

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**BRUNA SANTOS TAMIOSSO**

**CORROSÃO ACELERADA EM CONCRETO ARMADO COM ADITIVO  
CRISTALIZANTE**

**Alegrete  
2025**

**BRUNA SANTOS TAMIOSSO**

**CORROSÃO ACELERADA EM CONCRETO ARMADO COM ADITIVO  
CRISTALIZANTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete  
2025**

**BRUNA SANTOS TAMIOSSO**

**CORROSÃO ACELERADA EM CONCRETO ARMADO COM ADITIVO CRISTALIZANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA - Orientadora

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA - Coorientadora

Prof. Me. ALDO LEONEL TEMP - UNIPAMPA

Me. Eng. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 08/07/2025, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDO LEONEL TEMP, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 14:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/07/2025, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1777720** e o código CRC **9BF5A776**.

Dedico este trabalho aos pilares que sustentam minha vida: meu pai, minha mãe, meus irmãos e meus avós Edson Carlos (*in memoriam*), Madalena, Diniz e Eunice.

## AGRADECIMENTO

Ao final desta jornada acadêmica, expresso minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa e para a conclusão da minha graduação.

Agradeço, primeiramente, a Deus, sem Ele a realização desse sonho não teria sido possível. Ele que sempre esteve comigo, me acompanhando em cada etapa dessa caminhada, sendo meu consolo nas horas difíceis e me proporcionou viver inúmeras felicidades. Tenho certeza de que Ele sonhou tudo isso para mim e prepara coisas incríveis para meu futuro.

Agradeço também à minha família: meu pai Silvio, minha mãe Fabiana e meu irmão Leonardo, eles que foram meu apoio frente a todas as dificuldades e sempre me incentivaram a continuar na jornada. Ao meu pai, minha eterna gratidão por jamais medir esforços para me apoiar. Foram inúmeras as vezes em que percorreu vários quilômetros apenas para me buscar em Alegrete e me levar para casa. Mais do que um pai, foi um verdadeiro alicerce durante toda essa caminhada, sendo apoio constante, incentivo incansável e, inclusive, colaborador ativo na realização deste trabalho.

À minha mãe, agradeço pelo apoio emocional, pois, mesmo distante fisicamente, ela esteve presente em todos os momentos. Nossas chamadas de vídeo diárias eram fonte de força e ânimo, nas quais compartilhei tanto as conquistas quanto os desafios da graduação. Sua dedicação, carinho e incentivo foram fundamentais para que eu persistisse até o fim.

Ao meu irmão Leonardo, que sempre foi uma grande inspiração e incentivo para mim. Com seu jeito divertido e brincalhão trouxe leveza aos meus dias e me ajudou a enfrentar momentos difíceis com mais alegria. Tudo o que conquistei até aqui também é por ele, por querer ser exemplo para ele e para retribuir todo o amor e admiração que sempre me ofereceu.

Também não poderia deixar de agradecer às minhas orientadoras, pela oportunidade que me concederam, pela acolhida no grupo de pesquisa GPTeC e pelas diversas oportunidades de crescimento dentro do mesmo. A experiência e o incentivo de vocês foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Deixo aqui um agradecimento especial à professora Simone, que foi mais do que uma coorientadora, sempre se mostrou disposta a me ajudar em todos os momentos, tanto na escrita deste trabalho quanto nos dias de concretagem e ensaios no laboratório, foi mais do que uma professora, foi uma amiga e também, como gostamos de dizer, foi uma "mãe" em todo o período de graduação.

Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia das Construções, agradeço imensamente pelo suporte, pelos 3 anos de convivência, pelas experiências e pelas pessoas que o compõem. A cada colega, meu carinho e reconhecimento — em especial a Otávio

Nemitz, Gustavo Carvalho, Samarah Brollo, Luizele Pedroso, Eduardo Cabral e Danielle Marques — por todo o apoio, parceria nas concretagens e nos ensaios. Agradeço também aos colegas e amigos Robson Nery e André Aquino, que se colocaram à disposição para ajudar nos dias de concretagem e se tornaram também grandes amigos.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas, Materiais e Construção (LEMAC), Marcelo Dias e Raquel Machado por todo auxílio nos ensaios realizados em laboratório. Aos Laboratório de Física e Eletrônica pelo empréstimo das fontes. Ao laboratório de química por fazer a solução salina (NaCl) e por ceder o espaço para realizar a limpeza das barras de aço.

Aos meus queridos colegas de curso — aqueles que foram mais do que colegas, que se tornaram amigos —, em especial aos meus colegas de turma: Fátima Perius, Diogo Becker e Vinicius Weiler, com quem compartilhei risos, choros, aprovações, reprovações, trabalhos infinitos, desafios e aprendizados tanto na vida pessoal quanto na vida acadêmica. Um agradecimento especial à minha dupla dinâmica, parceira de trabalhos, aprovações e, inclusive, reprovações: minha querida amiga Fátima. Obrigada por tornar esse processo muito mais leve e divertido, que nossa amizade perdure muito além do ambiente acadêmico.

Aos movimentos da Igreja Católica de Alegrete e São Borja — Movimento de Cursinhos de Cristandade (MCC), Amigos em Busca de Cristo (ABC) e Juventude em Movimento (JEM) — expressei minha gratidão por todo o apoio e orações que me fortaleceram ao longo da caminhada. Agradeço a cada pessoa que faz parte desses movimentos, por serem verdadeiros instrumentos de Deus na minha vida. Obrigada pelas palavras de incentivo, pelas caronas e pelos momentos de descontração e alegria, que trouxeram leveza aos dias difíceis e deixaram lembranças especiais.

Ao meu namorado, Otávio Nemitz, que esteve ao meu lado em todos os momentos, sendo meu apoio constante e um grande incentivador ao longo desta jornada. Caminhamos juntos por cada etapa, compartilhando conquistas, enfrentando desafios e sendo porto seguro um para o outro. Sua presença tornou este percurso mais leve, mais bonito e cheio de sentido.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte dessa caminhada. Sou imensamente grata por cada gesto de apoio e incentivo que tornaram possível a realização deste trabalho.

Obrigada!

"É justo que muito custe o que muito vale."  
Santa Teresa d'Ávila

## RESUMO

O concreto armado é amplamente utilizado, porém é vulnerável a danos como a corrosão das armaduras, especialmente em ambientes agressivos e na presença de fissuras. Para combater essa degradação e aumentar a durabilidade das estruturas, novas soluções promissoras estão sendo estudadas, como o uso de aditivos cristalizantes que auxiliam na cicatrização de fissuras e na prevenção da entrada de agentes corrosivos. No entanto, ainda há poucas pesquisas que avaliem o uso desses aditivos em estruturas com fissuras expostas à corrosão. Assim, este trabalho avaliou a influência do aditivo cristalizante na autocicatrização de microfissuras em vigas de concreto armado, bem como seus efeitos em propriedades mecânicas, absorção de água por capilaridade e corrosão das armaduras. Para isso, foram moldados dois traços de concreto: um de referência e outro com adição de aditivo cristalizante. Ambos os traços tiveram corpos de prova que foram e que não foram submetidos ao pré-carregamento, para induzir microfissuras precoces. Esta pesquisa realizou ensaios de resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM). Os resultados indicaram que o aditivo cristalizante contribuiu para a selagem de microfissuras e redução da permeabilidade do concreto, principalmente nas amostras submetidas a condições de pré-carregamento, favorecendo a cicatrização das fissuras. Além disso, observou-se redução significativa na absorção de água nos concretos com aditivo, indicando melhora frente à penetração de agentes agressivos. Observou-se uma tendência de redução da perda de massa das barras de aço dos concretos com aditivo, sugerindo que haveria uma melhora na proteção contra agentes agressivos. Conclui-se que o uso do aditivo cristalizante é uma alternativa viável para promover a autocicatrização e o aumento da durabilidade em estruturas de concreto armado, especialmente em ambientes agressivos e em casos de fissuração precoce.

Palavras-chave: Concreto Armado. Aditivo Cristalizante. Corrosão. Autocicatrização.

## **ABSTRACT**

Reinforced concrete is widely used, but it is vulnerable to damage such as corrosion of reinforcement, especially in aggressive environments and in the presence of cracks. To combat this degradation and increase the durability of structures, new promising solutions are being studied, such as the use of crystallizing additives that aid in the healing of cracks and in the prevention of the entry of corrosive agents. However, there is still little research evaluating the use of these additives in structures with cracks exposed to corrosion. Thus, this study evaluated the influence of the crystallizing additive on the self-healing of microcracks in reinforced concrete beams, as well as its effects on mechanical properties, water absorption by capillarity and corrosion of reinforcement. For this purpose, two concrete mixes were molded: a reference mix and another with the addition of crystallizing additive. Both mixes had test specimens that were and were not subjected to preloading, to induce early microcracks. This research carried out tests on flexural tensile strength, capillary water absorption and modified accelerated immersion corrosion (MAC). The results indicated that the crystallizing additive contributed to the sealing of microcracks and reduction of concrete permeability, especially in samples subjected to preloading conditions, favoring crack healing. In addition, a significant reduction in water absorption was observed in concretes with additive, indicating an improvement in the penetration of aggressive agents. A tendency towards a reduction in the mass loss of steel bars in concretes with additive was observed, suggesting that there would be an improvement in protection against aggressive agents. It is concluded that the use of the crystallizing additive is a viable alternative to promote self-healing and increased durability in reinforced concrete structures, especially in aggressive environments and in cases of early cracking.

Keywords: Reinforced Concrete. Crystallizing Additive. Corrosion. Self-healing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos fenômenos de autocicatrização conforme o Diagrama de Venn . . . . .	15
Figura 2 – Diferentes fatores que podem promover o processo de autocura autógena . . . . .	16
Figura 3 – Cicatrização autonômica utilizando cápsulas ou sistemas vasculares contendo agentes cicatrizantes bicomponentes . . . . .	18
Figura 4 – Processo de formação de cristais no interior do concreto . . . . .	19
Figura 5 – Esquemática da formação dos produtos de corrosão. . . . .	22
Figura 6 – Danos causados ao concreto devido á práticas inadequadas . . . . .	23
Figura 7 – Esquema ensaio CAIM . . . . .	25
Figura 8 – Organograma . . . . .	28
Figura 9 – Curva granulometria da areia e da brita . . . . .	30
Figura 10 – Detalhamento da etapa 3 do programa experimental . . . . .	31
Figura 11 – Ensaio de tração na flexão . . . . .	33
Figura 12 – Marcação do nível d’água no CP . . . . .	34
Figura 13 – Ensaio de absorção de água por capilaridade . . . . .	34
Figura 14 – Barras de aço limpas e identificadas . . . . .	35
Figura 15 – Fio de cobre posicionado acima da barra de aço . . . . .	36
Figura 16 – Posicionamento da barra de aço com o fio de cobre na forma . . . . .	36
Figura 17 – Esquema do ensaio CAIM . . . . .	37
Figura 18 – Ligação dos corpos de prova na fonte . . . . .	37
Figura 19 – Marcação do nível da solução salina para o ensaio CAIM . . . . .	37
Figura 20 – Barras de aço imersas na solução de limpeza . . . . .	38
Figura 21 – Limpeza das barras em água corrente . . . . .	39
Figura 22 – Barras na estufa . . . . .	39
Figura 23 – Barras limpas e secas em estufa . . . . .	39
Figura 24 – Gráfico resistência média de tração na flexão dos traços TREF e TAC, não submetidos ao pré-carregamento . . . . .	40
Figura 25 – Gráfico absorção de água para o TREF e TAC . . . . .	41
Figura 26 – Absorção de água em 72h TREF PC . . . . .	42
Figura 27 – Absorção de água em 72h TREF sem PC . . . . .	42
Figura 28 – Absorção de água em 72h TAC PC . . . . .	43
Figura 29 – Absorção de água em 72h TAC sem PC . . . . .	43
Figura 30 – Efeito isolado do Aditivo Cristalizante na absorção de água por capilaridade . . . . .	44
Figura 31 – Barras após o ensaio e a limpeza (a) TREF, (b) TAC . . . . .	46
Figura 32 – Gráfico resistência média de tração na flexão dos traços TREF e TAC, submetidos e não submetidos ao pré-carregamento (PC), após o ensaio CAIM . . . . .	47
Figura 33 – Gráfico resistência x deslocamento vertical dos corpos de prova do TREF após o ensaio CAIM . . . . .	48
Figura 34 – Gráfico resistência x deslocamento vertical dos corpos de prova do TAC após o ensaio CAIM . . . . .	48
Figura 35 – Efeito isolado do Aditivo Cristalizante na resistência à tração após CAIM . . . . .	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física da areia . . . . .	29
Tabela 2 – Caracterização física da brita . . . . .	30
Tabela 3 – Análise estatística da resistência à tração . . . . .	41
Tabela 4 – Análise estatística da Absorção de água por Capilaridade . . . . .	43
Tabela 5 – Perda de massa das barras de aço do traço de referência . . . . .	44
Tabela 6 – Perda de massa das barras de aço do traço com aditivo cristalizante	45
Tabela 7 – Análise estatística da perda de massa das barras de aço . . . . .	45
Tabela 8 – Análise estatística da resistência à tração pós CAIM . . . . .	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
2.1	Concretos autocicatrizantes	14
2.1.1	Processos da autocicatrização autógena e autonômica	15
2.1.2	Aditivo Cristalizante	18
2.2	Corrosão do concreto	20
2.3	Trabalhos relacionados	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
3.1	Materiais	28
3.1.1	Cimento	29
3.1.2	Agregados	29
3.1.3	Aditivo Cristalizante	30
3.1.4	Barras de aço	30
3.2	Preparo e cura dos concretos	31
3.3	Ensaio de Controle	32
3.3.1	Ensaio de resistência à tração na flexão	32
3.3.2	Ensaio de absorção de água por capilaridade	33
3.3.3	Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1	Resistência à tração na flexão	40
4.2	Absorção de água por capilaridade	41
4.3	Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)	44
4.4	Resistência à tração na flexão após ensaio CAIM	47
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusões	51
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	52
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, quando houve a popularização e iniciou em grande escala o uso do concreto armado na construção civil, acreditava-se que este material seria de alta durabilidade, necessitando de poucos reparos e possuindo uma vida útil muito longa. Essa visão, embora não completamente errada, foi refinada com o tempo. Atualmente sabemos que o concreto armado, quando produzido e aplicado corretamente, é bastante durável em ambientes pouco agressivos. No entanto, erros de projeto e execução, combinados com condições ambientais desfavoráveis, podem causar danos significativos e iniciar processos de deterioração do concreto. Isso destacou e impulsionou o estudo dos processos de deterioração do concreto, dando origem à área da "Patologia das Construções"(GRAEFF, 2007).

Entre os diversos processos que levam à rápida deterioração do concreto armado, a corrosão das armaduras se destaca pela sua alta frequência e pelos danos severos que pode causar, o que pode reduzir significativamente a vida útil das estruturas. Segundo Gentil (1996), a corrosão é definida como a deterioração de um metal pela ação química ou eletroquímica do meio com o qual o material está exposto, podendo estar ou não associada a esforços mecânicos.

A corrosão da armadura deve ser considerada desde o início do projeto das estruturas de concreto armado, pois este fenômeno pode comprometer a integridade e a estabilidade das construções. Esta é a patologia que aparece com mais frequência e que apresenta maiores riscos à segurança, por isso se tornou um assunto muito estudado pelos profissionais da engenharia civil (CABRAL, 2000).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os fatores que mais colaboram para o aparecimento da corrosão das armaduras derivam de erros de projeto, cobrimento com espessuras menores do que o especificado em norma, concreto com especificação inadequada, estruturas inseridas em ambientes agressivos sem tratamento e, ainda, falha na execução do sistema estrutural. A maioria dos fatores ocasionam, como consequência, o aparecimento de fissuras no concreto, que permitem a entrada de agentes agressivos e, portanto, contribuem para a propagação do fenômeno de corrosão das armaduras.

Conforme El-Reedy (2018), um dos principais desafios que a engenharia civil enfrenta é a corrosão das armaduras. Este tipo de manifestação patológica faz com que bilhões de dólares sejam gastos em todo o mundo, por isso, é fundamental conhecer as causas da corrosão, os parâmetros do concreto e as condições ambientais às quais a estrutura será exposta. Outros autores também mencionam que a corrosão é a causa de deterioração mais onerosa em termos de manutenção das construções. Sendo a origem de inúmeros defeitos aparentes que, além de provocar perdas da capacidade da estrutura, também são prejudiciais ao bom funcionamento estrutural

(BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

O aditivo cristalizante é um material que pode ser incorporado no concreto para promover a autocicatrização. Assim, erros de projeto e/ou execução em estruturas de concreto que acarretam em fissuração precoce podem ser autorreparadas com o uso deste aditivo. O aditivo cristalizante incorporado ao concreto pode promover o fechamento de fissuras de até 0,4 mm de abertura (TAMBARA, 2024). No entanto, há ausência de estudos que avaliam a eficácia do aditivo em vigas de concreto armado sujeitas à corrosão. Sabe-se que a corrosão eletroquímica em estruturas de concreto armado é um fenômeno que acarreta na difusão da corrosão na barra, gerando deslocamento do concreto e formação de fissuras internas próximas à armadura. Assim, este trabalho tem como foco avaliar a contribuição do aditivo cristalizante frente à cicatrização de fissuras induzidas junto ao processo de corrosão e propagação da corrosão em vigas de concreto armado.

De acordo com o exposto, é de consenso que o processo de corrosão do aço em uma estrutura de concreto armado é difícil de ser tratado, além de ser bastante custoso. Diante disso, o estudo e a validação de novos materiais que possam mitigar e/ou evitar o problema de propagação da corrosão de armaduras justificam o desenvolvimento desta pesquisa.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos que orientam o trabalho estão apresentados a seguir no texto.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a ação do aditivo cristalizante no comportamento mecânico de prismas de concreto armado sujeitos a fissuração precoce e corrosão da armadura.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

A fim de alcançar o objetivo geral da pesquisa, definiu-se os objetivos específicos:

- Comparar a resistência mecânica entre o concreto armado referência (sem aditivo cristalizante) e o concreto armado com adição de aditivo cristalizante, com e sem pré-carregamento, antes e após a corrosão;
- Avaliar a absorção de água por capilaridade dos prismas de concreto armado referência (sem aditivo cristalizante) e com adição de aditivo cristalizante, com e sem pré-carregamento, antes e após a corrosão;

- Analisar a fissuração e a perda de massa das barras de aço dispostas nos corpos de prova após a corrosão acelerada pelo método CAIM;
- Analisar a autocicatrização dos concretos de referência e dos concretos com aditivo cristalizante através da manutenção ou da melhoria das propriedades estudadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentada a seguir a revisão bibliográfica utilizada para o embasamento teórico desta pesquisa.

### 2.1 Concretos autocicatrizantes

Construções de concreto armado podem apresentar, ao longo do tempo, fissuras ou microfissuras, quando expostas a ambientes agressivos e a grandes variações térmicas. O concreto autocicatrizante tem como capacidade curar suas próprias fissuras, que comprometem a durabilidade das estruturas. Segundo Kaushal e Saeed (2024), seu artigo explora como o concreto autocicatrizante tem sido utilizado em infraestruturas urbanas e costeiras, como pontes e túneis, destacando o uso de bactérias e polímeros superabsorventes para reparar microfissuras de forma autógena ou autônoma. O uso desse tipo de concreto é crescente em construções que necessitam de alta durabilidade, que são de difícil manutenção e que estão situadas em ambientes agressivos, como em pontes e viadutos, construções expostas a grandes variações térmicas e em estruturas expostas à água salgada.

Há algumas décadas atrás, classificar os processos da autocicatrização em materiais cimentícios não era uma tarefa fácil, considerando as diversas nomenclaturas que estavam presentes na literatura. Silva (2016) mencionou que devido à grande quantidade de estudos sobre o tema da autocicatrização de fissuras no concreto e havendo uma falta de padronização quanto às terminologias usadas pelos pesquisadores, os comitês técnicos criados no JCI e no RILEM buscaram uma sistematização desses conceitos e a classificação dos tipos de autocicatrização.

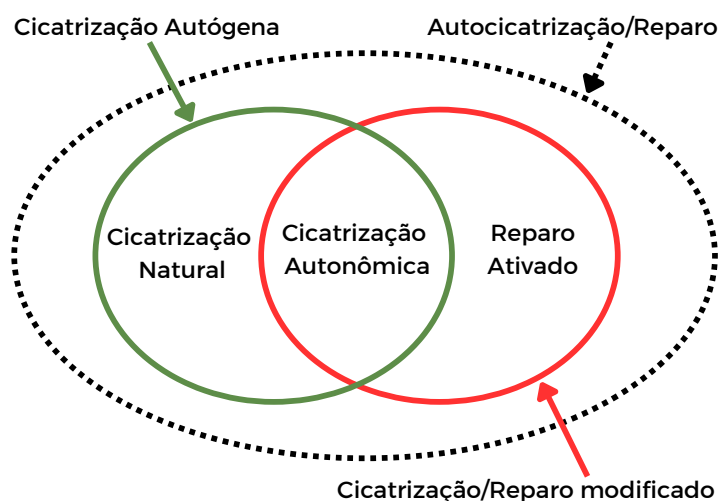
O Comitê Técnico RILEM (ROOIJ et al., 2013) apresentou uma classificação de forma mais simplificada e ampla:

- **Autógeno:** Quando o processo de recuperação utiliza materiais que estão presentes no próprio sistema, ou seja, que não foram especificamente concebidos para a autocicatrização.
- **Autônômico:** Quando o processo de recuperação utiliza materiais que não estão presentes no sistema, mas que foram concebidos e incorporados para promoverem a autocicatrização.

Uma classificação mais específica foi sugerida pelo Comitê Técnico JCI-TC075B (2009) e apresenta termos semelhantes a classificação feita pelo Comitê RILEM (ROOIJ et al., 2013), mas com diferentes interpretações em relação ao processo da autocicatrização no concreto. Juntamente com os autores Igarashi, Kunieda e Nishiwaki (2009) e o Comitê JCI-TC075B (2009), foi criada o diagrama de Venn (Figura 1) com

a seguinte classificação: cicatrização natural, cicatrização autônoma e reparação ativa. Nesta classificação, as cicatrizações naturais e autônomas são consideradas como cicatrização autógena, e tratam de materiais que já estão presentes no traço do concreto, tais como cimento, cinza volante, escória, etc.

Figura 1 – Classificação dos fenômenos de aut cicatrização conforme o Diagrama de Venn



Fonte: Adaptado de JCI-TC075B (2009)

Na sequência são explicados os tipos de materiais que promovem a cicatrização do concreto, baseado na classificação do RILEM (ROOIJ et al., 2013). Dentro do processo de cicatrização autógeno, os materiais como cimento e os materiais cimentícios suplementares atuam no preenchimento e cura das próprias fissuras, sem que seja necessária intervenção externa ou adição de outros materiais. O cimento é um dos principais agentes da autocicatrização, pois pode reagir com a água presente na fissura, formando produtos de hidratação que preenchem os vazios e selam as fissuras.

No processo de cicatrização autônomo, bactérias ou aditivos cristalizantes são incorporados no traço do concreto para promoverem a cicatrização de modo mais rápido e eficiente, mesmo que estejam em ambientes que contenham umidade. Os aditivos cristalizantes, por exemplo, possuem a capacidade de formar cristais que preenchem as fissuras e poros, impedindo a entrada de água. No tópico 2.1.2, a incorporação de aditivos cristalizantes no concreto é melhor discutida, cujo tema é foco deste trabalho.

### 2.1.1 Processos da autocicatrização autógena e autônoma

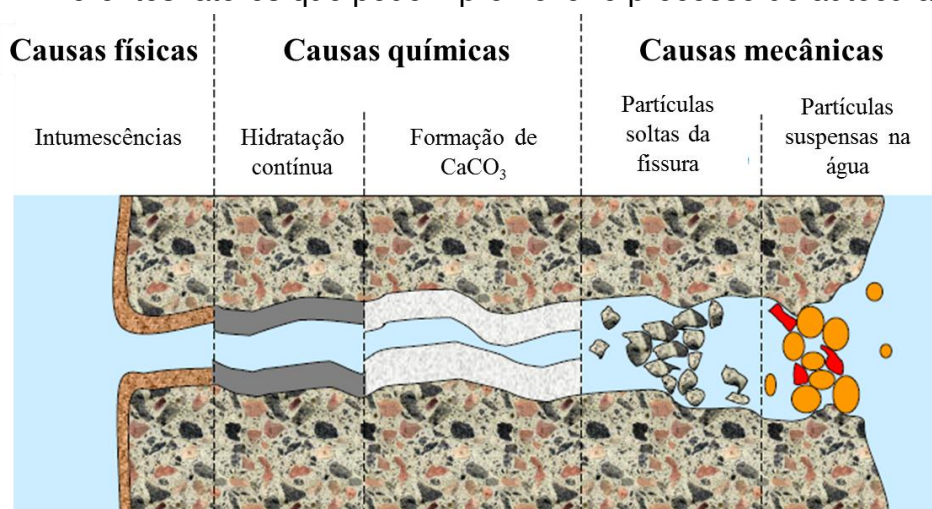
O processo de cicatrização autógena resulta no preenchimento completo ou parcial das fissuras. Belie et al. (2018) cita que a capacidade regenerativa natural do concreto é restrita a pequenas fissuras, não ultrapassando, geralmente, 100 a 150  $\mu\text{m}$  de largura.

Mesmo a cicatrização autógena sendo um fenômeno natural presente no concreto, é um processo lento, o que torna seu potencial limitado. Para reverter isso, diversos estudos estão sendo conduzidos com o objetivo de desenvolver aditivos que acelerem esse mecanismo de reparo natural, ampliando a durabilidade das estruturas de concreto.

A autocicatrização autógena acontece pela hidratação contínua dos componentes de anidros, com a nucleação de carbonatos de cálcio e pela formação de cristais, sendo mecanismos intensificados pela penetração de umidade/água e restrição da abertura de fissuras (TITTELBOOM; BELIE, 2013).

As causas podem ocorrer de diferentes formas, sendo elas físicas, químicas ou mecânicas, como mostrado na Figura 2, segundo Rooij et al. (2013).

Figura 2 – Diferentes fatores que podem promover o processo de autocura autógena



Fonte: Rooij et al. (2013)

De acordo com a Figura 2, as causas físicas ocorrem devido a expansão da pasta de cimento hidratado próximo das faces da fissura, isso acontece quando a pasta absorve água, resultando num menor espaço para a entrada de fluídos. Ao diminuir essa expansão e acontecer a secagem do concreto, a fissura pode aumentar novamente.

Já para as causas químicas, pode-se observar que pode ocorrer por meio de dois mecanismos. O primeiro é por hidratação contínua do cimento, ocorrendo quando há presença de umidade e grãos de cimento anidro, que são grãos de cimento que ainda não foram hidratados. Segundo Pedroso (2019), os produtos de hidratação ocupam cerca do dobro do espaço do grão de cimento original, pois estes crescem no espaço livre da fissura. Ela também afirma que esse mecanismo não pode ser responsável por uma completa autocicatrização de uma fissura, mas assume uma pequena largura de fissura de 0,1 mm e, juntamente com o inchaço e a hidratação de alguns componentes do concreto, pode-se obter autocura. Porém, para fissuras

maiores, essa capacidade de reparo natural diminui significativamente. Já o segundo processo é a formação de carbonato de cálcio, esse mecanismo depende da temperatura, do pH e da concentração dos reagentes, sendo eles a união dos íons de cálcio ( $Ca^{+2}$ ) que estão presentes na água dos poros do concreto com os íons de carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) presentes na água da fissura. O mecanismo foi estudado por Rooij et al. (2013) e apresentou ser a contribuição mais importante para a autocura.

Por fim, as causas mecânicas também podem ocorrer de duas formas, por partículas soltas do concreto ou partículas finas provenientes da água. As partículas fraturadas se soltam do concreto e as partículas finas podem ser carregadas pelo atrito com água ou até mesmo se soltarem da superfície da fissura. Ambas, ao serem transportadas pelo fluxo, podem se prender nas regiões de menor espessura das fissuras, causando obstrução à fissura (ROOIJ et al., 2013).

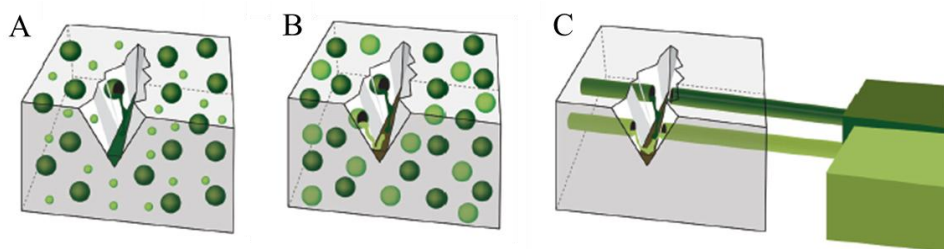
Existe também a classificação de cicatrização autonômica, que é um processo artificial de cura, no qual utiliza componentes adicionais, conhecidos como adições projetadas, que são incorporados ao concreto na sua composição original e são desenvolvidos para acelerar e otimizar o processo de reparo das fissuras (REINHARDT et al., 2013).

Takagi (2013) em seu trabalho relata que a cicatrização autonômica refere-se a um fechamento involuntário da fissura, induzido pela adição de materiais específicos, como cinzas volantes ou agentes expansivos. Esses componentes são incorporados à matriz do concreto com o objetivo de preencher a fissura ou acelerar o fechamento, em condições de umidade, simulando um processo de cura interno. Tendo em vista essa definição, o uso de adições com propriedades pozolânicas (exemplo: cinzas volantes), pode ser considerado um aspecto da cicatrização autônoma, pois a hidratação contínua tem alto potencial de cicatrização no concreto, conferindo maior resistência a ataques químicos e contribuindo para a sustentabilidade da construção civil.

É importante mencionar que esse mecanismo autonômico de autocura é capaz de curar fissuras de 300  $\mu\text{m}$  e, em certas situações, até fissuras superiores a 1 mm, na maior parte dos casos agem rapidamente (BELIE et al., 2018).

Tittelboom e Belie (2013) apresentam esse mecanismo baseado na inserção de microcápsulas ou sistemas vasculares contendo agentes cicatrizantes, citam como perspectiva futura a cicatrização baseada em microcápsulas com agentes cicatrizantes que reajam com um segundo componente disperso na matriz cimentícia Figura 3A, em cápsulas adicionais preenchidos com um segundo componente Figura 3B ou nos sistemas vasculares Figura 3C.

Figura 3 – Cicatrização autonômica utilizando cápsulas ou sistemas vasculares contendo agentes cicatrizantes bicomponentes



Fonte: Takagi (2013)

Segundo (PETRY, 2021), a forma como o fenômeno da autocicatrização autônoma inicia, pode classificá-lo em dois tipos: ativa ou passiva. A primeira é quando há alguma intervenção que estimule que o mecanismo aconteça, como exemplo é possível mencionar a utilização da temperatura controlada. Por outro lado, a cicatrização passiva, ocorre de modo natural sem interferência humana direta, ocorrendo por mecanismos próprios do concreto, tendo como exemplos o uso de materiais encapsulados ou sistemas vasculares, ambos promovem a regeneração dos tecidos danificados.

### 2.1.2 Aditivo Cristalizante

Segundo o Relatório sobre Aditivos Químicos para Concreto do Instituto de Concreto Americano (ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) os aditivos cristalizantes (CAs) são classificados como Aditivos Redutores de Permeabilidade para condições de Pressão Hidrostática (PRAH), sendo um composto químico que, ao reagir com o concreto, formam uma estrutura cristalina que preenche os poros do concreto, impedindo a passagem de água e de agentes agressivos para dentro do material. Belie et al. (2018) classificou os aditivos como estimuladores de autocicatrização autógena.

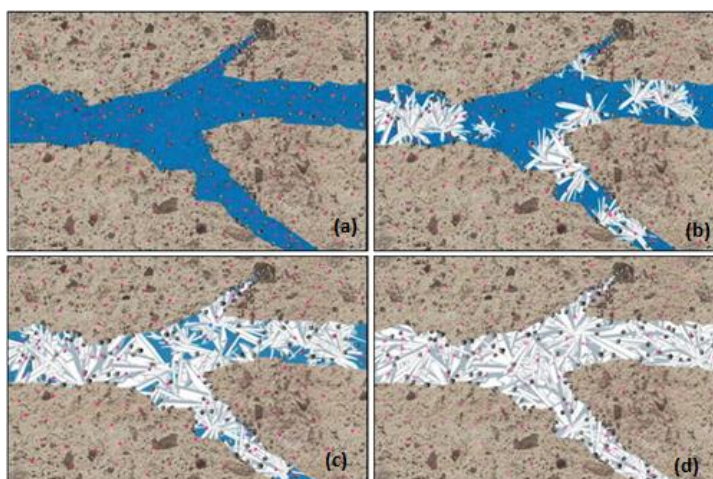
Atualmente, os aditivos cristalizantes são utilizados para melhorar as propriedades do concreto e da argamassa. Os benefícios incluem, por exemplo: aumento da resistência à compressão e flexão em todas as idades, diminuição da permeabilidade e maior durabilidade, redução da corrosão, redução do encolhimento, ajustes iniciais de pega, aumento do abatimento e trabalhabilidade, melhor capacidade de bombeamento, modificação da reologia, melhor eficiência do cimento, álcali-silica redução da reação (ASR) e economia da mistura de concreto (ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010).

Guzlena e Sakale (2019) apontam que diversos aditivos são comercializados no mercado da construção civil, mas, geralmente, sua composição química é mantida em segredo pelos fabricantes. Segundo os autores citados, Pazderka e Hájková (2016), Ferrara, Krelani e Moretti (2016) e Zizkova et al. (2018), a composição química dos CAs é formada por cimento Portland, fillers, pozolanas, escórias, areias, pó silicos e "produtos químicos ativos".

Segundo Ourives, Bilesky e Yokoyama (2009), dentro do concreto o processo de cristalização ocorre quando os compostos químicos ativos reagem tanto com a água presente no concreto fresco quanto no interior dos poros e fissuras, interagindo com os subprodutos da hidratação do cimento, como hidróxido de cálcio, alumínio, óxidos metálicos e sais. Esses cristais se desenvolvem dentro dos poros e capilares do concreto, atuando como uma barreira permanente contra a penetração de água e agentes agressivos presentes na atmosfera. Entretanto, a estrutura cristalina permite a passagem do vapor d'água, sendo uma característica fundamental para evitar o acúmulo de pressão interna no material. Caso novas fissuras surjam, os cristais se formam nesses novos espaços, selando-os e impedindo a progressão de danos. Esse processo de cristalização é contínuo e garante a proteção do concreto ao longo de toda a sua vida útil.

O processo de formação dos cristais no interior do concreto é mostrado na Figura 4, representado por Alpes (2019), onde o autor apresenta na situação (a) o poro ou fissura contendo umidade, produtos de hidratação do cimento e compostos químicos ativos do aditivo. Em seguida, na situação (b) é indicado o início da formação de cristais a partir da reação dos compostos químicos ativos com a umidade e os produtos de hidratação e, posteriormente, em (c) está sendo apresentado a evolução da formação desses cristais. Por fim, é indicado na situação (d) o selamento total da fissura ou poro pelo processo de cristalização integral do concreto.

Figura 4 – Processo de formação de cristais no interior do concreto



Fonte: Alpes (2019)

O processo de cristalização permanece em estado inativo na ausência de água. Dessa maneira, quando novas fissuras surgem durante a utilização da estrutura, ocorre uma retomada da formação de cristais no interior dessas fissuras, impedindo a criação de novos caminhos para a passagem de água. Essa capacidade de selar fissuras é conhecida como autocicatrização e desempenha um papel crucial na eficiência da

impermeabilização por cristalização, uma vez que proporciona um processo contínuo de redução da permeabilidade ao longo da vida útil da estrutura (ALPES, 2019).

Ferrara, Krelani e Carsana (2014) mencionam que os CAs podem ser incorporados durante a produção do concreto ou aplicados como pinturas de impregnação em estruturas já finalizadas. Segundo Belie et al. (2018), há um interesse da indústria em promover o uso de aditivos cristalizantes como estimuladores da cicatrização autógena, por ser um mercado interessante na área de tecnologia de concreto autocicatrizante. Apesar disso, a ampla variedade de composições e dosagens recomendadas pelos fabricantes dificulta a padronização.

## 2.2 Corrosão do concreto

Zhang et al. (2012) afirma que a corrosão da armadura é uma das causas mais importantes da deterioração de estruturas de concreto, podendo levar a falhas estruturais precoces e acarretar o colapso de todo o edifício.

Gentil (2012) discute a corrosão em concretos e afirma que esse é um assunto de grande importância, pois não provoca somente a deterioração, mas também afeta a estabilidade e a vida útil das estruturas. Além disso, a armadura não é capaz de sofrer corrosão, exceto se ocorrer contaminação e deterioração do concreto, ou seja, quanto mais o concreto permanecer inalterado, mais proteção a armadura terá.

A corrosão das armaduras é desencadeada pela carbonatação da camada de cobertura e/ou pela infiltração de íons cloreto, sendo um fenômeno eletroquímico que ocorre no interior do concreto (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014). Segundo Tuutti (1982), o processo corrosivo ocorre em duas etapas distintas: iniciação, quando acontece a despassivação da armadura, ou seja, os agentes agressivos penetram no concreto de cobertura e avançam até chegar na armadura, e a propagação da corrosão é a fase que gera fissuras no concreto e acontece o destacamento do concreto de cobertura. Graeff (2007) também comenta sobre essas etapas, afirma que na primeira etapa a intensidade da corrosão é muito baixa, fazendo com que não aconteçam danos estruturais e a vida útil da estrutura permaneça inalterada. Por outro lado, durante a segunda fase o fenômeno é mais agressivo, afeta a aderência entre o concreto e a armadura, além disso, danifica algumas propriedades mecânicas do aço, como resistência à tração e ductilidade.

A corrosão e a deterioração do concreto podem ser resultantes de uma combinação de fatores, sendo eles de natureza mecânica, física, biológica e química. Para os fatores mecânicos tem-se como exemplo as vibrações que podem ocasionar fissuras, possibilitando que o meio corrosivo entre em contato com a armadura. Líquidos em movimento, principalmente contendo partículas em suspensão, podem ocasionar erosão no concreto, com o seu consequente desgaste. Se esses líquidos contiverem substâncias químicas agressivas ao concreto, tem-se ação combinada, isto é, erosão-corrosão, que

é, evidentemente, mais prejudicial e rápida do que ações isoladas (GENTIL, 2012).

Com relação aos fatores físicos, Gentil (2012), cita como exemplo as variações de temperatura que podem causar choques térmicos afetando a integridade da estrutura. Com a diferença de temperatura entre os componentes do concreto, por possuírem variadas propriedades térmicas, podem gerar microfissuras no concreto, facilitando a entrada de agentes corrossivos. Os fatores biológicos tem-se como exemplo a ação de microrganismos, que podem gerar ambientes com condições corrosivas para o concreto e para a armadura, isso pode ocorrer, por exemplo, devido à presença de bactérias oxidantes de enxofre ou de sulfetos, que aceleram a oxidação dessas substâncias para ácido sulfúrico. Por fim, os fatores químicos estão associados à presença de substâncias químicas nos diferentes ambientes, como água, solo e atmosfera. Pode-se citar os ácidos sulfúricos e clorídricos, como as substâncias mais agressivas, podendo agir na pasta de cimento, no agregado e na armadura.

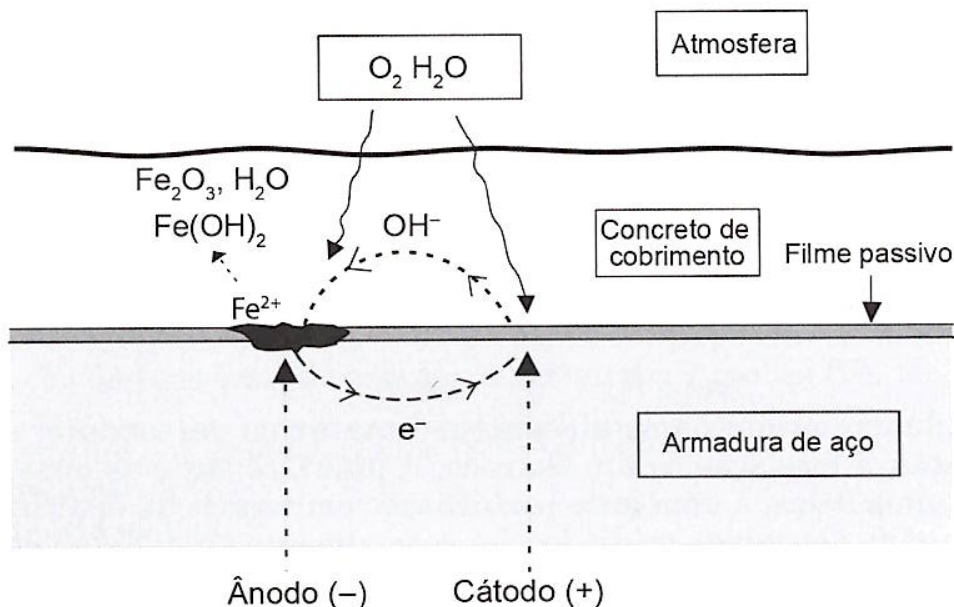
De modo geral, o concreto por sua natureza alcalina, forma uma espécie de escudo protetor em torno das barras de aço. Esse ambiente com pH na faixa de 12,7 – 13,8 favorece a formação de uma camada de óxidos, oriundos da dissolução de hidróxidos presentes no cimento, que fica aderida ao aço, preenchendo os poros e evitando a corrosão desde que as condições de potencial e pH estejam estáveis. No entanto, ao longo do tempo, substâncias agressivas presentes no ambiente ( $CO_2$ ,  $SO_2$  e  $H_2S$ ) podem penetrar no concreto pelos poros e fissuras do mesmo. Uma vez saturados, essas substâncias reagem com os componentes alcalinos do concreto e formam ácidos que reduzem o pH e desestabilizam a camada passivante de óxidos, iniciando assim a despassivação da armadura. Sem essa camada passivante, a armadura de aço fica exposta à umidade e ao oxigênio, o que favorece a ocorrência da corrosão. Uma vez despassivada, a armadura passa a sofrer a chamada corrosão eletroquímica (STEIN, 2019).

Conforme Baroghel-Bouny, Capra e Laurens (2014), a corrosão é um processo destrutivo que afeta o aço por meio de reações eletroquímicas que envolve a transferência de íons e elétrons na interface metal-solução. Na superfície do aço, ocorrem dois tipos de reações de modo simultâneo e dependente, caracterizando o processo de corrosão-oxidação:

- Reação anódica (oxidação): O metal libera íons na solução ( $Fe \rightarrow Fe^{n+} + ne^-$ ). A cinética dessa reação é controlada pela capacidade do meio de aceitar íons ferrosos ( $Fe^{2+}$ ) e férricos ( $Fe^{3+}$ ).
- Reação catódica (redução): Corresponde à redução de um oxidante na solução e à captura de elétrons do ânodo. Sem oxigênio, ocorre a formação de íons hidroxila e gás hidrogênio; na presença de oxigênio, são gerados íons hidroxila ou água.

Essas reações principais resultam em reações secundárias que formam produtos de corrosão, como hidróxidos e óxidos de ferro ( $Fe(OH)_n$  e  $Fe_xO_y$ ). Na Figura 5, é ilustrado como ocorre o processo eletroquímico e a formação dos produtos de corrosão.

Figura 5 – Esquemática da formação dos produtos de corrosão.



Fonte: Baroghel-Bouny, Capra e Laurens (2014)

A fissuração é, portanto, o principal processo responsável pela corrosão das armaduras no concreto. Esse fenômeno pode ser causado por diversos fatores, como retração, expansão, excesso de carga, etc. Ao que diz respeito a esse fenômeno, Acker, Torrenti e Guérinet (2014) destacam que o principal parâmetro em condições de uso é a abertura das fissuras, muitas vezes por razões estéticas, mas, principalmente, pela durabilidade da estrutura. O concreto, na maioria das situações, apresenta microfissuras que não são visíveis a olho nu (menores que  $20\ \mu m$ ). No entanto, estudos e a experiência prática mostram que fissuras de pequena abertura, inferiores a  $0,3\ mm$ , não comprometem a vida útil da edificação. Isso ocorre porque as forças de tensão superficial dentro do concreto impedem a livre circulação de água e íons, ou seja, a água que ingressa no concreto evapora, sem causar perda de íons e cal, mantendo o pH elevado e protegendo a armadura da corrosão.

Segundo Acker, Torrenti e Guérinet (2014), referente a durabilidade das obras de concreto armado, a pior fissuração é a que acontece de modo precoce, essas fissuras, na prática, podem ser sempre evitadas. Dosar o concreto de maneira que o teor de finos seja ótima (mistura com porosidade mínima), escolher a dimensão do agregado gráudo compatível com as dimensões das fôrmas e o cobrimento da armadura, aplicar água suavemente ou escolher um produto de cura eficaz, são praticas que deveriam ser sempre aplicadas para que a fissuração precoce não ocorra.

Mehta e Monteiro (2008), mencionam que mesmo com projetos e detalhamentos cuidadosos, é possível que o concreto armado apresente fissuras devido aos ciclos térmicos e de umidade. Porém, essas fissuras podem ser controladas e as suas aberturas podem ser reduzidas. A fissura por retração térmica pode ser previsível e controlada, mas a extensa fissuração no concreto pode ocorrer devido a outros fatores. As fissuras de assentamento plástico surgem devido à combinação de exsudação e assentamento excessivos com alguma restrição ao movimento do concreto. Para preveni-las, é recomendado reduzir a exsudação, controlar o assentamento e realizar a re-vibração do concreto. Já as fissuras superficiais, conhecidas como fissuras em mapa ou mapeadas, aparecem no concreto endurecido após semanas, especialmente em períodos chuvosos, absorvendo umidade e poluentes da atmosfera. Essas fissuras possuem profundidade mínima, e geralmente não comprometem a estrutura, a menos que evoluam e permitam a entrada de agentes agressivos. Estão associadas a acabamento e cura inadequadas, práticas como o uso de fôrmas impermeáveis ou excesso de desempenamento, que concentram a pasta de cimento na superfície, tornam maior a propensão à retração por secagem. Na Figura 6, três tipos de fissuras causadas por práticas de construção inadequadas são ilustradas.

Figura 6 – Danos causados ao concreto devido á práticas inadequadas



(a) Cobrimento inadequado das armaduras



(b) Adensamento insuficiente



(c) Espaçamento inadequado de juntas

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Como já mencionado, as fissuras podem ser a porta de entrada para agentes

agressivos, esses podem causar diversos problemas, um deles é a corrosão da armadura presente no concreto. Desta forma, realizar ensaios que aceleram o processo corrosivo é de suma importância para compreender os efeitos deste fenômeno.

Graeff (2007) menciona e confirma que os ensaios de corrosão acelerada se mostram como uma ferramenta fundamental, quando se tem o objetivo de compreender como a corrosão afeta as propriedades do aço no concreto ou analisar a progressão e os impactos desse fenômeno. Porém, todo o ensaio acelerado distorce as condições naturais de agressividade, tornando difícil a correlação entre os resultados dos testes e o desempenho natural das estruturas, gerando uma grande incerteza na estimativa da vida útil da construção.

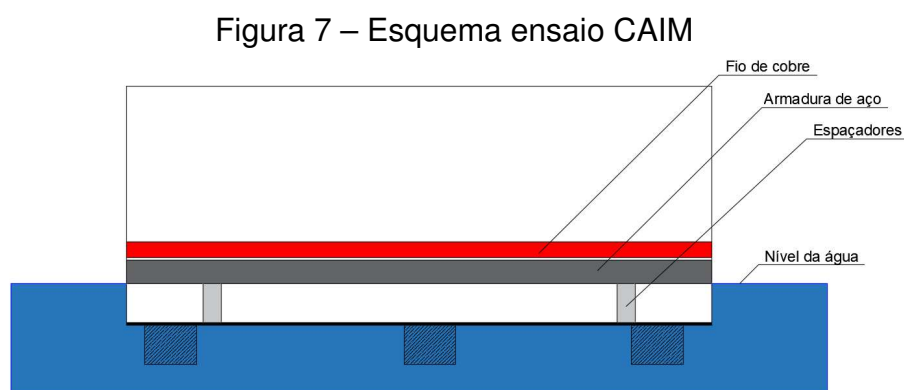
Uma das metodologias mais utilizadas para acelerar o processo da corrosão em elementos de concreto é o ensaio de Corrosão Acelerado por Imersão Modificada, Método CAIM, que foi desenvolvido por pesquisadores do Grupo de Pesquisa LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O ensaio CAIM foi iniciado no LEME por Lima (1990), baseando-se nos estudos de Varela e Espinosa (1988). Inicialmente, o ensaio era realizado em um recipiente de vidro sem fundo que era fixado sobre um corpo de prova utilizando uma massa vedante. Dentro desse recipiente, era colocada uma solução salina de cloreto de sódio (NaCl) a 3,5%, que foi introduzida nesse recipiente, atuando como eletrólito. Uma placa metálica, conectada ao polo negativo de uma fonte de alimentação, e a barra de armadura do corpo de prova, conectada ao polo positivo, formaram os eletrodos da célula eletrolítica. Ao aplicar uma diferença de potencial de 60 volts, induziu-se a migração dos íons cloreto em direção à barra de aço, acelerando o processo de corrosão. Após sete horas de exposição a essas condições, o corpo de prova era fragmentado e a barra de aço submetida a uma análise gravimétrica para determinar a perda de massa, que é diretamente proporcional à taxa de corrosão (TORRES, 2006).

Devido às complexidades associadas à montagem e fixação dos aquários nos ensaios anteriores, os pesquisadores do LEME desenvolveram uma nova abordagem experimental, optaram por imergir os corpos de prova parcialmente em uma solução salina concentrada (35 g/l de NaCl) (TORRES, 2006). Isso permitiu que a umidade penetrasse na amostra de concreto no sentido oposto à gravidade, por meio da ação capilar. Essa condição simula de forma mais precisa o processo de deterioração natural do concreto em estruturas reais. A fim de adaptar o ensaio a diferentes tipos de concreto, como aqueles com porosidade reduzida ou com barras de aço protegidas, foram realizadas modificações na tensão aplicada e na duração do teste. Além disso, para evitar que a corrosão se concentrasse no ponto de contato entre a barra de aço e o fio de conexão, os pesquisadores optaram por isolar eletricamente esses elementos (ADAMATTI, 2016).

O método já foi utilizado, com sucesso, por vários pesquisadores no LEME

(Adamatti (2016); Caetano (2008); Graeff (2007); Jadovski et al. (1992); Kirchheim et al. (2005); Marchesan, Santarosa e Campagnolo (1997); Selistre e Both (1993); Selistre, Gastal e Campagnolo (1994); Stein (2019); Torres (2006)). Torres (2006) expõe que o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada é um ensaio de avaliação visual e de resultado rápido, o que demanda um acompanhamento rigoroso, pois as alterações nos corpos de prova ocorrem rápido. Também é necessário cuidado atento ao posicionar as barras de aço e à cura adequada do concreto. O ensaio consiste em submeter as barras de aço a um processo de corrosão forçada. Isso é feito através da imersão em uma solução salina e da aplicação de uma corrente elétrica, que acelera a entrada de íons de cloreto no aço, iniciando e propagando o processo corrosivo (STEIN, 2019).

O método caracteriza-se pelo estímulo à corrosão através de indução eletroquímica, por meio da aplicação de uma diferença de potencial (ddp) ou de uma corrente elétrica, em um ambiente rico em cloretos. Sendo um método em que há a imersão do elemento de concreto armado na solução de cloreto de sódio, a profundidade de imersão também exerce um papel fundamental na corrosão acelerada. Caso a barra de armadura encontre-se totalmente submersa, não haverá oxigênio disponível para alimentar o processo corrosivo, e, se não houver umidade, não haverá formação do eletrólito para o processo corrosivo. A fim de possibilitar a presença de oxigênio e de umidade, para que se desenvolva o processo corrosivo, o corpo de prova é submerso até a face inferior da armadura longitudinal, conforme representado na Figura 7 (REGINATO, 2020).



Fonte: Adaptado de Stein (2019)

### 2.3 Trabalhos relacionados

Neste capítulo são apresentados estudos relacionados ao efeito do uso de aditivo cristalizante (CA) incorporado no traço do concreto, como o de Tambara (2024) e Carvalho (2024), que foram desenvolvidos na Universidade Federal do Pampa (UNI-PAMPA), assim como artigos internacionais, publicados por Cappellesso et al. (2024) e

Ren et al. (2024).

No trabalho de Tambara (2024), foi avaliado o efeito do CA na autocicatrização de concretos produzidos com CPV ARI - RS, que foram submetidos a pré-carregamentos por compressão aos 7 e 28 dias, com percentual de carregamento de 0%, 50% e 80% do  $f_{ck_{médio}}$ . Os ensaios realizados nessa pesquisa incluíam resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, velocidade de propagação de onda ultrassônica e microscopia óptica. Os resultados indicaram que os concretos com aditivo cristalizante apresentaram melhor desempenho mecânico sem o pré-carregamento. Nos concretos com incorporação de CA e pré-carregados aos 7 e 28 dias, houve um aumento na velocidade ultrassônica, o que indica que ocorreu a reparação de microfissuras nessas amostras. Com relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, os concretos com CA, especialmente os sob condições de pré-carregamento, mostraram uma resistência superior à absorção de água em comparação ao concreto de referência. Para análise de imagem por microscopia óptica, os concretos com CA apresentaram preenchimento parcial das fissuras por meio da precipitação do carbonato de cálcio, diferentemente do concreto de referência que não mostrou autocicatrização significativa. Assim, a pesquisa confirma os benefícios do uso dos aditivos cristalizantes, principalmente quando o objetivo é a autocicatrização.

Carvalho (2024) estudou também a contribuição do CA para a autocicatrização do concreto, com resistência de 30 MPa, os corpos de prova de concreto foram submetidos a microfissuras nas primeiras idades. O autor realizou ensaios de resistência à compressão axial e à tração na flexão, bem como, a corrosão da armadura através do ensaio CAIM. Os resultados mostraram que o uso do CA aumentou a resistência à compressão axial, mas não influenciou na resistência à tração na flexão. Para a proteção contra a corrosão de armadura pelo ensaio CAIM, conclui-se que as barras de aço incorporadas nos concretos com CA apresentaram uma menor perda de massa, indicando um efeito positivo do CA na microestrutura do concreto. No entanto, nessa pesquisa não houve a corrosão esperada pelo autor. Muitos são os fatores que podem ter prejudicado o efeito, como a relação a/c e a absorção de água. Os fios de cobre também podem ter influenciado negativamente, pois foram enrolados na barra de aço de maneira diferente em cada corpo de prova, o que pode ter dificultado o estímulo da migração dos ânions e elétrons do polo negativo (solução salina) ao polo positivo (armadura).

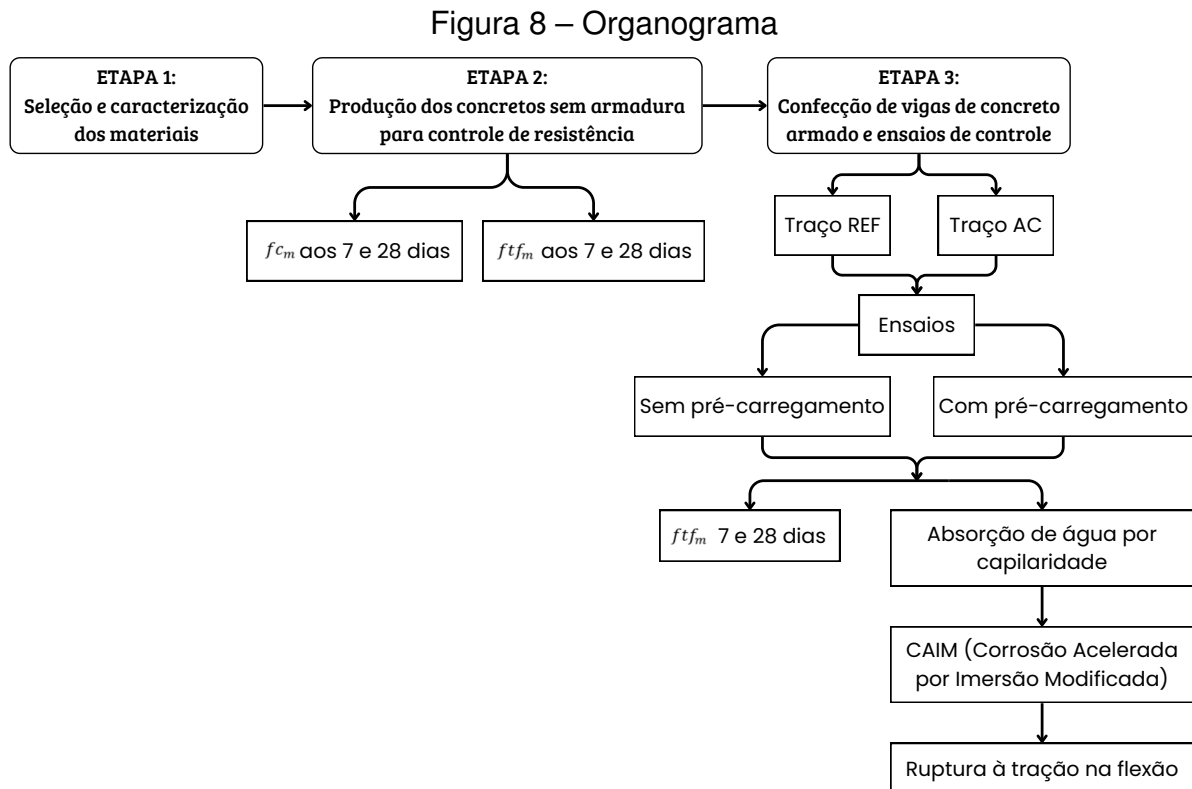
Em uma pesquisa realizada por Cappellesso et al. (2024) que investigou os efeitos de agentes de cura no concreto para aumentar a resistência ao cloreto e prevenir a corrosão, utilizou agentes baseados em bactérias (BAS) e aditivos cristalizantes (CA). Foi realizados dois métodos de condicionamento, algumas amostras foram submetidas a ciclos úmido/seco por três meses (curadas) e outras foram diretamente expostas à água do mar artificial após a criação da fissura (não curadas). Os resultados nas

amostras com agentes BAS mostraram a redução da entrada de cloretos, porém não foram eficazes para prevenir a corrosão em amostras com fissuras. No entanto, as amostras com CA demonstraram melhor desempenho, reduzindo a entrada de cloretos e prevenindo a corrosão em amostras com e sem fissuras, especialmente em amostras curadas e amostras com fissuras de 100  $\mu\text{m}$ . Portanto, conclui-se que os CAs são promissores para a produção de concretos autoreparadores e mais duráveis em ambientes marinhos.

Ren et al. (2024) estudou sobre as propriedades de três aditivos cristalizantes composto por ácido l-aspártico (*LAA*),  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e nano-sílica (*NS*), que foram selecionados pela sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento, reagir rapidamente e preencher de forma eficaz os poros do concreto. Através do método de superfície de resposta foi determinado a dosagem ideal de cada aditivo para obter o melhor efeito de cura do concreto. Os resultados mostraram que a combinação dos aditivos permitiu ao concreto o fechamento de fissuras de até 263  $\mu\text{m}$ , também apresentou maior resistência à penetração de cloretos e sulfatos, agentes que geralmente causam deterioração no concreto. A adição do CA postergou o processo inicial de hidratação do cimento, o que reduziu o risco de fissuras, além de diminuir a porosidade do concreto, tornando a matriz do concreto mais densa. A análise realizada nos materiais mostrou que o carbonato de cálcio é o principal produto da cura inicial, seguidamente intensificado pela etringita e gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Portanto, a pesquisa concluiu que a adição de CA composto por *LAA*,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e *NS* ao concreto melhorou significativamente suas propriedades, durabilidade e resistência a agentes agressivos, sendo eficaz para promover a autocura do concreto. Dessa forma, a utilização do concreto com CA oferece uma solução mais sustentável e durável para as construções.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada na cidade de Alegrete/RS, no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete/RS. A descrição do programa experimental está ilustrado na Figura 8.



Fonte: Elaboração própria (2025)

Como ilustrado na Figura 8, a etapa 1 consistiu em selecionar e fazer a caracterização de todos os materiais que foram utilizados e na etapa 2 foi realizada a produção dos concretos sem a adição de aditivo cristalizante e sem a barra de aço. Nesta etapa, o concreto atingiu a resistência característica de 25 MPa, na idade de 28 dias. Na etapa seguinte, foi realizada a moldagem de vigas de concreto armado do traço de referência e do traço com aditivo cristalizante, sendo que alguns dos corpos de provas moldados receberam pré-carregamento e outros não receberam. Os corpos de prova com barra foram também caracterizados quanto a sua resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias. Após, foi realizado, nos mesmos corpos de prova, a sequência de ensaios mostrada, isto é, absorção de água por capilaridade, ensaio CAIM e, por fim, ensaio de tração na flexão. Essa etapa é melhor detalhada na Figura 10.

#### 3.1 Materiais

Neste item são apresentados os materiais que foram utilizados na pesquisa.

### 3.1.1 Cimento

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) da marca Cauê, foi utilizado para a fabricação do concreto, sendo que a caracterização física, mecânica e química do material foi fornecida pelo fabricante. Optou-se por esse cimento pois conforme a ABNT NBR 16697 (2018), o cimento CPV-ARI é caracterizado por atender os requisitos de alta resistência inicial. De acordo com Ary (2019), cimentos de maior pureza são mais adequados para analisar os impactos dos aditivos cristalizantes nas propriedades dos concretos, visto que não interferem no processo de autocicatrização em combinação com os aditivos.

### 3.1.2 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se a areia natural, proveniente do rio Ibicuí (município de Manoel Viana/RS). O agregado é classificado como areia fina, possuindo dimensão máxima característica de 0,60 mm e módulo de finura de 1,23. Conforme ilustrado na Figura 9, a granulometria do agregado miúdo apresentou valores inferiores ao limite mínimo especificado pelas normas para este tipo de material, seguindo as indicações da ABNT NBR NM 248 (2003). Ainda assim, optou-se por utilizar o agregado devido à dificuldade de se encontrar na região agregados miúdos que atendam os limites da norma de granulometria. Na Tabela 1 é disponibilizada a determinação das massas específicas do agregado e a absorção de água, conforme a ABNT NBR 16916 (2021).

O agregado graúdo utilizado é proveniente do município de Alegrete/RS, classificado com dimensão máxima característica de 19 mm, sendo assim brita 1, e módulo de finura de 7,02. Conforme ilustrado na Figura 9, a granulometria do agregado graúdo apresentou valores dentro dos limites especificados pela norma para este tipo de material, seguindo as indicações da ABNT NBR NM 248 (2003). Na Tabela 2 é disponibilizada a determinação das massas específicas do agregado e a absorção de água, conforme a ABNT NBR 16917 (2021).

Tabela 1 – Caracterização física da areia

Massa específica agregado seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,54
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,55
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1538
Absorção de água (%)	0,16

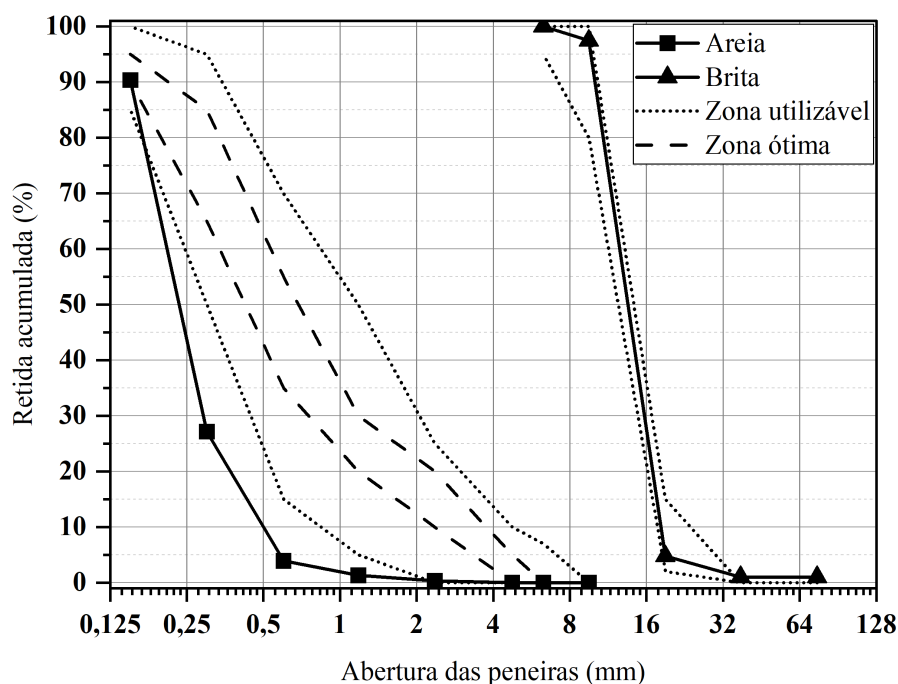
Fonte: Adaptado de Tambara (2024)

Tabela 2 – Caracterização física da brita

Massa específica agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,78
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,80
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,84
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1530
Absorção de água (%)	2,08

Fonte: Adaptado de (TAMBARA, 2024)

Figura 9 – Curva granulométrica da areia e da brita



Fonte: Tambara (2024)

### 3.1.3 Aditivo Cristalizante

Utilizou-se um aditivo cristalizante em pó, PENETRON ADMIX®, adquirido da empresa nacional Penetron Brasil. A incorporação do aditivo ao concreto foi realizada durante a produção das misturas, seguindo as orientações do fabricante para a dosagem do aditivo no cimento com a quantidade de 1,0% em relação à massa de cimento.

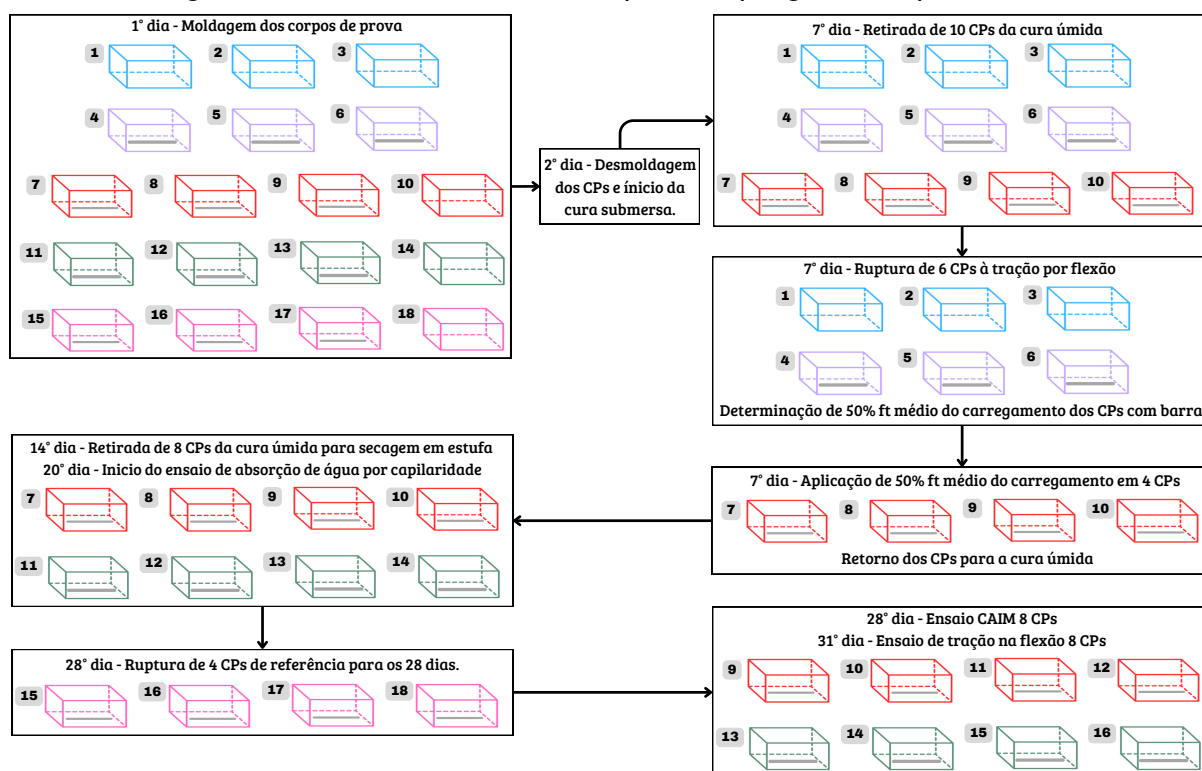
### 3.1.4 Barras de aço

As barras nervuradas de aço CA-50 possuem diâmetro nominal de 10 mm e comprimento de 35 cm. O posicionamento das barras de aço nos moldes respeitaram o cobrimento nominal recomendado pela norma regulamentadora ABNT NBR 6118 (2023).

### 3.2 Preparo e cura dos concretos

A pesquisa foi realizada com base em um traço de concreto com resistência característica de 25 MPa com relação a/c de 0,47. Utilizou-se um traço unitário em massa (1:1,94:3,06), com consumo de 378,58 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Foram realizados dois tipos de traço: traço de referência (TREF), sem aditivo cristalizante, e um traço com aditivo cristalizante (TAC) na dosagem de 1,0% (conforme recomendação do fabricante). A trabalhabilidade dos concretos foi verificada através do ensaio de abatimento de tronco cônico (Slump), seguindo a norma ABNT NBR 16889 (2020). Após a produção dos traços, os corpos de prova foram moldados conforme as orientações da ABNT NBR 5738 (2016) e submetidos a cura úmida, em ambiente controlado.

Figura 10 – Detalhamento da etapa 3 do programa experimental



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na Figura 10, é ilustrada detalhadamente a etapa 3 do programa experimental para um traço. Os processos de produção e ensaios foram os mesmos para ambos os traços deste estudo, diferindo apenas no traço a incorporação do aditivo cristalizante e à inclusão da barra de aço nos corpos de prova. Para o traço de referência (TREF) foram produzidos dezoito corpos de prova prismáticos (CPs), onde três deles não tinham barra nervurada de aço. Já para o traço com aditivo cristalizante (TAC) foram produzidos dezesseis CPs prismáticos, onde todos possuíam barra nervurada de aço.

Um dia após a moldagem, foram retirados os CPs dos moldes e foram colocados em cura úmida. Aos 7 dias, três CPs sem barra de aço e sete CPs com barra de aço do

traço TREF foram retirados da cura submersa, sendo que os três CPs sem barra foram rompidos para o controle de resistência do traço, três CPs com barra foram submetidos a ruptura à tração por flexão para determinar a resistência à tração na flexão média ( $f_{t_{médio}}$ ). Com esse valor médio, foi calculado o percentual de 50%  $f_{t_{médio}}$ , para aplicar carregamento nos outros quatro CPs com barra, com o objetivo de promover danos internos nos concretos (microfissuras) sem levar as amostras ao colapso. O valor do  $f_{t_{médio}}$  ficou estabelecido em 17,35 kN de acordo com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do traço de referência (TREF), discutidos no tópico 4.1.

Na idade de 14 dias, oito CPs com barra de aço foram retirados da cura úmida e colocados em estufa, a uma temperatura de no máximo 50 °C (para não danificar os fios de cobre colocados dentro do concreto), para dar início ao ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo que quatro desses CPs foram pré-carregados aos 7 dias.

Na idade de 20 dias (22 dias no TAC), após atingirem constância de massa, deu-se início ao ensaio. Ao fim do ensaio, os oito CPs voltaram para a câmara úmida e foram submersos em água. Este procedimento de cura submersa tem como objetivo garantir as condições ideais para dar continuidade ao processo de autocicatrização dos concretos pela ação dos aditivos cristalizantes e pela hidratação dos grãos anidros presentes na matriz do concreto.

Na idade de 28 dias, retirou-se doze CPs com barras de aço, onde quatro deles foram designados para o ensaio de resistência à tração na flexão para o controle aos 28 dias. Com os oito CPs restantes, foi realizado o ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada). Após este processo, os oito CPs foram submetidos ao ensaio de resistência à tração da flexão.

### **3.3 Ensaios de Controle**

Aos 28 dias, foi realizada a retirada de todos os CPs da cura submersa para que os ensaios de controle, planejados para esta pesquisa, fossem realizados, sendo eles discutidos nos tópicos 3.3.1 a 3.3.3.

#### **3.3.1 Ensaio de resistência à tração na flexão**

O ensaio para determinação da resistência à tração na flexão foi realizado seguindo a norma (ABNT NBR 12142, 2010). Este ensaio consiste em aplicar uma carga de tração por meio de quatro pontos, dois deles são pontos de apoio e os outros são os pontos de aplicação da carga. De acordo com a norma, existem dois tipos de ruptura que podem acontecer, a ruptura no terço médio e a ruptura fora do terço médio, dependendo do tipo de ruptura é utilizada uma equação para calcular a resistência à tração. Nesta pesquisa todos os corpos de prova tiveram ruptura no terço médio.

Utilizou-se um corpo de prova prismático com dimensões de 10x10x40 cm

(espessura x altura x comprimento) e o ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica da marca EMIC, do laboratório de Materiais da UNIPAMPA (Figura 11). O objetivo do ensaio era avaliar a resistência do traço de concreto produzido e induzir microfissuras nas primeiras idades de acordo com o ( $f_{t\text{médio}}$ ).

Figura 11 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Elaboração própria (2025)

### 3.3.2 Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 9779 (2012). A realização deste ensaio mostrou-se crucial para a avaliação da durabilidade e da resistência do concreto, uma vez que a bibliografia estudada no tópico 2 indicou que a absorção excessiva de água pode acelerar o processo de deterioração e desgaste do concreto.

Para a realização deste ensaio foram moldados oito CPs prismáticos de cada traço, sendo ensaiados na idade de 20 dias (TAC - 22 dias). A realização deste ensaio consistiu em deixar os CPs em cura úmida e na idade de 14 dias colocá-los na estufa a uma temperatura de no máximo 50 °C (para não danificar os fios de cobre colocados dentro do concreto), sendo pesados a cada 24 h para verificar quando atingissem a constância de massa. Após atingirem constância de massa, os CPs foram retirados da estufa e mantidos em temperatura ambiente e, depois de algumas horas, foram pesados após serem secos em estufa.

O ensaio consistiu em adicionar os CPs em um recipiente com uma lâmina de água de 5 mm. Para ajudar na verificação do nível da lâmina de água durante o ensaio, foi feita uma marcação de caneta no próprio CP, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Marcação do nível d'água no CP



Fonte: Elaboração própria (2025)

O corpo de prova foi posicionado no recipiente horizontalmente, de modo que a parte inferior ficasse submersa, como mostrado na Figura 13. Em 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h, foi anotada a massa de cada CP, enxugando a base que estava em contato com a água e posicionando o CP na balança. Após a pesagem, o CP era devolvido para o recipiente e a lâmina de água de 5 mm era verificada e repostada. Ao fim do ensaio, os oito CPs voltaram para a câmara úmida para a cura submersa.

Figura 13 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria (2025)

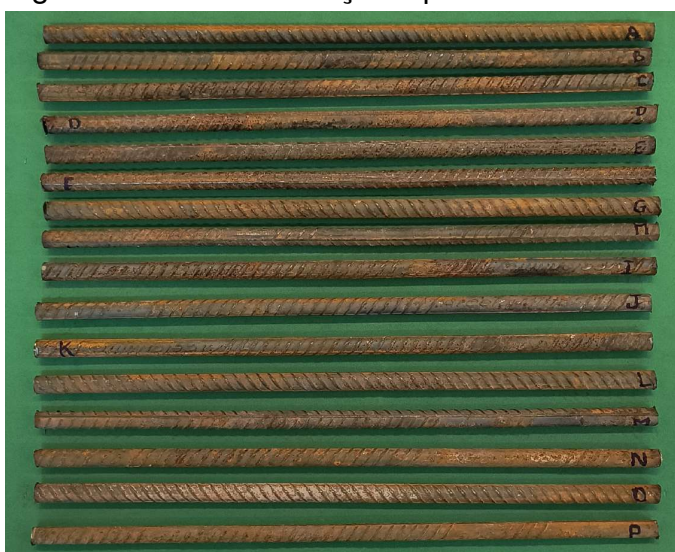
### 3.3.3 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

O ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) é utilizado na avaliação do efeito da corrosão das barras de aço, através de uma medição da perda de massa da mesma após o ensaio. Também permite o acompanhamento da evolução da corrente relacionada aos processos de corrosão, essencial para avaliar a dinâmica do processo. Não há uma norma brasileira específica para o ensaio CAIM, no entanto, há normas internacionais reconhecidas. Portanto, considera-se que esta é uma técnica interessante e com grande potencial de utilização para avaliação da degradação provocada pela corrosão em estruturas de concreto armado. (TRINDADE, 2013)

Antes da concretagem dos traços, as barras devem ser limpas com auxílio de escovas de aço, para retirar todas as impurezas que possam estar presentes e que possam afetar a determinação do peso inicial. Logo, antes de colocar as barras de aço nas fôrmas, foi realizada a identificação e a pesagem das mesmas, para que no final do ensaio seja feita a comparação do peso antes e após a corrosão do material. Na Figura 14 são mostradas todas as barras de aço limpas e identificadas que serão utilizadas nessa pesquisa.

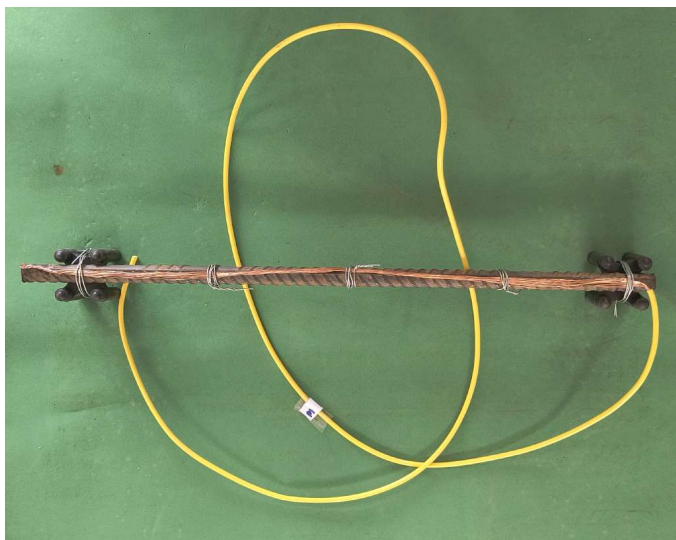
É necessário, antes da moldagem dos corpos de provas, posicionar acima da barra de aço um fio de cobre, usado para realizar instalações elétricas, de seção 1,5 mm<sup>2</sup>; a parte do fio que ficar em contato com a barra deve estar desencapado (Figura 15) e o restante deve ser deixado para fora da forma (Figura 16), para que, na realização do ensaio, este sirva de polo positivo da fonte.

Figura 14 – Barras de aço limpas e identificadas



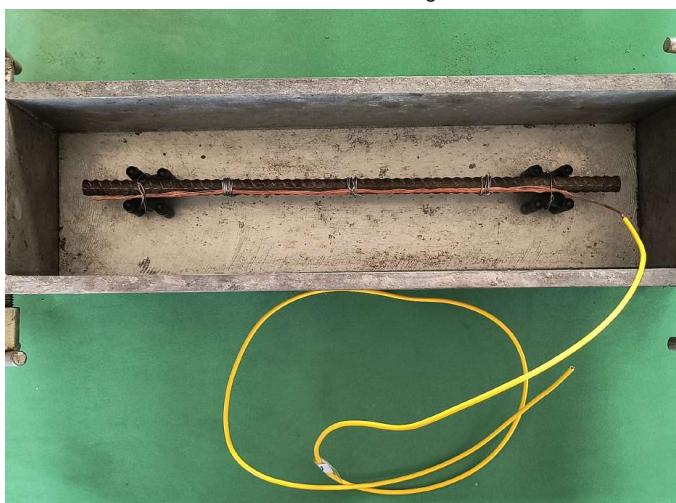
Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 15 – Fio de cobre posicionado acima da barra de aço



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 16 – Posicionamento da barra de aço com o fio de cobre na forma

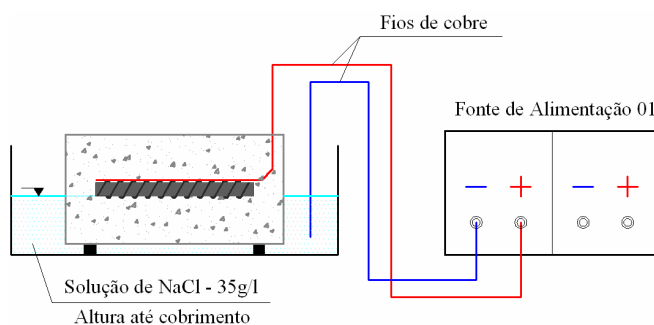


Fonte: Elaboração própria (2025)

Na Figura 17, é ilustrado este esquema de ligação dos corpos de prova com a fonte de alimentação. A fim de acelerar o ensaio, foi necessário adotar a prática de conectar os corpos de prova em série (Figura 18). Essa configuração permitiu submeter duas amostras ao ensaio de forma simultânea.

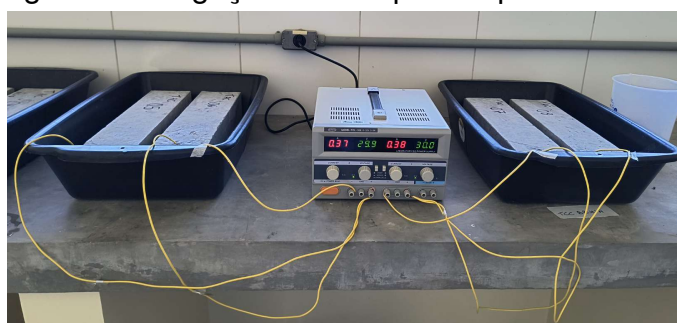
Para este ensaio, foi necessário a moldagem de oito corpos de provas com barra de aço com diâmetro de 10 mm e comprimento de 35 cm. Aos 20 dias (TAC - 22 dias), oito corpos de provas com barra de aço submetem-se ao ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo que apenas quatro destes foram pré-carregados. Após a realização do ensaio e a cura submersa, estes mesmos oito CPs iniciam o ensaio CAIM (aos 28 dias).

Figura 17 – Esquema do ensaio CAIM



Fonte: Graeff (2007)

Figura 18 – Ligação dos corpos de prova na fonte



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para a preparação do sistema de funcionamento do ensaio, primeiramente deve-se realizar a pesagem do volume de água, sendo que a quantidade de água seja suficiente para que o nível da água permaneça no mesmo nível da barra de aço, como é detalhado na Figura 17, tendo o volume de água foi calculado a quantidade de sal para a composição da solução. Torres (2006), Trindade (2013) e Stein (2019), em seus trabalhos utilizam 35 g de NaCl por litro de água, para simular um ambiente salino agressivo encontrado nas águas do Oceano Atlântico. Para verificar o nível da solução salina durante o ensaio, os CPs foram marcados, aproximadamente, na base da barra de aço (Figura 19), para que durante o ensaio, a solução se mantivesse no mesmo nível, sem ultrapassar tanto e sem estar muito abaixo do nível.

Figura 19 – Marcação do nível da solução salina para o ensaio CAIM

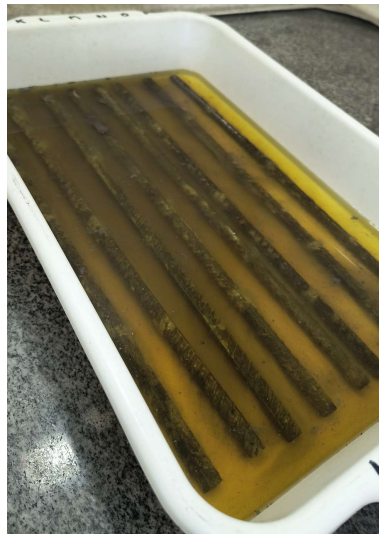


Fonte: Elaboração própria (2025)

A fim de acelerar a penetração de íons cloreto no concreto e induzir a corrosão das armaduras de aço, é aplicada uma diferença de potencial elétrico, utilizando uma fonte de alimentação modelo FA-3005, simulando as condições reais de um ambiente corrosivo. O ensaio foi definido para ser realizado em 48 horas. Após, os CPs foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão e foram retiradas as barras de aço.

Em seguida, as barras de aço passaram pelo processo de limpeza, segundo recomendado pela ASTM A 380 (1996) as barras devem permanecer 45 minutos imersas em uma solução com 580 g de ácido clorídrico, 3,5 g de hexametilenoctetramina e água até se completar um litro de solução, como mostrado na Figura 20. Após esta etapa, deve-se lavar com água corrente (Figura 21) e, posteriormente, secar em estufa a 45 °C por 45 minutos (Figura 22), para que toda a água evapore. Após este processo, coloca-se as barras em temperatura ambiente (Figura 23) e, após resfriamento, a sua massa é determinada.

Figura 20 – Barras de aço imersas na solução de limpeza



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 21 – Limpeza das barras em água corrente



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 22 – Barras na estufa



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 23 – Barras limpas e secas em estufa



Fonte: Elaboração própria (2025)

## 4 RESULTADOS

Neste item estão apresentados e são analisados os resultados encontrados nos ensaios de controle realizados para o concreto referência e para o concreto com aditivo cristalizante.

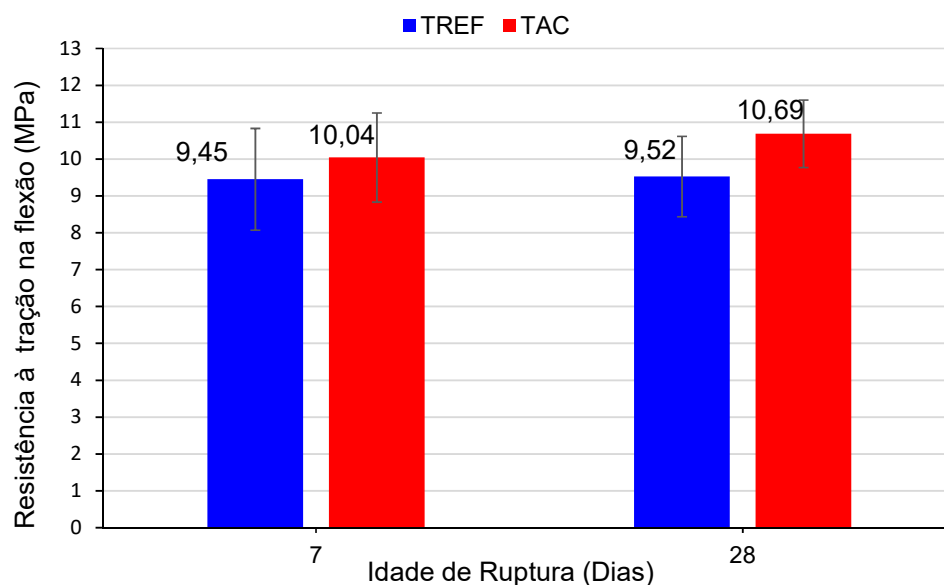
### 4.1 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi avaliada de acordo com as recomendações normativas da ABNT NBR 12142 (2010). É importante ressaltar que em todas as idades em que o ensaio foi realizado a primeira fissura sempre ocorreu no terço médio.

Na Figura 24 são apresentados os resultados médios da resistência à tração na flexão para os traços TREF e para o TAC, para o controle nas idades de 7 e 28 dias. Estes traços são diferenciados somente pela incorporação do aditivo cristalizante e permaneceram íntegros para servirem como referência. Ou seja, não foram submetidos a danos (microfissuras) nas primeiras idades.

Como mostrado na Figura 24 com o aumento da idade (7 para 28 dias) há também um aumento de 0,74% da propriedade avaliada no traço de referência, mostrando um comportamento esperado para matrizes cimentícias. Na idade de 7 dias e 28 dias, os concretos com a incorporação do aditivo cristalizante (TAC) também apresentam um aumento da propriedade avaliada (7 para 28 dias), um aumento de 5,19%, além de apresentarem um comportamento de melhor desempenho que o traço de referência (TREF).

Figura 24 – Gráfico resistência média de tração na flexão dos traços TREF e TAC, não submetidos ao pré-carregamento



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para uma melhor avaliação dos resultados desse ensaio, a resistência à tração e a influência do uso do aditivo cristalizante, foi feita uma análise estatística (ANOVA) global utilizando o *software Statística 7.0*, com um nível de confiança de 95%. Valores de probabilidade ( $p$ ) inferiores a 0,05 nas comparações entre médias indicam, de forma estatisticamente significativa, a existência de diferenças entre os parâmetros analisados.

Tabela 3 – Análise estatística da resistência à tração

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	1579,101	1	1579,101	1510,536	0,000	-
Aditivo Cristalizante	4,073	1	4,073	3,853	0,071	Não
Idade do Ensaio	0,206	1	0,206	0,195	0,666	Não
Erro	13,745	13	1,057			

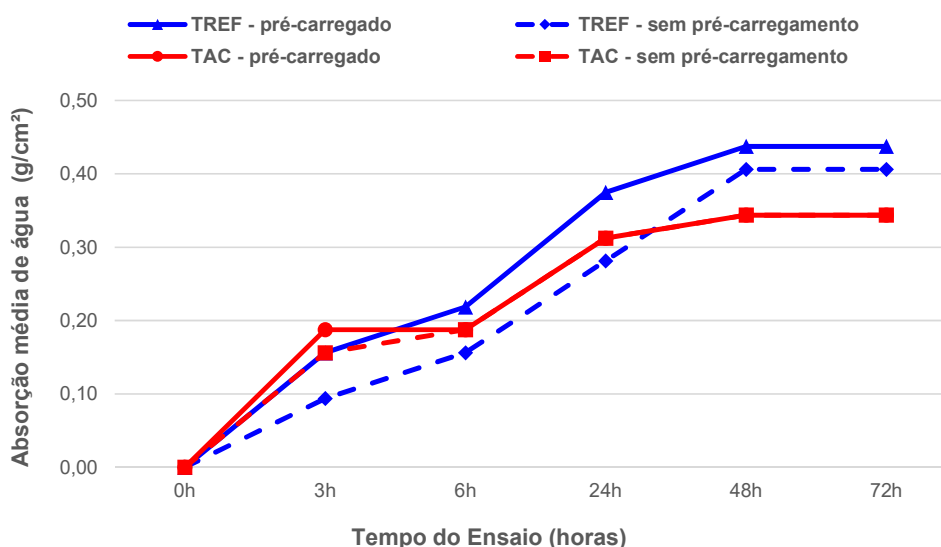
Onde: SQ - Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ - Médias Quadradas; p - significância.  
Fonte: Elaboração própria (2025)

Analisando a Tabela 3, é possível observar que as variáveis independentes não apresentaram significância para a variável dependente estudada. Portanto, matematicamente, não ocorreram diferenças entre os resultados.

## 4.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi avaliada de acordo com recomendações normativas da ABNT NBR 9779 (2012). Na Figura 25 são mostrados os resultados do ensaio que foram realizados nos concretos íntegros e nos concretos submetidos ao pré-carregamento dos traços TREF e TAC na idade de controle de 23 dias.

Figura 25 – Gráfico absorção de água para o TREF e TAC



Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com a Figura 25, é possível analisar que o TREF pré-carregado obteve uma absorção de água maior que o TAC pré-carregado a partir das 6h de ensaio, ou seja, a incorporação do aditivo cristalizante ajudou no fechamento das microfissuras. Os resultados do ensaio demonstraram a capacidade do aditivo cristalizante em diminuir a absorção por capilaridade do concreto, tendo uma diferença de absorção de aproximadamente  $0,10 \text{ g/cm}^2$  a menos que o TREF. Como mostrado na revisão bibliográfica deste trabalho, é esperado que o processo de cristalização intensifique ao longo do tempo na medida em que os componentes do aditivo continuarem reagindo gradativamente com a umidade e os produtos de hidratação do cimento, o que favorecerá resultados menores de absorção de água em idades mais avançadas.

Ao longo do ensaio, foi possível perceber, a olho nu, a capilaridade da água e em que parte do CP mais era absorvida água. Nas Figuras 26 e 27 é ilustrado esse comportamento após 72 horas para o traço de referência, enquanto as Figuras 28 e 29 apresentam estes resultados, no mesmo intervalo de tempo, para o traço com adição do aditivo cristalizante. Portanto, é possível observar que no traço TREF com pré-carregamento a absorção de água por capilaridade foi maior do que nas outras condições e traços.

Figura 26 – Absorção de água em 72h TREF PC



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 27 – Absorção de água em 72h TREF sem PC



Fonte: Elaboração própria (2025)

Com o objetivo de avaliar a influência das variáveis controladas sobre o desempenho do experimento, a idade do concreto, o percentual de carregamento e o uso de aditivo cristalizante, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) global utilizando o *software Statistica 7.0*, com nível de confiança de 95%. Valores de probabilidade ( $p$ ) inferiores a 0,05 nas comparações entre médias indicam, de forma estatisticamente significativa, a existência de diferenças entre os parâmetros analisados. Na Tabela 4 estão presentes os resultados dessa análise para os resultados de 72 horas de ensaio.

Figura 28 – Absorção de água em 72h TAC PC



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 29 – Absorção de água em 72h TAC sem PC



Fonte: Elaboração própria (2025)

Tabela 4 – Análise estatística da Absorção de água por Capilaridade

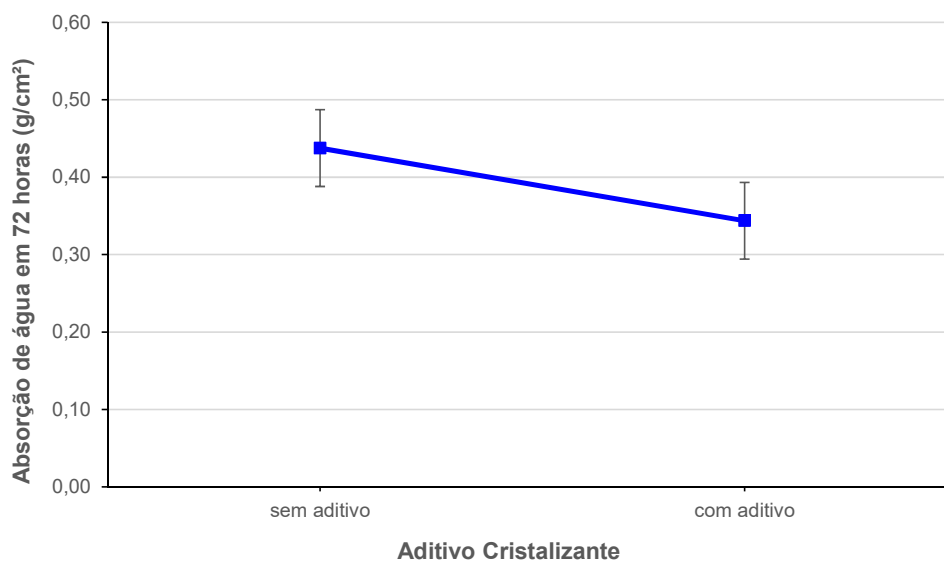
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	2,441	1	2,441	580,357	0,000	-
Pré-carregamento	0,000	1	0,000	0,000	1,000	Não
<b>Aditivo Cristalizante</b>	<b>0,035</b>	<b>1</b>	<b>0,035</b>	<b>8,357</b>	<b>0,012</b>	<b>Sim</b>
Erro	0,054	13	0,004			

Onde: SQ - Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ - Médias Quadradas; p - significância.

Fonte: Elaboração própria (2025)

A análise indica duas variáveis independentes (pré-carregamento e o uso do aditivo cristalizante) e uma variável dependente (absorção de água por capilaridade). Para os concretos estudados, o uso do AC apresentou significância para a variável dependente, ou seja, matematicamente influenciou nos resultados, melhorando a propriedade estudada (absorção de água por capilaridade). A variável pré-carregamento não apresentou significância, uma vez que o valor de p foi maior do que 0,05, ou seja, não influenciou nos resultados. Na Figura 30 é mostrado o efeito isolado da variável independente aditivo cristalizante na propriedade de absorção de água em 72 horas ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ). Em suma, ao analisar os dados da Tabela 4 e da Figura 30, o uso do aditivo cristalizante promoveu uma redução significativa na absorção de água das misturas investigadas.

Figura 30 – Efeito isolado do Aditivo Cristalizante na absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria (2025)

### 4.3 Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

O ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM) foi realizado aos 28 dias de idade e com o objetivo de avaliar a resistência a corrosão das barras de aço de 10 mm CA-50, em meio a um ambiente agressivo simulado. Além de avaliar se o uso do aditivo cristalizante influenciava nessa resistência. Os CPs ficaram expostos na solução salina por 48 h, sendo que a tensão estipulada foi de 30 V, pois, como visto na bibliografia, voltagens acima disso não condizem com a realidade. Com relação a corrente, como foram utilizadas três fontes distintas, a corrente variou para o TREF de 0,39 a 0,43 A (amperes) e para o TAC de 0,37 a 0,40 A (amperes). Os resultados de perda de massa das barras após o ensaio CAIM são apresentados nas Tabelas 5 (TREF) e 6 (TAC).

Tabela 5 – Perda de massa das barras de aço do traço de referência

	Barras	Massa antes ensaio (g)	Massa após ensaio (g)	Perda de massa (%)	<b>Perda de massa média (%)</b>
PC	A	214,3	209,4	2,34	<b>2,05</b>
	B	215,1	209,8	2,53	
	F	214,3	210,6	1,76	
	H	211,4	208,2	1,54	
Sem PC	C	215,7	211,9	1,79	<b>1,68</b>
	D	213,8	210,5	1,57	
	E	213,3	210,3	1,43	
	G	214,6	208,5	2,93	

Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com a Tabela 5, a maior perda de massa média é das barras em que os CPs foram submetidos ao pré-carregamento aos 7 dias. Sendo assim, somente a propriedade do concreto de se auto regenerar não foi capaz de fechar as microfissuras.

Tabela 6 – Perda de massa das barras de aço do traço com aditivo cristalizante

	Barras	Massa antes do ensaio (g)	Massa após o ensaio (g)	Perda de massa (%)	<b>Perda de massa média (%)</b>
PC	I	213,2	208,7	2,16	<b>2,10</b>
	J	210,2	206,0	2,04	
	M	211,7	208,3	1,63	
	N	213,1	208,2	2,35	
Sem PC	K	213,9	210,0	1,86	<b>1,94</b>
	L	212,2	208,0	2,02	
	O	213,6	209,1	2,15	
	P	212,5	208,6	1,87	

Fonte: Elaboração própria (2025)

Analisando a Tabela 6, observa-se também que a maior perda de massa média é das barras em que os CPs foram submetidos ao pré-carregamento, reafirmando a tendência de comportamento observada no TREF. De modo geral, ao comparar os dados das Tabelas 5 e 6, percebe-se que os CPs submetidos ao pré-carregamento apresentaram maior média de perda de massa em relação aos concretos que não foram microfissurados.

Além disso, é possível observar que a média das perdas de massa do TAC é maior do que a do TREF, para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global utilizando o *software Statistica 7.0*, com nível de confiança de 95%. Valores de probabilidade (p) inferiores a 0,05 nas comparações entre médias indicam, de forma estatisticamente significativa, a existência de diferenças entre os parâmetros analisados. Na Tabela 7 estão presentes os resultados dessa análise.

Tabela 7 – Análise estatística da perda de massa das barras de aço

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	278,890	1	278,890	351,144	0,000	-
Aditivo Cristalizante	0,002	1	0,002	0,003	0,956	Não
Pré-carregamento	0,122	1	0,122	0,154	0,700	Não
Erro	10,325	13	0,794			

Onde: SQ - Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ - Médias Quadradas; p - significância.

Fonte: Elaboração própria (2025)

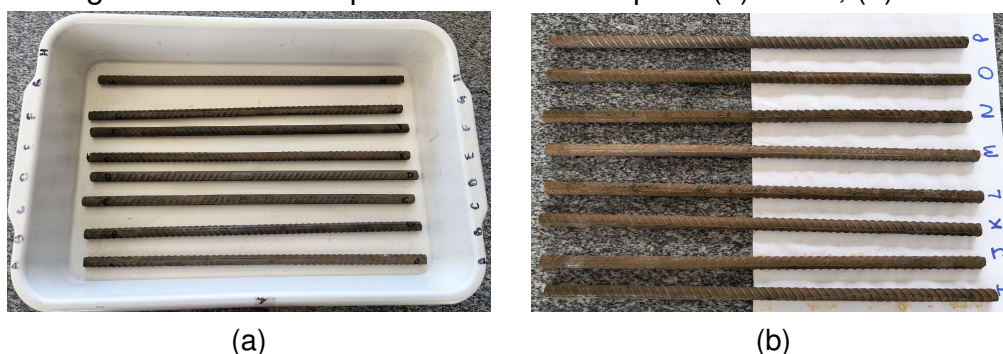
A análise ANOVA mostrou que os parâmetros independentes (aditivo cristalizante e pré-carregamento) não influenciaram na perda de massa das barras de aço pelo ensaio de corrosão acelerado, ou seja, não foi possível observar diferenças estatísticas significativas.

Estudos, como o de Wang e Ueda (2011), demonstram que quanto maior a abertura de fissura, mesmo que seja mínima, maior a taxa de penetração de cloretos e concluem que fissuras com abertura superior a 0,05 mm já comprometem significativamente a durabilidade da estrutura frente à corrosão de armaduras. Estes mesmos autores demonstraram que o aumento da carga aplicada favorece a penetração de íons de cloretos, enquanto Venquiaruto (2016) reforça que a presença de microfissuras geradas por esse carregamento reduz a resistência do concreto à ação de agentes agressivos, o que acelera os processos de degradação.

Além disso, observou-se que o traço com aditivo cristalizante apresentou uma perda de massa maior do que o traço de referência (TREF). Embora essa diferença não tenha sido significativa, os resultados sugerem que a ação do cristalizante pode não ter sido eficiente para a colmatação das microfissuras, a ponto de influenciar de forma expressiva no resultado do ensaio. A autora Ziegler (2020) conclui que o aditivo cristalizante deveria fazer um fechamento mais expressivo ou até mesmo completo da fissura para evitar a corrosão, pois selagens parciais não são suficientes para impedir completamente o avanço dos agentes agressivos.

Nas Figuras 31 (a) e 31 (b), é mostrado o aspecto das barras de aço após o ensaio e após a limpeza.

Figura 31 – Barras após o ensaio e a limpeza (a) TREF, (b) TAC



Fonte: Elaboração própria (2025)

Algumas hipóteses foram geradas e que podem ter influenciado para que as barras não mostrassem diferenças significativas na perda de massa, entre elas a relação água/cimento e a absorção de água, que estão relacionados entre si. Torres (2006) aplicou o ensaio CAIM em suas pesquisas com uma tensão maior do que 30 V e concluiu que, para os corpos de prova de concreto que foram confeccionados com relação a/c de 0,50, a degradação das barras de aço foi baixíssima em tensões menores que 45 V em 48 horas, o que comprova os resultados encontrados nesta pesquisa.

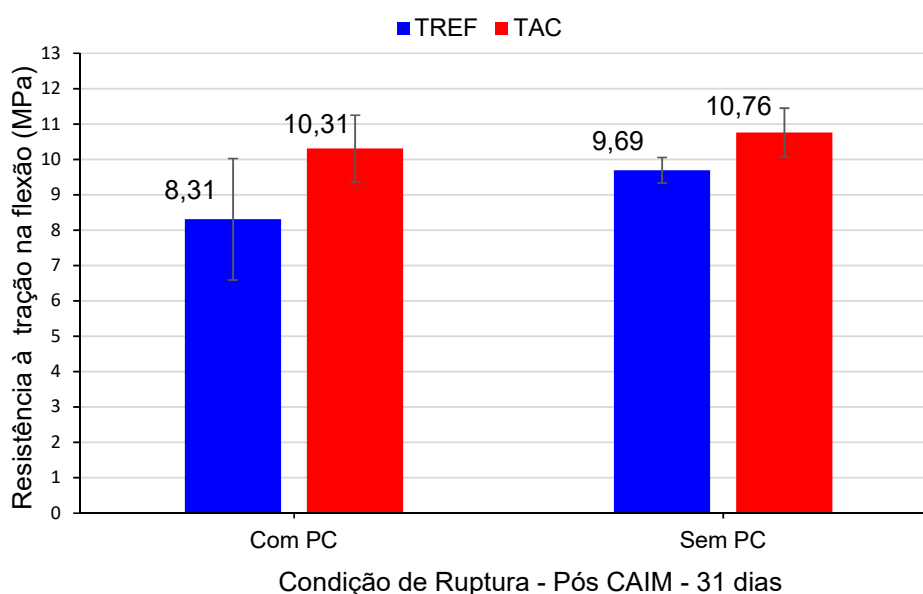
Com relação ao nível de absorção de água, Helene (1983) estabelece que os concretos com absorção de água menor ou igual a 4,2% são classificados como

duráveis e de alto desempenho. Neste estudo, o traço de referência que foi submetido ao pré-carregamento apresentou uma absorção de água média de apenas 1,74% e o traço com aditivo cristalizante submetido ao pré-carregamento apresentou uma absorção média de 1,40%. Esse baixo índice de absorção indica uma baixa permeabilidade do concreto, o que possivelmente dificultou a penetração da solução salina (NaCl) até as barras de aço, explicando a baixa corrosão observada nas armaduras.

#### 4.4 Resistência à tração na flexão após ensaio CAIM

Este ensaio também tinha o objetivo de analisar o quanto e se o processo corrosivo influenciava na perda de resistência. Para analisar isso, os dois traços, submetidos e não submetidos ao pré-carregamento (PC), após o ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), na idade de controle de 31 dias, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão. Na Figura 32, são mostrados os resultados dessa análise.

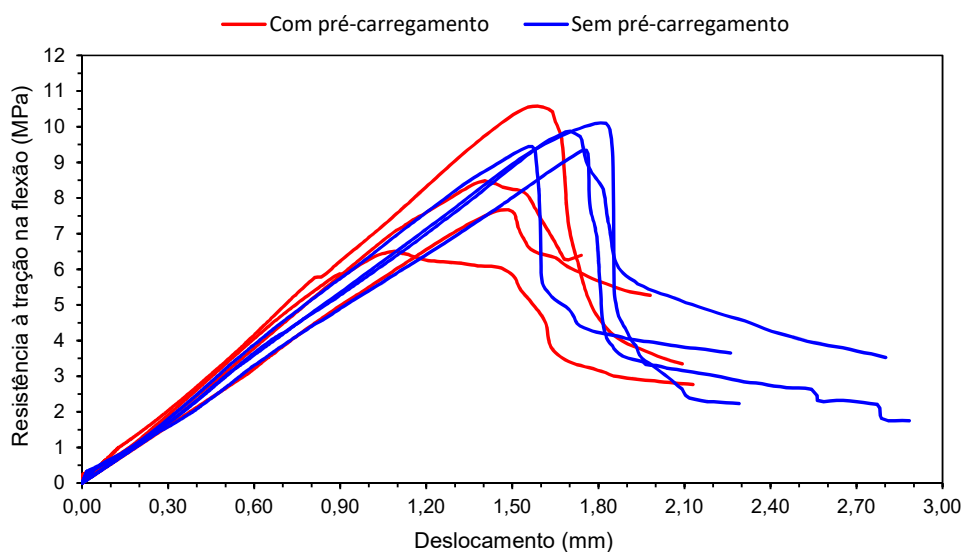
Figura 32 – Gráfico resistência média de tração na flexão dos traços TREF e TAC, submetidos e não submetidos ao pré-carregamento (PC), após o ensaio CAIM



Fonte: Elaboração própria (2025)

De acordo com a Figura 32, o TREF mostrou uma queda na resistência quando foi submetido ao pré-carregamento. Já no TAC com PC, a resistência diminuiu pouquíssimo, mas não prejudicou significativamente a propriedade avaliada, mostrando que o aditivo cristalizante ajudou a manter a resistência. Na Figura 33 e 34 são mostrados os resultados para cada traço e de cada CP avaliado.

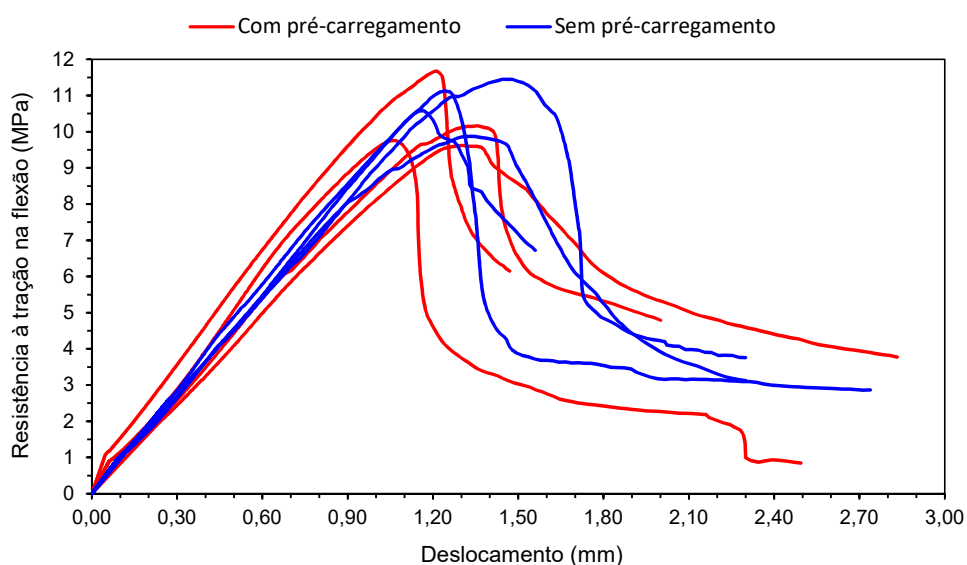
Figura 33 – Gráfico resistência x deslocamento vertical dos corpos de prova do TREF após o ensaio CAIM



Fonte: Elaboração própria (2025)

A Figura 33 detalha os CPs do traço referência, sendo possível analisar que os CPs pré-carregados tiveram um deslocamento médio máximo de 1,37 mm, já os CPs que não foram pré-carregados obtiveram um deslocamento médio máximo de 1,71 mm. A resistência média dos CPs pré-carregados foi de 8,31 MPa e dos CPs que não foram pré-carregados foi de 9,69 MPa.

Figura 34 – Gráfico resistência x deslocamento vertical dos corpos de prova do TAC após o ensaio CAIM



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na Figura 34 que detalha os CPs do traço com aditivo cristalizante, é possível analisar que os CPs que foram pré-carregados tiveram um deslocamento médio máximo

de 1,24 mm, já os CPs que não foram pré-carregados obtiveram um deslocamento médio máximo de 1,29 mm. Dessa forma, não foi observada uma diferença significativa. O mesmo aconteceu com a resistência, sendo que a média da resistência dos CPs pré-carregados foi de 10,31 MPa e dos CPs que não foram pré-carregados foi de 10,76 MPa, ou seja, a condição de ruptura não prejudicou significativamente. Logo, o aditivo cristalizante ajudou a manter a resistência.

Para avaliar a influência das variáveis dependentes (pré-carregamento e aditivo cristalizante), foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) global utilizando o *software Statistica 7.0*. Da mesma forma, valores de probabilidade (p) inferiores a 0,05 nas comparações entre médias indicam, de forma estatisticamente significativa, a existência de diferenças entre os parâmetros analisados. Na Tabela 8 estão presentes os resultados dessa análise.

Tabela 8 – Análise estatística da resistência à tração pós CAIM

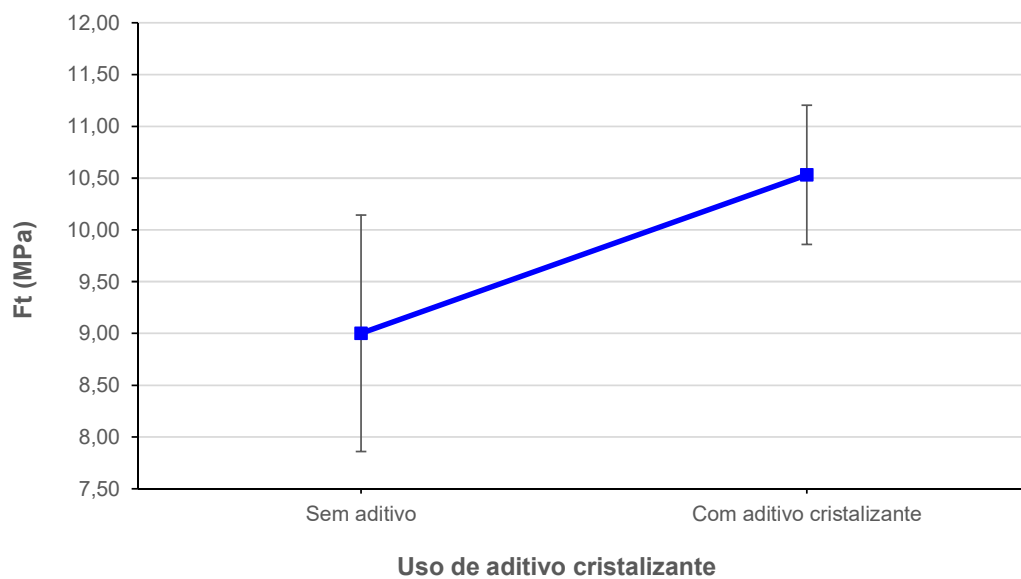
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	1526,275	1	1526,275	1396,033	0,000	-
Pré-carregamento	3,379	1	3,379	3,091	0,102	Não
<b>Aditivo Cristalizante</b>	<b>9,368</b>	<b>1</b>	<b>9,368</b>	<b>8,568</b>	<b>0,011</b>	<b>Sim</b>
Erro	14,213	13	1,093			

Onde: SQ - Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ - Médias Quadradas; p - significância.  
Fonte: Elaboração própria (2025)

A análise indica duas variáveis independentes (pré-carregamento e o uso do aditivo cristalizante) e uma variável dependente (resistência após o CAIM). Para os concretos estudados, após o ensaio CAIM (31 dias de idade), é possível observar que entre as variáveis independentes estudadas, o uso do aditivo cristalizante apresentou significância para a variável dependente estudada, ou seja, matematicamente influenciou nos resultados, melhorando a propriedade estudada. A variável pré-carregamento não apresentou significância, uma vez que o valor de p foi maior do que 0,05, ou seja, não influenciou nos resultados, mas um tempo de cura mais prolongado poderia potencializar ainda mais a propriedade estudada, pela ação do cristalizante e hidratação de grãos anidros. Na Figura 35 é mostrado o efeito isolado da variável independente (aditivo cristalizante) na propriedade dependente (resistência à tração após CAIM).

Em suma, ao analisar a Figura 35 observa-se o efeito significativo do aditivo cristalizante no ganho de resistência à tração. Assim, o aditivo influenciou matematicamente os resultados do ensaio, promovendo aumento da resistência dos concretos.

Figura 35 – Efeito isolado do Aditivo Cristalizante na resistência à tração após CAIM



Fonte: Elaboração própria (2025)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item apresenta-se as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do aditivo cristalizante na autocicatrização de microfissuras induzidas, considerando a reparação de propriedades mecânicas de tração na flexão (antes e após o ensaio CAIM), absorção de água por capilaridade e corrosão da armadura.

Com relação à resistência à tração na flexão, os resultados mostraram que a adição do aditivo cristalizante no concreto contribuiu para um desempenho mecânico ligeiramente superior ao do traço de referência. Embora as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas, observou-se uma tendência de melhora, indicando que o aditivo contribuiu para uma maior integridade mecânica do concreto.

A absorção de água por capilaridade apresentou redução significativa quando incorporado o aditivo cristalizante, mesmo em CPs submetidos ao pré-carregamento, o que enfatiza a atuação do material no selamento dos poros e microfissuras. A diferença entre os valores foi estatisticamente significativa, reforçando o papel do aditivo na diminuição da permeabilidade e na proteção frente à penetração de agentes agressivos.

Os resultados do ensaio CAIM indicaram que o traço de referência apresentou maior perda de massa nas armaduras em comparação ao traço com aditivo cristalizante, sobretudo nas amostras submetidas ao pré-carregamento. No entanto, os valores de  $p$  obtidos não indicaram significância estatística. Ainda assim, identificou-se uma tendência de mitigação da corrosão nas amostras com aditivo, possivelmente associada à colmatação parcial das fissuras e à limitação do acesso de cloretos à armadura.

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão, após o ensaio CAIM, apresentou resultado estatisticamente significativo quanto ao uso do aditivo, o que indica sua eficácia na preservação da integridade estrutural mesmo após a exposição a ambientes agressivos. Os CPs submetidos ao pré-carregamento, por sua vez, não demonstraram influência significativa.

Diante dos resultados obtidos e analisados, conclui-se que o aditivo cristalizante apresentou desempenho positivo no processo de autocicatrização e na conservação das propriedades do concreto armado. Em suma, verificou-se maior eficácia do aditivo na redução da permeabilidade e na preservação da resistência após exposição à corrosão, reforçando seu potencial como alternativa eficaz para aumentar a durabilidade de estruturas de concreto em ambientes agressivos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Estudar o desempenho do aditivo cristalizante em períodos superiores a 90 dias;
- Estudar concretos com diferentes tipos de cimento e diferentes incorporações de aditivos cristalizantes;
- Ensaio CAIM com concretos com relação a/c menores e diferentes;
- Estudar a corrosão acelerada em diferentes idades de controle a fim de verificar a eficácia da ação do aditivo cristalizante na colmatação das microfissuras.

## REFERÊNCIAS

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **REPORT ON CHEMICAL ADMIXTURES FOR CONCRETE, ACI 212.3R-19**. Farmington Hills, MI, EUA, 2010. 7 p.

ACKER, P.; TORRENTI, J. M.; GUÉRINET, M. Controle da fissuração nas primeiras idades: condição de durabilidade das obras de concreto. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. [S.l.]: São Paulo. IBRACON, 2014. ISBN 978-85-98576-22-0.

ADAMATTI, D. S. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: Impacto da Corrosão por Íons Cloreto em Diferentes Condições de Exposição**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

ALPES, E. de T. A. Influência dos aditivos cristalizantes na impermeabilização do concreto com a utilização de materiais da região de goiânia. **Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG), Toledo, 2019.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment and systems (Revision). ASTM A 380. Philadelphia, 1996.

ARY, C. A. Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto. **Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2019.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142: Concreto - determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismático**. NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. NBR 9779. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697: Cimento Portland -Requisitos**. NBR 16697. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16889: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR 16889. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 16916: Agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16916. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16917: Agregado graúdo - determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16917. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2023.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. [S.l.]: São Paulo. IBRACON, 2014. ISBN 978-85-98576-22-0.

BELIE, N. D. et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures. In: **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, p. 28, 2018. ISSN 21967350.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

CAETANO, L. F. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

CAPPELLESSO, V. G. et al. Self-healing concrete with a bacteria-based or crystalline admixture as healing agent to prevent chloride ingress and corrosion in a marine environment. In: **Developments in the Built Environment**, Elsevier Ltd, v. 19, p. 23, 10 2024. ISSN 26661659.

CARVALHO, G. V. Avaliação da autocicatrização de concretos microfissurados com aditivo cristalizante e submetidos a ambiente agressivo. **Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete, 2024.**

EL-REEDY, M. A. **Steel-Reinforced Concrete Structures Assessment and Repair of Corrosion Second Edition**. 2. ed. [S.l.]: New York: Taylor & Francis Group, 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A "fracture testing"based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. In: **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 535–551, 2014. ISSN 09500618.

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. In: **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, p. 084002, 2016. ISSN 0964-1726.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 1996.

\_\_\_\_\_. **Corrosão**. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GRAEFF Ângela G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

GUZLENA, S.; SAKALE, G. Self-healing concrete with crystalline admixture - a review. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 660, n. 1, p. 012057, 2019. ISSN 1757-899X.

HELENE, P. R. L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**. AATH, n 10 p 25-35, 1983.

IGARASHI, S. ichi; KUNIEDA, M.; NISHIWAKI, T. Technical committee on autogenous healing in cementitious materials. In: **Japan: JCI. TC075B**, 2009.

JADOVSKI, I. et al. A influência da espessura do revestimento no fenômeno da corrosão de armaduras. In: VIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, 1992, JOINVILLE. **Anais...** Joinville: FEJ/UEDESC, 1992.

JCI-TC075B. **State-of-the-art report of the JCI Technical committee TC-075B**. Autogenous healing in cementitious materials. Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, Japan: [s.n.], 2009. 89-96 p.

KAUSHAL, V.; SAEED, E. Sustainable and innovative self-healing concrete technologies to mitigate environmental impacts in construction. In: **CivilEng**, MDPI AG, v. 5, p. 10, 2024. ISSN 26734109.

KIRCHHEIM, A. P. et al. Avaliação de revestimentos de proteção do aço no controle da corrosão das armaduras em concretos brancos. In: VII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, X CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCION, 2005, ASUNCIÓN, PARAGUAI. **Anais...** CONPAT, 2005.

LIMA, M. G. de. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1990.

MARCHESAN, P. R. C.; SANTAROSA, D.; CAMPAGNOLO, J. L. Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, PORTO ALEGRE. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. [S.l.]: São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. ISBN 978-85-98576-12-1.

OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. Avaliação do desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto. In: **Revista Concreto**, n. 55, 2009. ISSN 1809-7197.

PAZDERKA, J.; HáJKOVÁ, E. Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. In: **Acta Polytechnica**, v. 56, p. 291, 2016. ISSN 18052363.

PEDROSO, M. G. **Autocicatrização do concreto com diferentes tipos de cimentos em interação com catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Materiais e Componentes de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

PETRY, N. d. 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) — Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: Diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e concreto têxtil**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.

REINHARDT, H. W. et al. **Recovery against Environmental Action**. [S.l.]: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. 65-117 p. ISSN 22132031. ISBN 978-94-007-6624-2.

REN, Q. et al. Research on the properties of crystalline admixtures: Self-healing healing materials for concrete from multiple perspectives. **In: Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 453, p. 14, 2024. ISSN 09500618.

ROOIJ, M. D. et al. **RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. [S.l.]: Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v. 11. ISBN 978-94-007-6623-5.

SELISTRE, F.; BOTH, A. A influência do fator a/c, do cobrimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras. In: V SALÃO DE INICIAÇÃO CINÉTICA E II FEIRA DE INICIAÇÃO CINÉTICA, 1993, PORTO ALEGRE. **Anais...** Porto Alegre: LEME/UFRGS, 1993.

SELISTRE, F.; GASTAL, S.; CAMPAGNOLO, J. Estudo de técnicas para reversão do processo corrosivo em estruturas de concreto contaminadas com cloretos. In: VI SALÃO DE INICIAÇÃO CINÉTICA E III FEIRA DE INICIAÇÃO CINÉTICA, 1994, PORTO ALEGRE. **Anais...** Porto Alegre: LEME/UFRGS, 1994.

SILVA, L. M. B. da. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

STEIN, K. J. **Avaliação experimental de vigas de concreto armado corroídas submetidas a ciclos de carregamentos**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2019.

TAKAGI, E. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos,, 2013.

TAMBARA, R. F. **AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM USO DE ADITIVO CRISTALIZANTE**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete, 2024.

TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. D. Self-healing in cementitious materials - a review. In: **Materials**, v. 6, n. 1, p. 36, 2013. ISSN 1996-1944.

TORRES, A. da S. **Avaliação da sensibilidade do CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

TRINDADE, E. C. **Corrosão Acelerada por imersão modificada (CAIM) de estruturas de concreto armado contendo cinza da casca de arroz e água da mandioca brava**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete, 2013.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. [S.l.]: Swedish Cement and Concrete Research, Fo n° 504, 1982. 469 p.

VARELA, H.; ESPINOSA, L. V. Penetrabilidad de iones cloruros en morteros con y sin revestimiento. In: VII JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN E I JORNADA LATINOAMERICANA DEL CIMENTO Y HORMIGÓN, CURSO: AVANCES TECNOLOGICOS EN EL USO DE CEMENTOS Y HORMIGONES, 1988, SANTIAGO DE CHILE. **Anais...** Santiago de Chile: Santiago de Chile: Instituto Profesional de Santiago, 1988. p. 82–91.

VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

WANG, L.; UEDA, T. Mesoscale modelling of the chloride diffusion in cracks and cracked concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 9, n. 3, p. 241–249, 2011.

ZHANG, W. et al. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 409–417, 2012. ISSN 09500618.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concreto com aditivos cristalizantes**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.

ZIZKOVA, N. et al. Mortars with crystalline additive in aggressive environments. In: **IOP Publishing, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 385, n. 1, p. 012066, 2018. ISSN 1757899X.