de cura t_0 a t_{56} apresentou $I_{C56} > 40\%$ com exceção de um resultado, destacando um progresso na cicatrização das amostras quando comparado ao tempo de cura t_{28} . De modo semelhante, para o período de cura entre t_0 a t_{84} , aproximadamente 91% das amostras obtiveram $I_{C84} > 70\%$, contendo apenas uma amostra com $I_C = 0\%$.

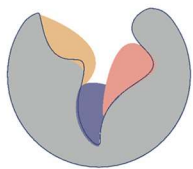
O ensaio de percolação de água também indicou que aberturas de fissuras maiores tendem a ser mais resistente ao processo de cicatrização autógena, principalmente para fissuras com $e_0 > 0,200$ mm. As amostras de concreto sob a condição de cura submerso em água em sua maioria apresentaram fechamento quase total das fissuras com $e_0 < 0,200$ mm no período de cura de t_{56} e apresentaram um desempenho satisfatório no fechamento de fissuras para $0,230 \leq e_0 < 0,300$ mm, onde 63,6% das amostras apresentaram I_{C84} entre 71,6% e 94,1%.

Figura 3 - Índice de cicatrização nas idades t_0 (I_{C0}), t_{28} (I_{C28}), t_{56} (I_{C56}) e t_{84} (I_{C84}).



Fonte: Autora (2024)

Os resultados experimentais de I_{C28} são similares aos resultados obtidos por DOOSTKAMI, H. et al. (2023, 2022)^{5,7}, indicando que a cura por imersão por 28 dias não é suficiente para promover uma cicatrização completa da fissura. Porém, a cicatrização por completa de fissuras com abertura inicial $e_0 < 0,200$ mm foi possível para cura por imersão com idades de 84 dias, conforme demonstrado na Figura 3.



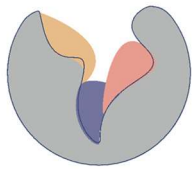
4. CONCLUSÃO

A evolução da cicatrização autógena por meio do ensaio de percolação de água sob baixa pressão foi avaliada para idades de cura de até 84 dias. A partir dos resultados experimentais, conforme a metodologia e materiais adotados, concluiu-se que:

- A cura por imersão em água por 28 dias, não é suficiente para promover uma cicatrização completa, a ponto de impedir o fluxo de água através da fissura com abertura inicial $e_0 < 0,300$ mm;
- Amostras com abertura inicial de fissura $e_0 < 0,200$ mm necessitaram de 84 dias de cura por imersão em água para obter o $i_c = 100\%$;
- Amostras com abertura inicial de fissura $0,200 \leq e_0 < 0,300$ mm curadas em água por 84 dias, podem reduzir em até 70% o fluxo de água passante pela fissura.

REFERÊNCIAS

1. HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, v. 92, p. 499–511, fev. 2016.
2. SANTOS, S.; FORMAGINI, S. **Concretos com propriedades cicatrizantes: panorama brasileiro**. 64º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...**: 64º. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2023. Florianópolis: IBRACON, 2023. Disponível em: <CBC2023-64CBC2023>
3. TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalizador cristalino**. Mestrado (Dissertação) —São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.
4. VAN TITTELBOOM, V.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 27 maio 2013.
5. DOOSTKAMI, H. et al. Self-healing capability of conventional, high-performance, and Ultra High-Performance Concrete with commercial bacteria characterized by means of water and chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 401, p. 132903, out. 2023.
6. DOOSTKAMI, H. et al. Self-healing of concrete containing commercial bacteria by means of water and chlorides permeability. **MATEC Web of Conferences**, v. 361, p. 05010, 2022.
7. DOOSTKAMI, H. et al. **Self-healing capability of conventional and high-performance concrete containing sap by means of water permeability**. . Em: FIB INTERNACIONAL CONGRESS 2022 OSLO. Oslo, Norway: 13 jun. 2022.
8. LI, X.; LI, D.; XU, Y. Modeling the effects of microcracks on water permeability of concrete using 3D discrete crack network. **Composite Structures**, v. 210, p. 262–273, 15 fev. 2019.
9. ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 1–11, 1 jul. 2015.



I° SIBRACIC

Simpósio Brasileiro de Autocicatrização do Concreto

10. TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 233–247, 15 abr. 2015.
11. VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self-healing concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008–1014, out. 2017.
12. HOU, S. et al. Quantitative evaluation on self-healing capacity of cracked concrete by water permeability test – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 127, p. 104404, 1 mar. 2022.
13. CAPPELLESSO, V. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. (Mestrado) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.