

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUSTAVO VARGAS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS
COM ADITIVO CRISTALIZANTE E SUBMETIDOS A AMBIENTE AGRESSIVO**

**Alegrete
2024**

GUSTAVO VARGAS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS
COM ADITIVO CRISTALIZANTE E SUBMETIDOS A AMBIENTE AGRESSIVO**

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^a. D. Sc. Simone
Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2024**

GUSTAVO VARGAS CARVALHO

AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE E SUBMETIDOS A AMBIENTE AGRESSIVO

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 2024.

Banca examinadora:

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA - Orientadora

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Eng. RAFAEL FUMACO TAMBARA - Examinador Externo



Assinado eletronicamente por **RAFAEL FUMACO TAMBARA, Usuário Externo**, em 16/07/2024, às 07:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 08:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 13:38, 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, informando o código verificador **1491738** e o código CRC **45EB0D80**.

Dedico este trabalho à minha mãe e aos meus avós Derli (*in memoriam*) e Gessi.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, minha amada mãe Cátia Silvana Duarte Vargas, por seu apoio incansável e amor incondicional, os quais foram a maior força por trás de cada conquista que alcancei desde o começo da minha vida até hoje, pois ela sempre acreditou em mim, mesmo nos momentos mais difíceis, eu sou profundamente grato por isso.

Aos meus avós Derli Siqueira Vargas e Gessi Duarte Vargas, que foram meus exemplos de perseverança. Obrigado por compartilharem suas experiências de vida comigo, e por me ensinarem valores essenciais, os quais levarei para o resto da minha vida.

Ao meu pai Derci Ribeiro Carvalho Jr, apesar dos pesares, sei que sempre foi meu fã de carteirinha, e que nesses últimos anos tem sido um forte apoiador para me manter correndo atrás desse sonho.

A minha orientadora Simone Dornelles Venquiaruto, que também é a melhor professora do curso, meu reconhecimento por sua admirável expertise e atenção comigo na orientação, as tuas ajudas me foram extremamente fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço aos demais professores, pois todos eles de uma forma ou de outra me instruíram ao longo dessa jornada, tanto para o meu crescimento acadêmico e/ou pessoal.

A minha namorada Andressa Sauzem Rocha, que esteve ao meu lado, apoiando em momentos de crise, quando ligava para ela, algumas vezes chorando, achando que não daria conta de conseguir uma aprovação em um semestre, sua companhia sempre trazia calma e motivação nesses momentos.

Aos meus colegas de curso, principalmente aos que foram além de colegas, aos que se tornaram amigos, os quais eu compartilhei risos, choros, aprovações, reprovações, desafios e aprendizados tanto na vida pessoal, quanto na vida acadêmica. E um agradecimento especial aos meus amigos Bruna Tamiosso e Robson Nery que me ajudaram nos dias de trabalho no laboratório.

Por fim, meu mais profundo agradecimento por todos que fizeram parte dessa caminhada até chegar nesse trabalho de conclusão, sem o apoio de vocês, este trabalho com certeza não seria possível. Sou grato por cada um de vocês na minha conquista.

“Com grandes poderes, vêm grandes responsabilidades”.

Stan Lee

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a contribuição de um aditivo cristalizante (CA) nacional na propriedade de autocicatrização de concretos estruturais submetidos a danos nas primeiras idades (microfissuras) frente as propriedades mecânicas de compressão axial (f_c), tração na flexão (f_t), e corrosão da armadura (Ensaio CAIM). Foram produzidos dois traços, um de referência e outro com a incorporação de 1% de aditivo cristalizante e ambos dosados para atingirem resistência estrutural de 30MPa. Para os ensaios das propriedades mecânicas foram produzidos dois tipos de corpos de prova: cilíndricos (f_c) e prismáticos (f_t). Para os ensaios de corrosão de armadura (CAIM), em parte dos corpos de provas prismáticos foram inseridas uma barra de aço CA-50. Após a produção, os concretos foram submetidos a cura submersa. Na idade de 7 dias, três amostras prismáticas foram rompidas a tração na flexão. A partir do valor médio de ruptura foi determinado o percentual de 50% dessa resistência. Nesta mesma idade, parte dos corpos de prova prismáticos foram submetidos a um pré-carregamento por tração na flexão de 50% f_{cm} para a indução dos danos (microfissuras). Parte das amostras prismáticas permaneceram intactas, para servirem como referência. Após a imposição dos danos, as amostras retornavam para o processo de cura até a idade de 28 dias para favorecer a autocicatrização, quando eram ensaiadas à tração na flexão e ao ensaio acelerado de corrosão (CAIM). O ensaio de controle de compressão axial foi realizado em amostras prismáticas e não impostas a danos na idade de 14 e 28 dias. Os resultados mostraram que o uso do aditivo cristalizante aumentou a resistência a compressão axial dos concretos, porém não influenciou de forma relevante a resistência à tração na flexão, pois o traço referência (sem CA) apresentou os melhores resultados. Em contrapartida, conclui-se que o pré-carregamento aplicado nos concretos nas primeiras idades não implicou em perdas da propriedade avaliada (resistência à tração na flexão) para a idade de controle aos 28 dias. Quanto a influência do aditivo cristalizante na proteção contra a corrosão de armadura pelo ensaio CAIM conclui-se que os concretos com aditivo cristalizante promoveram uma menor perda de massa das barras de aço.

Palavras-Chave: autocicatrização, aditivo cristalizante, CAIM, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the contribution of a national crystallizing additive (CA) in the property of self-cicaton of structural concretes subjected to damage in the early ages (microcracks) against the mechanical properties of axial compression (F_c) pull in bending (f_t), and armor corrosion (CAIM test). Two traits were produced, one of reference and another with the incorporation of 1% of crystallizing additive and both dosed to achieve structural strength of 30MPa. For the tests of the mechanical properties two types of specimens were produced: cylindrical (F_c) and prismatic (f_t). For the reinforcement corrosion tests (CAIM), a CA-50 steel bar was inserted in part of the prismatic specimens. After production, the concretes were subjected to submerged curing. At the age of 7 days, three prismatic samples were ruptured at flexion. From the mean rupture value was determined the percentage of 50% of this resistance. At this same age, part of the prismatic specimens were submitted to a pre-loading by tensile flexion of 50% f_{cm} for the induction of damage (microcracks). Part of the prismatic samples remained intact, to serve as a reference. After the imposition of damages, the samples returned to the curing process until the age of 28 days to favor self-cicaton, when they were tested at flexural tension and accelerated corrosion test (CAIN). The axial compression control test was performed in prismatic samples and not imposed to damage at the age of 14 and 28 days. The results showed that the use of the crystallizing additive increased the axial compressive strength of the concretes, but did not influence the tensile strength in bending, because the reference trait (without AC) showed the best results. In contrast, it is concluded that the preload applied in concretes in the early ages did not imply losses of the evaluated property (flexural tensile strength) for the control age at 28 days. As for the influence of the crystallizing additive on the reinforcement corrosion protection by the CAIM test, it was concluded that the concretes with crystallizing additive promoted a lower loss of mass of the steel bars.

Keywords: self-healing, crystallizing additive, CAIM, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismos de autocicatrização natural em matrizes cimentícias	20
Figura 2 – Tipo de autocicatrização da categoria autocicatrização/reparo	22
Figura 3 – Programa experimental.....	33
Figura 4 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia natural)	35
Figura 5 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita 1).....	35
Figura 6 – Detalhamento da etapa 2 do programa experimental.....	37
Figura 7 – Esquema do ensaio de tração na flexão.....	38
Figura 8 – Máquina do ensaio à tração na flexão	38
Figura 9 – Estufa utilizada para secagem dos corpos de prova	39
Figura 10 – Ensaio de absorção total.....	40
Figura 11 – Esquema de amarração do cabo à barra de aço	41
Figura 12 – Ensaio CAIM em andamento.....	42
Figura 13 – Níveis de solução salina.....	42
Figura 14 – Resistência média à compressão axial dos traços.....	44
Figura 15 – Influência da idade do tempo de cura.....	45
Figura 16 – Influência do aditivo cristalizante na resistência à compressão axial....	46
Figura 17 – Corpos de prova rompidos por tração na flexão do traço (T1)	47
Figura 18 – Corpos de prova rompidos por tração na flexão do traço (T2)	47
Figura 19 – Resistência média de tração na flexão – sem pré-carregamento	49
Figura 20 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias.....	49
Figura 21 – Influência do aditivo cristalizante na resistência à tração	50
Figura 22 – Influência do pré-carregamento na resistência à tração	50
Figura 23 – Resultado da absorção total do traço de referência	51
Figura 24 – Barras ensaiadas do traço 1 (T1)	52
Figura 25 – Barras ensaiadas do traço 2 (T2)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do cimento CP-IV 32RS	34
Tabela 2 – Análise estatística da resistência à compressão	45
Tabela 3 – Análise estatística da resistência à tração	49
Tabela 4 – Relação das massas das barras do traço 1	52
Tabela 5 – Relação das massas das barras do traço 2	53
Tabela 6 – Relação das massas das barras expostas por 24h	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Compilação dos trabalhos com aditivos cristalizantes	31
Quadro 2 - Ensaio de caracterização dos agregados.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento

°C – Graus celsius

Ed. - Edição

et al – E outros

fck – Resistência Característica do Concreto à Compressão

ft,médio – Resistência Média à tração

MPa – Mega Pascal

pH – potencial hidrogeniônico

p. – página

µm – micrometro

v. – volume

V - Volts

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)

CA-50 – Aço para concreto armado com resistência de 500MPa

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CP-II-F – Cimento Portland composto por Filler

CP-V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPs – Corpos de Prova

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

JCI – Japan Concrete Institute (Instituto Japonês do Concreto)

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (Reunião Internacional dos Laboratórios de Ensaios)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UR – Umidade Relativa

SUMÁRIO

RESUMO	7
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Autocicatrização de Materiais Cimentícios (Self-Healing).....	18
2.2 Tipo de Autocicatrização.....	19
2.2.1 Cicatrização Natural	19
2.2.2 Cicatrização Autônoma.....	20
2.2.3 Reparo Ativado.....	21
2.2.4 Cicatrização Autógena	21
2.2.5 Cicatrização/Reparo Modificado.....	21
2.2.6 Autocicatrização/Reparo	22
2.3 Fatores intervenientes na autocicatrização em materiais cimentícios ..	22
2.3.1 Aglomerantes	22
2.3.2 Relação Água/Aglomerante	24
2.3.3 Idade de abertura e espessura de fissuras	25
2.3.4 Ambiente de Exposição.....	26
2.4 Aditivos cristalizantes	27
2.5 Entrada de água e agentes agressivos no concreto	29
2.6 Ações dos aditivos cristalizantes nos concretos	30
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Caracterização dos Materiais.....	33
3.2 Produção e Cura dos Concretos	36
3.3 Ensaio de Controle.....	37
3.3.1 Ensaio de Tração na Flexão	38
3.3.2 Ensaio de absorção	39
3.3.3 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM).....	40
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	44
4.1 Resistência à Compressão Axial.....	44
4.2 Resistência à tração na flexão	46
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	51
4.4 ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA (CAIM).....	52
5 CONCLUSÕES.....	56

6	SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	57
7	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material que apresenta elevada resistência aos esforços de compressão, porém uma baixa resistência a tração. Em função do seu desempenho é um dos produtos mais utilizados na construção. Apesar de resistente, o concreto pode estar sujeito a processos de fissuração quando exposto a esforços excessivos, variação de temperatura, agentes agressivos e outros fatores (HEARN, 1998). Quando uma estrutura de concreto apresenta fissuras de maiores espessuras, é necessária uma avaliação técnica para encontrar uma maneira de repará-la, para evitar entrada de água e agentes agressivos que possam degradá-la.

A autocicatrização foi inicialmente notada em 1836, na França, principalmente em reservatórios. No Brasil, a autocicatrização de concretos tem chamado a atenção de alguns pesquisadores, sendo um tema bastante abordado em trabalhos de pesquisa. A união da autocicatrização natural com a autocicatrização autônoma é definida como autocicatrização autógena, sendo ela o tipo de autocicatrização avaliada nesse trabalho, pois o promovedor de autocicatrização utilizado foram os aditivos cristalizantes.

Os aditivos cristalizantes podem ser utilizados nas estruturas como impermeabilizantes ou incorporados na mistura durante a produção do concreto, formando uma barreira de cristais impedindo a entrada de água e agentes agressivos. Seu funcionamento se dá em promover reações químicas na presença de umidade, que em conjunto com os produtos da hidratação do cimento, acaba por gerar uma estrutura cristalina capaz de preencher os poros capilares do concreto (GUZLENA; SAKALE, 2019). O objetivo deste material é reduzir a permeabilidade do concreto, selando os poros, assim, evitando a entrada de agentes agressivos. O aditivo cristalizante é recomendado para uso em reservatórios, contenção e estruturas subterrâneas, estações de tratamento, túneis, e outras aplicações que precisem de um concreto impermeável.

Conforme já informado na literatura Azarsa *et al.* (2021), Bodanese (2020), Zhang *et al.* (2022) e Ziegler (2020), a incorporação de novos materiais em concretos – como os aditivos cristalizantes - podem promover um melhor desempenho mecânico para o concreto além disso, contribuir para um melhor desempenho da estrutura (durabilidade) frente a ambientes agressivos.

No meio da construção civil é de consenso que o processo de corrosão do aço em uma estrutura de concreto armado é difícil de tratar, além de ser bastante oneroso. Logo, o estudo e a validação de novos materiais que possam minimizar e/ou evitar o problema de corrosão de armaduras justificam o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 Objetivos

Nos tópicos 1.1.1 e 1.1.2 são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearão esta pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de cicatrização de concretos com e sem o uso de aditivo cristalizante, microfissurados nas idades iniciais e submetidos a ambientes agressivos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a influência do aditivo cristalizante quanto as propriedades mecânicas de tração na flexão e na compressão axial dos concretos produzidos;
- b) Avaliar a influência do aditivo cristalizante na proteção contra a corrosão de armadura pelo ensaio CAIM;
- c) Comparar os desempenhos mecânicos de tração na flexão, de durabilidade na autocicatrização, dos concretos produzidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão tratados alguns fundamentos de autocicatrização dos materiais cimentícios, que é mais conhecido pelo termo *self-healing*, também os fatores intervenientes na autocicatrização, os aditivos cristalizantes e pôr fim a corrosão das armaduras, que por sua vez foram fundamentos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Autocicatrização de Materiais Cimentícios (Self-Healing)

Nos últimos anos, a característica de autocicatrização que o concreto é capaz de realizar sem a intervenção humana surgiu como uma possível solução contra a deterioração da estrutura. Essa abordagem é recente e tem atraído a atenção de pesquisas na comunidade científica que vêm investigando os diversos tipos de abordagens que o concreto pode realizar a autocicatrização. Devido ao fato que a predominância dos danos causados no concreto são fissuras, os estudos da autocicatrização tem sido direcionado a auto recuperação delas. Dessa maneira o desenvolvimento de um concreto autorecuperável tem impacto significativo no aumento da vida útil, na redução de custo econômico, social e ambiental em relação a construção civil (LI; HERBERT, 2012).

A capacidade de autocicatrização do concreto é uma característica antiga, visto que o material por si só possui algumas propriedades curativas naturais por meio da hidratação contínua dos minerais do clínquer ou da carbonatação do hidróxido de cálcio, sendo assim possível que as fissuras autocicatrizem após um certo tempo. Porém essa autocicatrização é limitada a pequenas fissuras, sendo eficaz apenas quando for possível o contato com a água (TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

O conceito da característica de autocicatrização para as matrizes cimentícias foi baseado no campo das ciências biológicas, como observado no autorreparo dos tecidos das plantas, microrganismos e em humanos. A função dessa característica é prolongar a vida útil do sistema em que ela age (TAN *et al.*, 2015).

O concreto quando danificado ou sujeito a processos de degradação possui a capacidade de se autorecuperar, o que tem sido alvo de muito interesse na comunidade científica ao longo da última década. Essa característica tem sido

considerada uma característica promissora para aumentar a durabilidade e sustentabilidade das estruturas (TANG; KARDANI; CUI, 2015).

2.2 Tipos de Autocicatrização

Igarashi, Kunieda, Nishiwaki (2009), fazem parte do JCI-TC075B, que é um comitê técnico da autocicatrização de materiais cimentícios. Este comitê, como forma de padronização dos termos de autocicatrização para os trabalhos científicos, classificou os tipos de autocicatrização em seis categorias distintas: Cicatrização Natural (*Natural Healing*), Cicatrização Autônoma (*Autonomic Healing*), Reparo Ativado (*Activated Repairing*), Cicatrização Autógena (*Autogenous Healing*), Cicatrização/Reparo Modificado (*Engineered Healing/Repairing*) e Autocicatrização/Reparo (*Self-healing/Repairing*).

Nos tópicos 2.2.1 a 2.2.6 são apresentados em detalhes os principais conceitos de autocicatrização, de acordo com o JCI- TC075B (ano 1999).

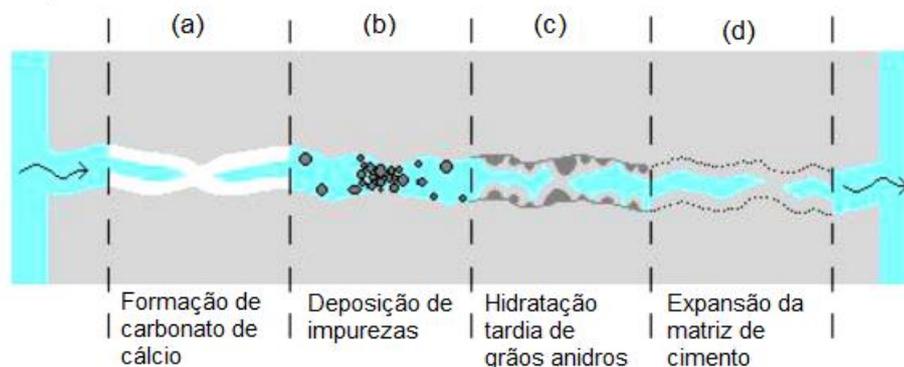
2.2.1 Cicatrização Natural

Igarashi, Kunieda, Nishiwaki (2009) definiram a cicatrização natural como um fenômeno em que as fissuras no concreto são preenchidas naturalmente, mas com a necessidade da presença de umidade no ambiente em que o concreto se encontra.

Conforme De Rooij, Schlangen, Joseph (2013), o fenômeno da cicatrização natural pode ser o resultado de algumas reações químicas, físicas e/ou mecânicas. Onde a reação física é a intumescência e está relacionada ao inchaço da pasta de cimento hidratado próximo a fissura, que ocorre quando a água é absorvida pela pasta e assim acaba reduzindo a entrada da fissura. Já pela reação química é o processo com o maior potencial de contribuição para a autocicatrização e pode apresentar dois processos. O primeiro sendo a hidratação contínua do cimento, que ocorre quando há presença de umidade e grãos de cimento anidro, que são grãos de cimento que ainda não foram hidratados. A segunda reação química possível é a formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), mas depende da temperatura, pH e da concentração dos reagentes, que são a união dos íons de cálcio que estão presente na água dos poros do concreto com os íons de carbonato presente na água da fissura. Por fim, a reação mecânica também é dividida em dois processos, um tendo a presença de partículas

de suspensão, e o outro pelos grãos gerados pela fratura da fissura. É apresentado na A Figura 1 os tipos de autocicatrização natural em matrizes cimentícias.

Figura 1 - Mecanismos de autocicatrização natural em matrizes cimentícias.



Fonte: Adaptado de Ter Heide (2005).

2.2.2 Cicatrização Autônoma

Igarashi, Kunieda, Nishiwaki (2009) definiram a cicatrização autônoma como um fenômeno que pode ser alcançado por meio de uso de materiais especiais, como adições apropriadas na fabricação do cimento. Onde, esses materiais possuem a capacidade de cicatrizar as fissuras, além de acelerar o processo de autocicatrização em ambientes com presença de umidade.

Um dos processos de autocicatrização que se caracteriza como autônomo, utiliza componentes de materiais que não são usados normalmente no cimento, mas sim, são adicionados intencionalmente pensando nesse fim de autocicatrização (DE ROOIJ; SCHLANGEN; JOSEPH, 2013).

Esse processo de autocicatrização normalmente possui tubos ou cápsulas com agentes adesivos embutidos no cimento que, ao danificar, quebra e libera o agente na matriz. Onde o adesivo então flui sob a ação capilar para as regiões microfissuradas (GARDNER *et al.*, 2014). Gardner *et al.* (2014) estudaram a autocicatrização com supercolas, que normalmente tem um prazo de validade de um ano. Mas quando encapsuladas no concreto eles são esperados para curar danos que ocorrem no início da vida da estrutura, devido a efeitos térmicos, encolhimento e carregamento na estrutura.

2.2.3 Reparo Ativado

É o fenômeno da autocicatrização em que as fissuras são preenchidas por efeito de incorporação prévia de algum dispositivo colocado intencionalmente no concreto com a finalidade de reparar automaticamente as fissuras de forma autônoma (IGARASHI; KUNIEDA; NISHIWAKI, 2009).

Pesquisadores estudaram o potencial de bactérias como agente de autocicatrização no concreto, e para esse fim, foi selecionado um grupo de bactérias formadoras de esporos resistentes a álcalis, relacionadas ao gênero *Bacillus*. Os esporos bacterianos foram adicionados diretamente na mistura da pasta de cimento, mantendo viável por um período de até quatro meses. Observou-se uma diminuição contínua no diâmetro dos poros durante a cura do concreto, uma vez que o tamanho dos poros diminuiu abaixo de 1 μm que é o tamanho típico de um esporo de *Bacillus*. Ao final dos ensaios os corpos de prova de concreto que continham as bactérias aparentaram produzir consideravelmente mais minerais de preenchimento de fissuras em comparação aos corpos de provas de referência. Concluindo que os esporos de bactérias possuem de fato um potencial autocicatrizante. (JONKERS *et al.*, 2010).

2.2.4 Cicatrização Autógena

Esse conceito abrange a cicatrização natural (hidratação de grãos anidros do cimento) e a cicatrização autônoma (uso de adições minerais com cinza volante, sílica ativa e aditivos cristalizantes), podendo ser definido como todo o fenômeno de preenchimento de fissuras no concreto, em um ambiente com a presença de umidade (IGARASHI; KUNIEDA; NISHIWAKI, 2009).

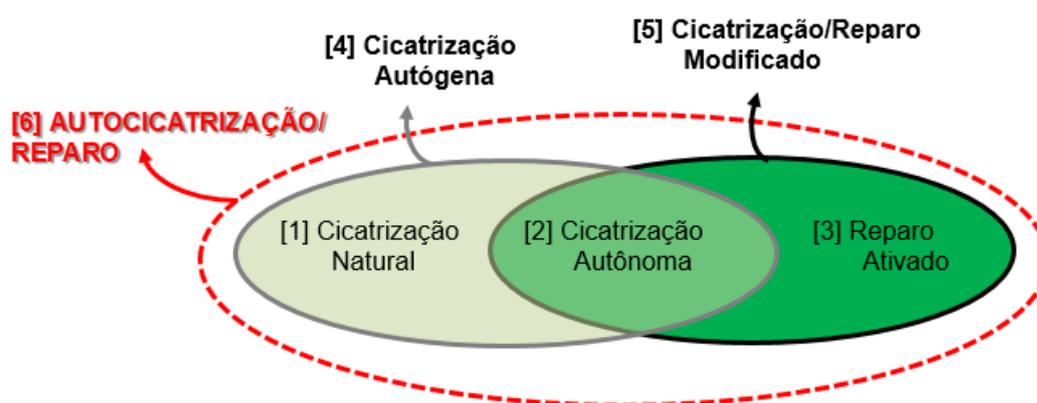
2.2.5 Cicatrização/Reparo Modificado

Conceito que abrange a cicatrização autônoma e o reparo ativado. A Cicatrização/Reparo ativado é o fenômeno no qual as fissuras são preenchidas/reparadas por concretos especiais, produzidos a partir de projetos específicos para essa finalidade de preenchimento e/ou reparo de fissuras (IGARASHI; KUNIEDA; NISHIWAKI, 2009).

2.2.6 Autocicatrização/Reparo

A Autocicatrização/Reparo é definida com um fenômeno global de preenchimento de fissuras no concreto, sem a intervenção direta do homem para o reparo. É exemplificado na Figura 2 os tipos de autocicatrização que fazem parte da categoria Autocicatrização/Reparo de acordo com o Comitê.

Figura 2: Tipos de autocicatrização da categoria Autocicatrização/Reparo.



Fonte: Adaptado de JCI – TC075B (2009).

2.3 Fatores intervenientes na autocicatrização em materiais cimentícios

Diversos fatores são relevantes para que o concreto tenha capacidade de autocicatizar-se e recuperar sua resistência e impermeabilidade após ter sido danificado e ter desenvolvido suas fissuras. Os fatores que interveem são a composição do concreto, a relação água-cimento, tipo de cimento, e a quantidade e tipo de agregados usados. Fora isso, aspectos como a extensão do dano, a idade do concreto no instante da abertura da primeira fissura, as condições de umidade relativa no ambiente, o tempo e tipo de processo de cura também influenciam a capacidade de auto recuperação do concreto (ZHONG; YAO, 2008).

2.3.1 Aglomerantes

Segundo a literatura (Shabab *et al.* (2013); Mehta e Monteiro (2014), entre outros), a composição química dos aglomerantes contribuem de forma relevante para o fenômeno da autocicatrização de matrizes cimentícias

De acordo com Shabab *et al.* (2013) a característica do grão do cimento, influencia o desenvolvimento da reação de hidratação. Que quanto maior for a área superficial da partícula, ou seja, um material mais fino, mais rápido ocorrerá a reação de hidratação e o aumento da resistência. Mehta e Monteiro (2014) reforçam que os cimentos Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI) possuem extrema finura e pureza, apresentando reações de hidratação mais intensa nos primeiros dias em relação aos demais tipos de cimento Portland.

O estudo realizado por ter Heide e Schlangen (2007), investigou a autocicatrização de concretos de endurecimento rápido, e concreto com cimento com escória de alto forno que possui endurecimento lento, e na idade de um dia observaram que o concreto com a endurecimento rápido apresentou resistência mais significativa em comparação com o concreto de endurecimento lento, como já era de se esperar. Após quinze dias de idade, ambos apresentaram recuperação da resistência mecânica, no entanto o concreto com endurecimento rápido se mostrou mais notável no ganho de resistência. Os autores concluíram que esse resultado se dá pela maior quantidade de grãos anidros presente naquele tipo de cimento, o que potencializa uma maior chance de autocicatrização das fissuras.

De acordo com Hung, Su (2016), em seu trabalho sobre a avaliação da capacidade de autocicatrização de materiais cimentícios, os autores verificaram que as misturas que continham maiores proporções de cinza volante apresentaram um maior potencial de autocicatrização em médio prazo quando submetidas a cura submersa. Com o objetivo de avaliar a microestrutura das fissuras e identificar os produtos de autocura, foi feito ensaio de microscopia eletrônica de varredura e análise de raios-x de dispersão de energia. Segundo os autores, a observação consistiu principalmente de CaCO_3 e C-S-H, sendo que, a proporção de C-S-H na cicatrização aumentou proporcionalmente à quantidade de cinza volante presente.

Zhang, Qian, Ma (2014) investigaram as propriedades mecânicas e o *self-healing* em argamassas contendo aglomerantes com diferentes proporções de cinzas volantes. Após 28 dias, com exceção das amostras de referência, as amostras foram pré-carregadas para gerar microfissuras. Após o pré-carregamento, parte das amostras foram submetida a testes para avaliar suas propriedades mecânicas. Enquanto a outra foi submetida a distintos períodos de cura em água, por 30 e 60 dias. Os autores concluíram que tanto a resistência à compressão quanto a largura das microfissuras diminuíram à medida que o volume de cinza volante foi aumentado

nas misturas. Segundo os autores os testes indicaram que a mistura com a maior proporção de cinza volante apresentou melhor desempenho para a autocura.

2.3.2 Relação Água/Aglomerante

Segundo Hearn (1998) o mecanismo primário de autocicatrização de fissuras em concretos jovens são baseados na disposição de grãos anidros e presença de umidade. A hidratação ocorre desde que haja água e acesso aos grãos anidros. A taxa de hidratação é afetada pela presença de fissuras pois são elas que criam um caminho para que a água encontre o grão anidro.

A relação água/cimento é um fator que restringe a autocicatrização, onde a pouca disponibilidade de água promove maiores quantidades de cimento anidro na matriz (VENQUIARUTO, 2017). Van Tittelboom *et al.* (2012) mostraram que o aumento da relação água/cimento de 0,4 para 0,5 reduziu a capacidade de autocicatrização autógena em consequência da hidratação tardia.

A ocorrência da hidratação tardia, também conhecida como hidratação contínua, constitui o principal mecanismo de autocicatrização de fissuras em novos concretos, e está condicionada a dois fatores fundamentais, a disponibilidade de grãos de cimento anidro e a presença de água. A disponibilidade relativa dos grãos de cimento para a reidratação e formação dos produtos resistentes que preenchem as fissuras é influenciada por alguns fatores, inclusive o fator água/cimento, que em geral, nos concretos convencionais, essa relação é adotada nos valores que variam entre 0,40 e 0,55 (DA SILVA, 2016).

Destaca-se, em concreto com relação água/cimento de 0,40, que aproximadamente 70% do cimento presente na mistura acaba reagindo com a água, os outros 30% restantes ficam em estado anidro. A quantidade de grãos de cimento anidro tende a aumentar em concretos com relação água/cimento menores e com cimentos mais grossos (SHIM *et al.*, 2015). Já para Neville (2016), a relação água/cimento mínima para hidratação da matriz é aproximadamente 0,36, mas a relação água/cimento deve ser maior que 0,36 quando a cura for realizada sem contato com a água.

2.3.3 Idade de abertura e espessura de fissuras

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a presença de fissuras é caracterizada como uma das principais causas físicas de deterioração no concreto, sendo resultado da variação de temperatura e umidade, carregamento, e a utilização ao longo da vida útil, esses fatores que causam a fissura ajudam a potencializar o surgimento de problemas por causas químicas.

Pesquisadores como Ter Heide e Schlangen (2007) tem relatado em suas pesquisas que, de fato, existe um decréscimo na recuperação da resistência dos concretos que foram pré-fissurados em maiores idades quando comparado com os concretos pré-fissurados mais jovens.

Roig-Flores *et al.* (2016) analisaram as propriedades autocicatrizantes em corpos de provas de concreto com aditivos cristalizantes e fissurados em dois (2) dias de idade. As fissuras tinham espessuras entre 0,1 e 0,4mm, sendo que os corpos de prova eram expostos a cura imersa em água e ciclos de secagem e molhagem de 3 e 5 dias. Os autores concluíram que mesmo os corpos de prova sendo fissurados precocemente, a taxa de autocicatrização foi um sucesso para fissuras até 0,4mm, após 42 dias de cura submersa em água.

No estudo realizado por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) os autores observaram que o melhor desempenho da autocicatrização ocorreu em corpos de prova de argamassa com aditivo cristalizante, para fissuras com espessura de até 0,5mm e que foram causadas aos três (3) dias de idade. Os pesquisadores também concluíram que para os corpos de prova de argamassas fissurados aos vinte e oito (28) dias de idade, a taxa de autocicatrização foi maior para as fissuras com até 0,3 mm de espessura.

Segundo De Belie *et al.* (2018), em maiores idades, ocorrem as reações de hidratação tardia e ocorre a precipitação do CaCO_3 , que podem contribuir com o processo de autocicatrização. Ferrara *et al.* (2014) relata que a hidratação contínua dos grãos anidros é o principal mecanismo de *self-healing* em concretos jovens, enquanto, para idades maiores a possibilidade de hidratação é menor, por conta do estágio avançado de hidratação da matriz cimentícia.

2.3.4 Ambiente de Exposição

A literatura (Roig-Flores *et al.* (2016), Ferrara *et al.* (2014), Maes *et al.*, entre outros.) reforça que o ambiente de exposição dos concretos pode influenciar no processo de autocicatrização de concretos.

Ferrara *et al.* (2014) avaliaram a cura em concretos expostos ao ar com umidade relativa (UR) entre 20% e 95%, por ciclos controlados com variação de temperatura, e também avaliaram concretos em cura submersa. Concluíram que as fissuras foram fechadas com sucesso no ambiente de exposição submersa. Os autores também verificaram que os aditivos cristalizantes no concreto promoveram uma boa autocicatrização em fissuras com até 0,2 mm, até mesmo nas condições menos favoráveis, como a exposição ao ar (UR=20%) ou em câmara úmida (UR=95%).

Com base na análise da propriedade da autocicatrização em concreto com uso de aditivo cristalizantes, Roig-Flores *et al.*, 2016 estudaram dois tipos de classe de concreto diferentes. Os concretos foram expostos a três tipos de ambientes de cura diferentes: cura submersa a 15°C, cura submersa a 30°C e cura com ciclos de molhagem/secagem. Concluíram que os corpos de prova que foram expostos a cura submersa de 15°C apresentaram melhor capacidade de autocicatrização. Na sequência, os melhores desempenhos foram observados para os concretos expostos a cura submersa à 30°C. Segundo os autores, os corpos de prova submetidos aos ciclos de molhagem/secagem demonstraram capacidade insuficiente para a autocura.

Maes, Snoeck e De Belie (2016) realizaram testes em argamassas microfissuradas e submetidas a diferentes tipos de cura com utilização de água destilada (cura submersa e cura com ciclos de molhagem e secagem). Os ciclos de molhagem/secagem foram realizados considerando doze (12) horas de imersão e doze (12) horas de secagem. Concluíram não haver diferença significativa no processo de autocicatrização das argamassas quando comparado os dois ambientes de cura. No entanto, observaram que as argamassas submetidas a cura em ciclos apresentaram selagem das fissuras menores do que 0,15mm após sete (7) dias de ciclos.

2.4 Aditivos cristalizantes

Segundo o Instituto de Concreto Americano (ACI 212.32-10) os aditivos cristalizantes são classificados como aditivos redutores de permeabilidade, sendo um produto químico que tem objetivo de impedir a passagem de água e agentes agressivos para dentro do material formando uma estrutura cristalina preenchendo os poros no concreto. Recentemente são classificados por De Belie *et al.* (2018) como estimuladores de autocicatrização autógena.

Os aditivos cristalizantes são materiais que possuem a finalidade de vedação das fissuras nos concretos e argamassas, a partir da formação de cristais proveniente dos silicatos ativos compreendidos em sua composição. Sua utilização não é ainda muito estudada nacionalmente, apresentando a necessidade de novas pesquisas sobre a diversidade de materiais e marcas disponíveis no mercado e qual sua real interação com as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido (DE OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

Os aditivos cristalizantes, também são chamados de redutores de permeabilidade, possuem a função de reduzir a estrutura porosa dos materiais cimentícios. Além disso, esses aditivos estão sendo muito estudados para o tratamento de fissuras (HELENE *et al.*, 2018).

O contato prolongado entre os aditivos cristalizantes e a umidade é crucial para que se possa atingir maiores taxas de autocicatrização das fissuras, mesmo as com maiores espessuras (ROIG-FLORES *et al.*, 2015).

Segundo Ravitheja *et al.* (2019) esses aditivos cristalinos são classificados como aditivos hidrofílicos, que são capazes de reagir facilmente quando entram em contato com a água, aumentando a densidade de C-S-H, assim formando bloqueios de poros e fissuras existentes. Oliveira (2019) também destaca em sua tese a água como essencial para ativação dos aditivos cristalizantes, que após a sua penetração, os aditivos cristalinos reagem com as partículas de cimento, e formam um depósito cristalino nos poros e fissuras presentes no concreto.

Os aditivos cristalizantes têm a composição química formada por cimento Portland, areias, pó siliciosos, pozolanas e produtos químicos ativos. Diversos aditivos cristalizantes são comercializados, sendo sua composição química mantida em segredo pelos fabricantes (GUZLENA, SAKALE, 2019).

Bohus e Drochytka (2012) reforçam que os aditivos cristalizantes podem ser compostos por vários tipos de aglomerantes e produtos químicos, e que a forma de atuação deste produto pode depender de diferentes reações químicas (podendo reagir com a água, hidróxido de cálcio, grãos de cimento anidro e íons carbonatos). Segundo os autores, os agentes autocicatrizantes podem produzir o C-S-H, além de poder atuar proporcionando um aumento na precipitação de CaCO_3 , pelo aumento da dissolução dos íons carbonato.

Ferrara, Krelani e Moretti (2016) comentam que além da água presente no concreto ser o principal mecanismo de ativação dos cristalizantes, esses aditivos podem sofrer ativação tardia, quando entram em contato com a umidade por meio das fissuras, o que é almejado. Segundo os autores, é esperado que o comportamento dos aditivos cristalizantes seja igual no período inicial da vida útil do concreto, quanto no final. Reforçam que enquanto a matriz cimentícia apresentar reserva de hidróxido de cálcio, cimento anidro, além de espaço e umidade, a hidratação dos aditivos cristalizantes ocorrerá tanto nos poros quanto nas fissuras. Além do exposto, Ferrara, Krelani e Moretti (2016) enfatizam que os aditivos cristalizantes aumentam a densidade de C-S-H na matriz, os quais são depositados junto aos poros capilares e as fissuras existentes, o que por sua vez, ativa o processo de autorreparo. Pelo fato de os aditivos cristalizantes serem colocados no concreto no momento da sua mistura, ocorre a formação de depósitos cristalinos que ficam inteiramente ligada a pasta de cimento, contribuindo para uma maior resistência a entrada de agentes agressivos na matriz.

Atualmente, existem disponíveis no mercado brasileiro dois tipos de aditivos cristalizantes, em forma de pó e líquido. O aditivo cristalizante em pó deve ser incorporado na matriz cimentícia no momento da sua produção, enquanto o aditivo cristalizante líquido deve ser aplicado na forma de pintura, sendo indicado para estruturas acabadas.

O interesse da indústria em promover o uso de misturas cristalinas como estimuladores da cicatrização autógena é um mercado interessante na área de tecnologia de concreto autorecuperável. De qualquer forma, deve-se observar que a ampla variedade de composições de produtos e dosagens recomendadas por cada fabricante ainda é um obstáculo (DE BELIE *et al.*, 2018).

2.5 Entrada de água e agentes agressivos no concreto

Os agentes agressivos infiltram-se no concreto a partir do ambiente circundante e migram em seu interior por meio de uma rede de poros capilares e microfissuras. Os mecanismos podem atuar simultaneamente ou sucessivamente, de acordo com as condições que o concreto esteja exposto, como a temperatura e umidade (CALÇADA, 2004). Segundo Neville (1997), a disposição dos poros determina o mecanismo de transporte dos agentes no concreto, juntamente com as microfissuras na matriz da pasta de cimento.

Para Mehta e Monteiro (2008) não é a porosidade total, mas a disposição do tamanho dos poros que realmente altera a permeabilidade na pasta de cimento. Para os autores, são os poros grandes que influenciam mais na permeabilidade. Também afirmam que quanto maior o tamanho dos agregados, maior a permeabilidade, pelo fato de que quanto maior o tamanho do agregado, maior será a zona de transição na matriz, que é mais fraca e suscetível a sofrer microfissuras (promovendo uma maior permeabilidade).

Para Neville (1997), a corrosão de armadura é um dos fatores mais prejudiciais para a durabilidade do elemento estrutural, e a ação dos cloretos são um dos fatores que agredem a armadura no concreto. De acordo com Helene (1993), os cloretos podem ser oriundos do contato entre o concreto e o meio onde ele se encontra, como exemplo, água do mar, ambientes marítimos e industriais. Os cloretos também podem ser incorporados na mistura por agregados que estejam contaminados ou pelo uso de aditivos que contenham cloretos.

De acordo com Neville (1997), independente da origem dos cloretos, eles são transportados para o interior do concreto através da água, e por difusão de íons na água. É necessário que a estrutura esteja submetida a um ciclo de molhagem e secagem. Os autores reforçam que em concreto submerso os cloretos não penetram totalmente na estrutura, e por estar submerso, a existência de oxigênio para provocar a corrosão da armadura é muito baixa.

Um concreto fissurado pode contribuir de forma relevante para o ingresso de agentes patógenos para o interior do concreto e contribuir para a sua degradação, principalmente se a estrutura estiver inserida em um meio agressivo. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a presença de fissuras é caracterizada como uma das principais causas físicas de deterioração de estruturas. As fissuras podem ter diferentes origens,

podendo ser resultado da variação de temperatura e umidade do ambiente, excesso de carregamento da estrutura, entre outros. Mehta e Monteiro (2014) também reforçam que ao longo da sua vida útil de uma estrutura, os fatores que causam as fissuras ajudam a potencializar o surgimento de problemas por causas químicas.

2.6 Ações dos aditivos cristalizantes nos concretos

Alguns pesquisadores como Bodanese (2020), Ziegler (2020), Azarsa *et al* (2021), entre outros, tem voltado as suas pesquisas para entender o mecanismo de ação de aditivos cristalizantes no processo de corrosão de armaduras.

Bodanese (2020) avaliou a resistência à penetração de íons cloreto em ambientes marítimos. Foi usado cimento CP II-F 40 para produzir o concreto autocicatrizante com o uso de aditivo cristalizante em sua mistura e uma relação água cimento de 0,40. A autora descreveu que a entrada de íons cloreto é a principal causa de corrosão da armadura de aço e pela baixa resistência à tração do concreto, as fissuras surgem facilitando a penetração do cloreto no interior da estrutura. Após o ingresso, os íons cloreto atacam o aço, levando à sua corrosão e comprometendo a vida útil e a segurança da estrutura. Segundo a autora, os aditivos cristalizantes entram como alternativa para evitar esse problema, pois, na presença de água, provocam a reação química e preenchem as fissuras, promovendo a autocicatrização do concreto. O experimento foi avaliado através do ensaio descrito pela norma C 1202 (ASTM, 2019). No final de seu estudo, Bodanese (2020) concluiu que os concretos com e sem aditivo cristalizante apresentaram um desempenho semelhante quanto a penetração de íons cloreto.

Ziegler (2020) avaliou a autocicatrização de concretos produzidos com três aditivos cristalizantes distintos e submetidos a danos (microfissuras). A autora concluiu que a utilização de aditivos cristalizantes promoveu aos concretos uma redução da absorção de água por capilaridade e não comprometeu a resistência à compressão axial dos concretos. No entanto, Ziegler (2020) ressalta que através do ensaio de microscopia ótica foi observado que nem todas as fissuras nos concretos foram recuperadas.

Azarsa *et al* (2021) informam que a permeabilidade tem um papel significativo para desempenhar na durabilidade da estrutura. Portanto, misturas que tem ação de redução da permeabilidade são interessantes para proteger a estrutura que está

exposta à água e/ou produtos químicos. Em seu estudo, Azarsa *et al.* (2021), avaliaram misturas com e sem aditivos cristalizantes, com o objetivo de investigar a resistência ao congelamento, autocicatrização e resistência a corrosão. Com relação a autocicatrização, concluíram com base nos ensaios de microscopia que as superfícies das fissuras das misturas com aditivos cristalizantes já haviam sido reparadas após vinte e cinco (25) dias. O ensaio para avaliar a corrosão (método eletroquímico) foi realizado durante um período de doze meses, e mostrou que os corpos de provas (CPs) com aditivo cristalizante apresentaram melhor desempenho em relação aos CPs sem o aditivo.

Zhang *et al* (2022) estudaram vigas de concreto armado com estimuladores de autocicatrização para estudar o efeito da resistência à corrosão no ambiente marinho. Os estimuladores de autocicatrização avaliados foram os superabsorventes, superabsorventes tratados, e os aditivo cristalinos. Também foi produzida uma viga de referência sem estimulador, para servir como referência. As misturas com os estimuladores superabsorventes foram submetidas ao tipo de cura por ciclo de molhagem e secagem, enquanto as misturas com aditivos cristalinos foram submetidas a uma cura submersa. A corrosão de armadura foi testada com corpos de prova pré-fissurados. No que diz respeito as vigas com aditivo cristalino, os autores concluíram que os corpos de provas apresentaram 100% de cura e redução de 47,14% na corrosão quando comparado com os demais estimuladores. Concluíram que o fechamento de fissura e a melhora na proteção da corrosão em armadura se mostrou com boa propriedade em ambientes marítimos mesmo a níveis de comportamento estrutural.

É apresentado no quadro 1 um compilado dos autores consultados e das respectivas conclusões de seus trabalhos a respeito da ação de aditivos cristalizantes no fenômeno da corrosão.

Quadro 1 - Compilação dos trabalhos com aditivos cristalizantes.

Autor	Matriz	Estimuladores de autocatrização	Propriedades avaliadas	Conclusões
Bodanese (2020)	Concreto	Aditivos Cristalizantes	Resistência à penetração de íons cloreto	Os concretos com e sem aditivo cristalizante apresentaram um desempenho semelhante quanto a penetração de íons cloreto.
Ziegler (2020)	Concreto	Aditivos Cristalizantes	Resistência à compressão axial Absorção de água	Os concretos com aditivos cristalizantes promoveram redução da absorção de água por capilaridade e não comprometeram a resistência à compressão axial dos concretos
Azarsa (2021)	Concreto	Aditivo Cristalizantes	Resistência ao congelamento, autocatrização e corrosão	Os concretos com aditivos cristalizantes promoveram uma melhora em todas as propriedades avaliadas.
Zhang <i>et al</i> (2022)	Concreto	Aditivo Cristalizantes e outros	Resistência a corrosão em ambiente marítimo, e autocatrização	Os concretos com aditivo cristalizante apresentaram um desempenho melhor nas propriedades avaliadas quando comparado com os outros estimuladores avaliados.

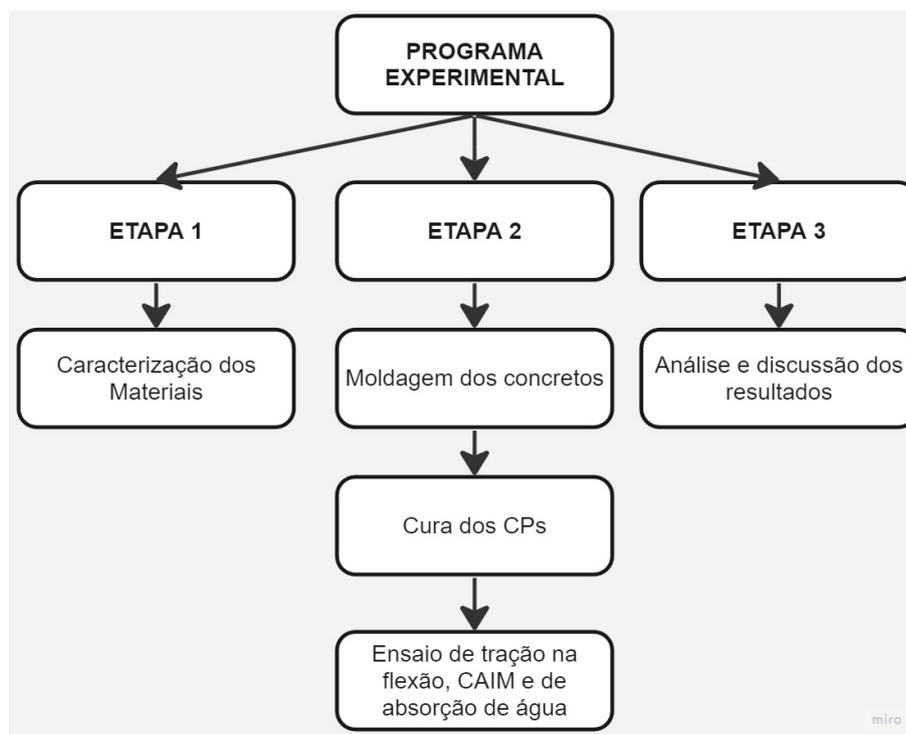
Fonte: Elaboração própria.

3 METODOLOGIA

O experimento foi executado na cidade de Alegrete-RS, no laboratório de materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete-RS.

O programa experimental foi organizado em três distintas etapas, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Programa experimental.



Fonte: Elaboração Própria.

3.1 Caracterização dos Materiais

Essa etapa corresponde ao conjunto de ensaios que foram realizados para determinar as propriedades dos materiais selecionados para a produção dos concretos.

A caracterização da barra de aço, do cimento, e do aditivo cristalizante são de acordo com o que os seus respectivos fabricantes disponibilizaram. Já a caracterização dos agregados gráudo e miúdo foi executada no Laboratório.

É exemplificado no quadro 2 os ensaios que foram executados no laboratório de acordo com suas normas técnicas respectivamente.

Quadro 2 – Ensaios de caracterização dos agregados.

Material	Ensaio	Norma
Agregado Miúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Agregado Graúdo	Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica	NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte: Elaboração Própria.

Como material aglomerante foi utilizado o cimento Portland CPIV 32RS, comumente encontrado na região. A caracterização do material foi fornecida pelo fabricante e está disponibilizada na Tabela 1.

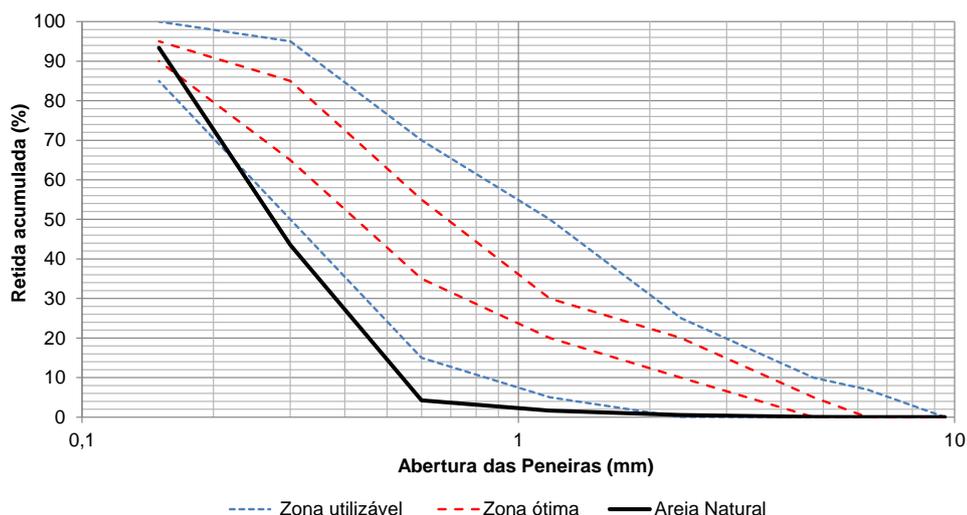
Tabela 1 – Caracterização do cimento CP-IV 32RS.

Exigências Físicas e Mecânicas								
Parâmetros	Finura			Tempo de pega		Resistência à compressão axial		
	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Início (min)	Fim (min)	3 Dias (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)
Exigências	-	<= 8,0	-	>= 60	<= 720	>= 10	>= 20	-
Média	5.597	0,5	1,6	258	302	19,3	22,1	-
Desvio padrão	158	0,2	0,5	29	27	0,8	0,4	-
Exigências Químicas								
Parâmetros	MgO	SO ₃ Média	Perda ao fogo Média	Resíduo insolúvel				
Exigências	-	<= 4,5 %	<= 6,5 %	-				
Média	4,6	2,3	4,7 %	38,5 %				
Desvio padrão	0,3	0,0	0,3	0,7				

Fonte: Fornecido pelo fabricante (2024)

A areia natural empregada na produção dos concretos é proveniente do rio Ibicuí (município de Manoel Viana-RS) e possui massa específica de 2,55 g/cm³. Este agregado é classificado como areia fina (Figura 4), tendo sua dimensão máxima característica definida como 0,60 mm e módulo de finura de 1,43. Apesar da finura do material, o mesmo é largamente empregado na construção civil, principalmente devido à dificuldade de se encontrar na região agregados miúdos que atendam os limites normativos de granulometria.

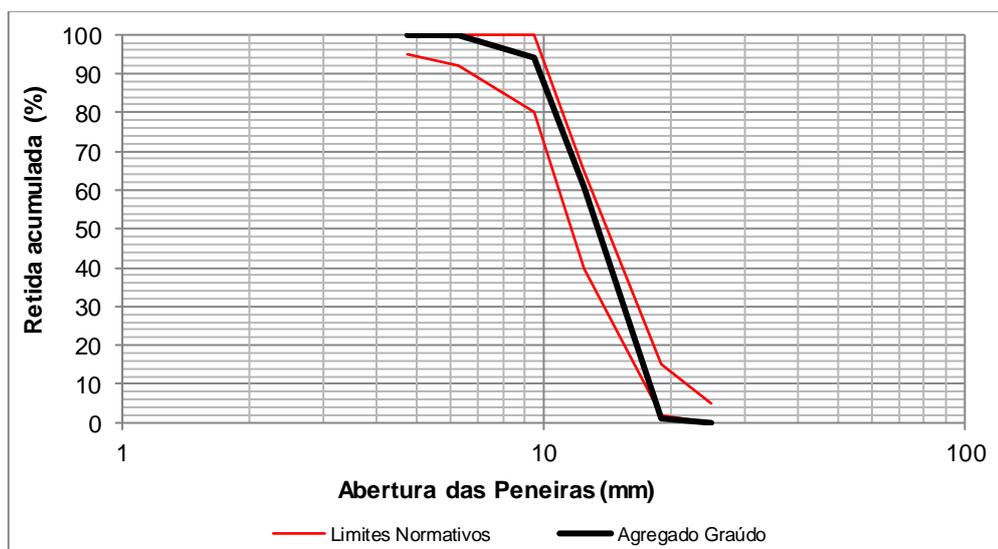
Figura 4 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia natural).



Fonte: Elaboração Própria.

O agregado graúdo utilizado para a produção dos concretos é oriundo de jazida da região de Alegrete/RS, sendo classificado como brita 1 com diâmetro máximo de 19 mm e módulo de finura de 6,95. A massa específica ($2,72 \text{ g/cm}^3$) e a absorção de água (2,08%). É apresentado na Figura 5 a composição granulométrica do material.

Figura 5– Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita 1).



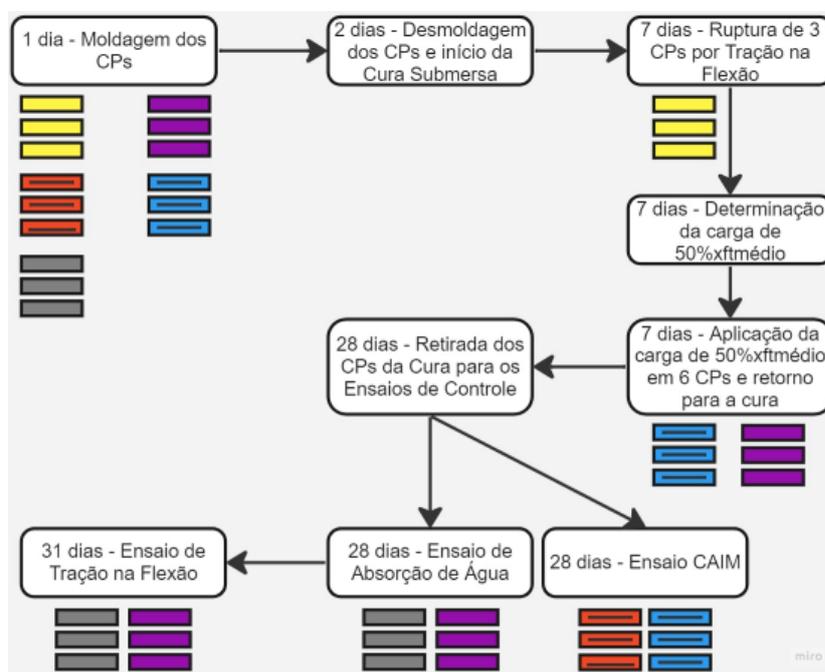
Fonte: Elaboração Própria.

3.2 Produção e Cura dos Concretos

O experimento foi desenvolvido com base em um traço de concreto com resistência característica de 35MPa com a relação a/c de 0,35. Os traços foram definidos em um estudo de dosagem feito previamente a execução do experimento. Foi utilizado um traço unitário em massa (1:1,64:2,86) com consumo de cimento 420kg/m³. O desenvolvimento do trabalho foi realizado executando dois traços, um traço de referência (T1), sem aditivo cristalizante e um traço com aditivo cristalizante (T2) no teor de 1,0% (recomendação do fabricante). A trabalhabilidade dos concretos foi verificada pelo ensaio de abatimento de tronco cônico (*Slump*) de acordo com a norma NBR 16889 (ABNT, 2020). Quando a trabalhabilidade do concreto precisou de ajuste foi utilizado um aditivo superplastificante (no teor de 0,35% em relação ao peso do cimento do traço). Após a produção dos concretos, os corpos de prova foram moldados conforme as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015) e posteriormente submetidos a um processo de cura submersa em água em ambiente controlado.

Na Figura 6 está apresentado o detalhamento da etapa 2 do programa experimental para um traço. Os processos de produção e ensaios foram os mesmos para ambos os traços deste estudo (T1 e T2), diferindo apenas no traço a incorporação do aditivo cristalizante (T2).

Figura 6 – Detalhamento da etapa 2 do programa experimental.



Fonte: Elaboração Própria

Para cada um dos traços será produzido quinze corpos de prova prismáticos (CPs), onde seis deles foram armados com barras nervuradas de aço CA-50 que foram submetidos ao ensaio CAIM (Figura 6). Os corpos de prova com barra de aço ficaram com o cobrimento nominal respeitando o recomendado pela norma regulamentadora NBR 6118 (ABNT, 2023). Para o traço com aditivo cristalizante, foi adicionado na mistura a porcentagem de aditivo recomendada pelo próprio fabricante.

Na idade de 7 dias, parte dos CPs prismáticos foram submetidos a um processo de carregamento por tração na flexão para a indução dos danos internos (microfissuras), e parte dos CPs permaneceram intactos, para servirem como referência. Na idade de 28 dias parte das amostras foram submetidas ao ensaio de absorção de água e posteriormente foram ensaiadas a tração na flexão, conforme mostrado na Figura 6. Para cada traço de concreto produzido, adicionalmente, foram moldados mais seis corpos de prova cilíndricos ($\phi 10 \times 20$ cm) para o controle da resistência a compressão axial nas idades de 7, 14 e 28 dias.

No dia seguinte a moldagem, os concretos foram retirados dos moldes e colocados em cura submersa. Aos 7 dias de idade, três corpos de provas (CPs) sem barra de aço foram retirados da cura submersa para a realização da ruptura por tração na flexão. De posse dos valores de ruptura dos três CPs, foi determinado a resistência à tração na flexão média ($ft_{\text{médio}}$). Com esse valor médio ($ft_{\text{médio}}$) foi calculado o percentual de $50\% \times ft_{\text{médio}}$. Este percentual foi aplicado em parte dos corpos de prova na idade de sete dias (três CPs sem armadura e três com armadura), com o objetivo de promover danos internos nos concretos (microfissuras) sem levar as amostras ao colapso. Após a aplicação da carga, os corpos de prova que receberam o pré-carregamento retornam para a cura submersa, permanecendo em cura até a idade de 28 dias. Parte das amostras permaneceram intactas (três CPs sem armadura e três CPs com armadura), para servirem como referência e permitirem um comparativo das propriedades avaliadas entre os concretos produzidos.

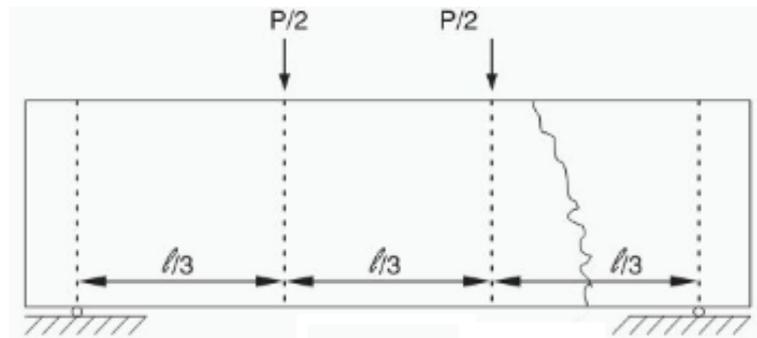
3.3 Ensaio de Controle

Aos 28 dias, todos os corpos de provas foram retirados da cura submersa para que todos os ensaios de controle planejados fossem feitos, os quais são discutidos nos tópicos 3.3.1 a 3.3.3.

3.3.1 Ensaio de Tração na Flexão

A realização do ensaio de tração na flexão seguiu as recomendações da norma NBR 12142 (ABNT, 2010). O ensaio consiste em aplicar uma carga de tração por meio de quatro pontos, dois deles são ponto de aplicação de carga, e o outros dois são pontos de apoio, é ilustrado na Figura 7 a posição dos pontos.

Figura 7 – Esquema do ensaio de tração na flexão.



Fonte: Adaptado da norma NBR 12142 (ABNT, 2010).

De acordo com a norma, há dois tipos de rupturas que podem ocorrer no ensaio, a ruptura no terço médio, e a ruptura fora do terço médio (Figura 7). E para cada uma das rupturas há uma equação para calcular a resistência à tração (NBR 12142 (2010)). É apresentado na figura 8 a prensa EMIC do laboratório de Materiais da UNIPAMPA durante a execução de um dos ensaios mecânicos.

Figura 8 – Máquina do ensaio à tração na flexão.



Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Ensaio de absorção total

A realização do ensaio de absorção seguiu as recomendações da norma NBR 9778 (ABNT,2014), esse ensaio foi realizado para determinar a quantidade de água que o concreto absorveu. Esse ensaio foi importante para avaliar a durabilidade e a resistência do concreto, já que foi visto na revisão desse trabalho que a absorção excessiva de água pode levar à maior deterioração e desgaste do material.

Figura 9 – Estufa utilizada para secagem dos corpos de provas.



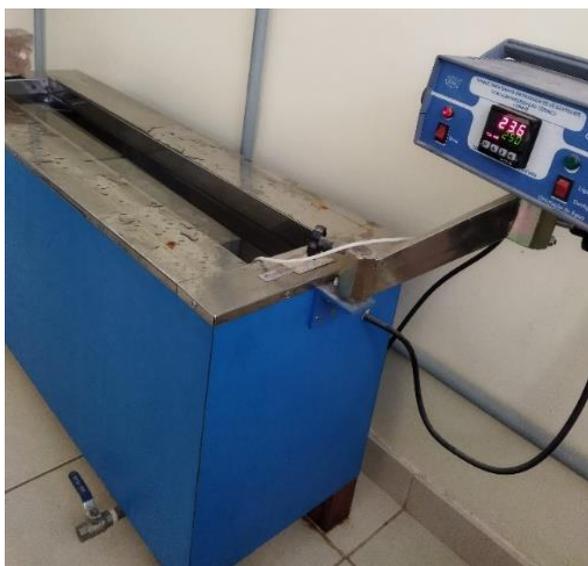
Fonte: Elaboração própria.

Foi mostrado na figura 9 a estufa do laboratório que foi utilizada para secar os corpos de provas e em seguida obter a massa seca dos mesmos. Os corpos de provas foram retirados da cura submersa aos 27 dias para que eles fossem colocados na estufa por 24 horas à 105°C para que o ensaio de absorção começasse corretamente aos 28 dias.

Depois dos corpos de provas terem sido retirados da estufa e descansados em temperatura ambiente para regular sua temperatura, todos foram pesados, e com isso foi obtida a massa seca de cada um.

O ensaio prosseguiu para a etapa de submersão total, onde os corpos de provas foram submersos por 72 horas no equipamento que mantém a temperatura da água de acordo com o estabelecido por norma. É mostrado na figura 10 o equipamento e os corpos de provas sendo ensaiados.

Figura 10 – Ensaio de absorção total.



Fonte: Elaboração Própria

Após as 72 horas todos os corpos de prova foram retirados do equipamento, com o auxílio de um pano úmido, foi tirado o excesso de água em volta dos corpos de prova para que a massa saturada fosse pesada.

3.3.3 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

O ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) é utilizado para avaliar a resistência à corrosão de materiais metálicos, como o aço, quando exposto à ambientes agressivos. Não há uma norma brasileira específica para o ensaio CAIM, mas, no entanto, há normas internacionais reconhecidas, como a ASTM B117 ou a ISO 9227.

Antes da concretagem dos corpos de prova cada uma das barras de aço foi pesada, para que no final do ensaio fosse feita a comparação dos pesos antes e após a corrosão do material.

No dia da moldagem dos corpos de provas foi colocado em volta das barras de aço um cabo condutor usado em instalações elétricas de seção 1,5 mm² desencapado, para que mais tarde a ponta do cabo servisse como espera para se conectar ao polo positivo da fonte. É mostrado na figura 11 o esquema de amarração do cabo condutor elétrico à barra de aço.

Figura 11 – Esquema de amarração do cabo à barra de aço.



Fonte: Elaboração própria.

Foram dispostos em seis corpos de provas uma barra de aço $\varnothing 10\text{mm}$ com comprimento de 34 cm (Figura 11). Aos 7 dias, três dos corpos de provas foram escolhidos para serem pré-carregados de modo como foi descrito no fluxograma da figura 6. Após a imposição do dano (pré-carregamento), as amostras retornavam para o processo de cura para facilitar o fenômeno de autocicatrização. Na idade de 28 dias, as amostras foram retiradas da cura submersa e foi dado início da montagem do sistema de funcionamento do ensaio CAIM. Foi realizada a medição do volume de água (11 Litros) para realizar o ensaio, o nível da água permaneceu no mesmo nível da barra de aço (Figura 13). Com a definição do volume de água foi calculado a quantidade de sal para a composição da solução. Foi utilizado 35g de NaCl por litro de água, seguindo a recomendação da literatura (Torres (2006), Trindade (2013), e Stein (2019) para simular um ambiente agressivo salino encontrado no Brasil. Em suma, foi utilizado 385 gramas de NaCl por ensaio.

Para estimular os cloretos a migrarem no meio do ambiente agressivo até as barras de aço, foi gerado uma diferença de potencial através de uma fonte de alimentação modelo FA-3005. Trindade (2013) estudou diferentes voltagens para

esse ensaio, sendo elas 15V, 30V e 70V. A autora optou por trabalhar na sua pesquisa com a voltagem de 30V, pois observou que na voltagem com 70V ocorria um maior aquecimento da solução salina, prejudicando a reprodutibilidade e confiabilidade do ensaio, e a voltagem de 15V se mostrou ineficiente para a indução da corrosão. Em função do exposto, para esta pesquisa também adotou a voltagem de 30 V para o Ensaio Caim, sendo que é mostrado na figura 12 o ensaio em andamento.

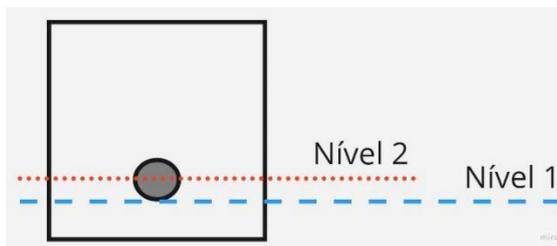
Figura 12 – Ensaio CAIM em andamento.



Fonte: Elaboração própria.

Durante o ensaio, o nível da solução salina poderia estar em duas alturas diferentes como mostra a Figura 13, mas para deixar padronizado um dos níveis nesse trabalho, foi escolhido o nível 1, logo abaixo da barra de aço, pois de acordo com os autores Torres, Guimarães e Filho (2006) este nível 1 é o mais adequado, pois facilita a circulação do oxigênio próximo da armadura.

Figura 13 – Níveis de solução salina.



Fonte: Adaptado de Torres, Guimarães e Filho (2006).

A duração do ensaio foi definida para ser realizado inicialmente em 24 horas, mas ao longo do experimento, a metade dos corpos de provas que foram ensaiados primeiramente apresentaram pouca corrosão. Em função do resultado obtido, foi decidido que pelo menos um dos concretos permaneceriam em ensaio até que se completassem 48 horas. Esperava-se que com um maior tempo de exposição ao ensaio CAIM fosse possível identificar os efeitos de corrosão nas barras das amostras ensaiadas.

Após o término do ensaio, os corpos de prova foram quebrados para a retirada das barras de aço. Após a extração, as barras de aço passaram por um processo de limpeza, onde permaneceram 45 minutos imersas em uma solução de 580g de ácido clorídrico e 3,5g de hexametileno tetramina em água. Após esta etapa foram lavadas com água corrente e posteriormente foram secas em estufa a 45°C por 45 minutos. Após este processo, as barras resfriaram em ambiente de laboratório e posteriormente tiveram a sua massa determinada. Previamente, antes do ensaio, essas mesmas barras tiveram sua massa determinada para que fosse possível a comparação após o processo de corrosão.

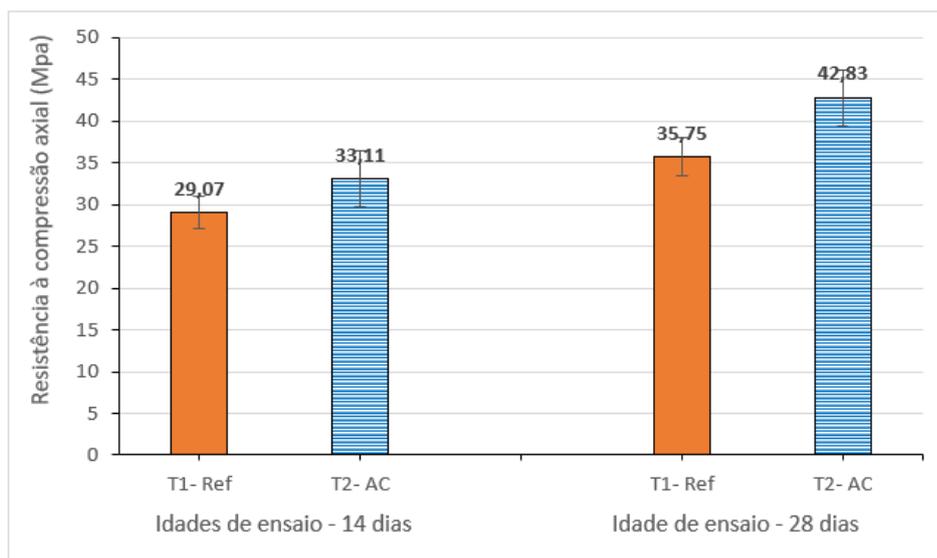
4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste tópico é apresentado os resultados referentes a todos os ensaios realizados em laboratório de acordo com que foi apresentado no tópico anterior.

4.1 Resistência à Compressão Axial

A resistência mecânica à compressão axial dos concretos foi avaliada de acordo com o que há normatizado pela NBR 5739 (ABNT,2018) nas idades de 14 e 28 dias. Os valores apresentados na Figura 14, foram obtidos a partir da média entre três corpos de provas cilíndricos por idade de cura, o que totalizou o uso de doze corpos de prova.

Figura 14 – Resistência média à compressão axial dos traços.



Fonte: Elaboração Própria.

É mostrado na figura 14 que para a idade de 28 dias foi atingido a resistência de controle planejada para realização desse trabalho (35MPa). Para uma melhor avaliação da resistência à compressão axial e a da influência do aditivo cristalizante (AC) nos concretos produzidos, foi realizado uma análise estatística ANOVA com um nível de confiança de 95% através do software *Statistica Release 7.0*. Os valores de probabilidade abaixo de 0,05 ($p \leq 0,05$), para cada comparação entre as médias,

indica haver diferença estatística significativa entre os parâmetros testados. Na tabela 2 estão dispostos os resultados encontrados.

Tabela 2 – Análise estatística da resistência à compressão.

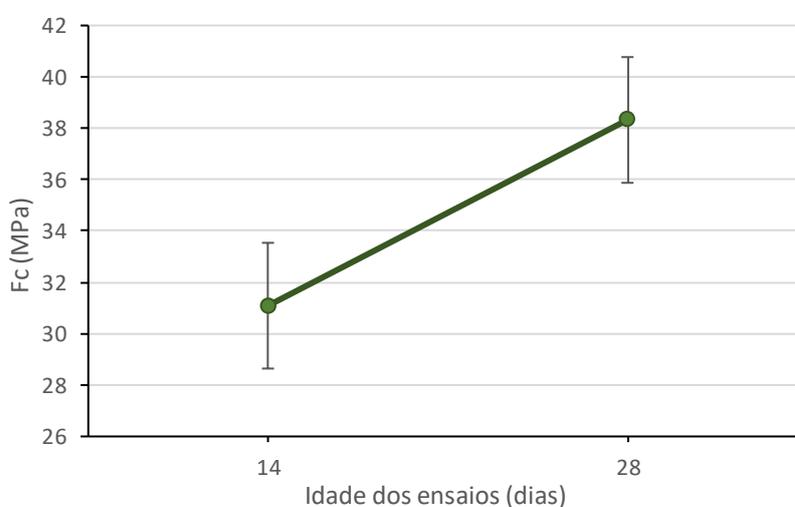
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p (significância)
Intercepto	14455,33	1	14455,33	2058,188	0,000000
Aditivo Cristalizante	63,34	1	63,34	9,019	0,014881
Idade de Cura	156,89	1	156,89	22,339	0,001079
Erro	63,21	9	7,02		

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 0,05\%$ = efeito significativo.

Fonte: Elaboração Própria.

A análise estatística do experimento (Tabela 2) indica duas variáveis independentes (aditivo cristalizante e a idade de cura) e uma variável dependente (resistência à compressão axial). A ANOVA (tabela 2) indica que as variáveis independentes foram significativas, uma vez que o nível de significância ficou dentro do limite estatístico de 0,05%. Estes resultados comprovam que o aditivo cristalizante e a idade de cura influenciaram de forma significativa a resistência à compressão axial dos concretos investigados. São mostradas nas figuras 15 e 16 o efeito isolado das variáveis independentes na propriedade de resistência à compressão axial.

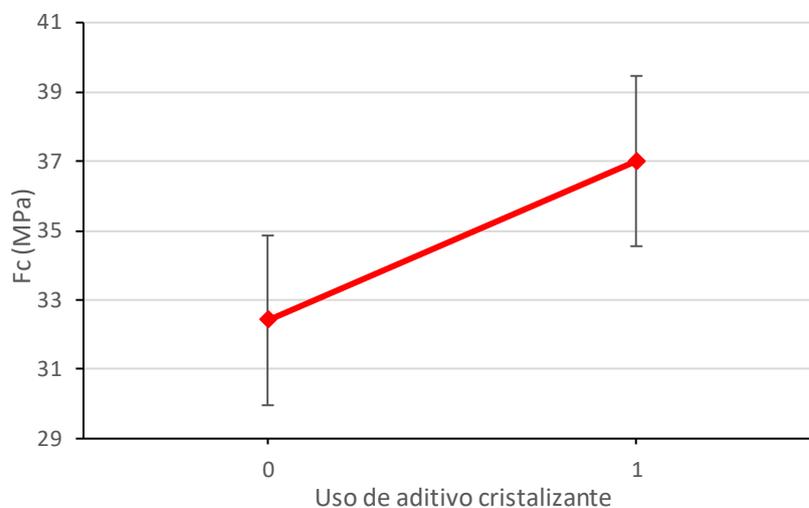
Figura 15 – Influência da idade do tempo de cura.



Fonte: Elaboração Própria.

O resultado acima no gráfico da Figura 15 mostra que o tempo de cura influenciou positivamente na resistência à compressão, o que é coerente com o que é observado na literatura (Ferreira Jr (2003), Mehta e Monteiro (2006), entre outros).

Figura 16 – Influência do aditivo cristalizante na resistência à compressão axial.



Fonte Elaboração Própria.

É mostrado na Figura 16 através do gráfico que houve uma melhora significativa e positiva quando se faz o uso do aditivo cristalizante para aprimorar a resistência mecânica de compressão axial do concreto. A literatura também indica que os aditivos cristalizantes contribuem de forma positiva para o ganho de propriedades mecânicas de concretos. Tambara *et al* (2024) estudou a influência de dois aditivos cristalizantes de diferentes fabricantes sobre a resistência mecânica à compressão axial de concretos submetidos a danos nas primeiras idades. Os autores observaram um aumento médio 12% na propriedade avaliada para os concretos que fizeram o uso de um aditivo cristalizante. Carvalho *et al* (2023), também concluíram que o uso do aditivo cristalizante colaborou para o aumento da resistência mecânica à compressão axial dos concretos investigados na idade de 28 dias.

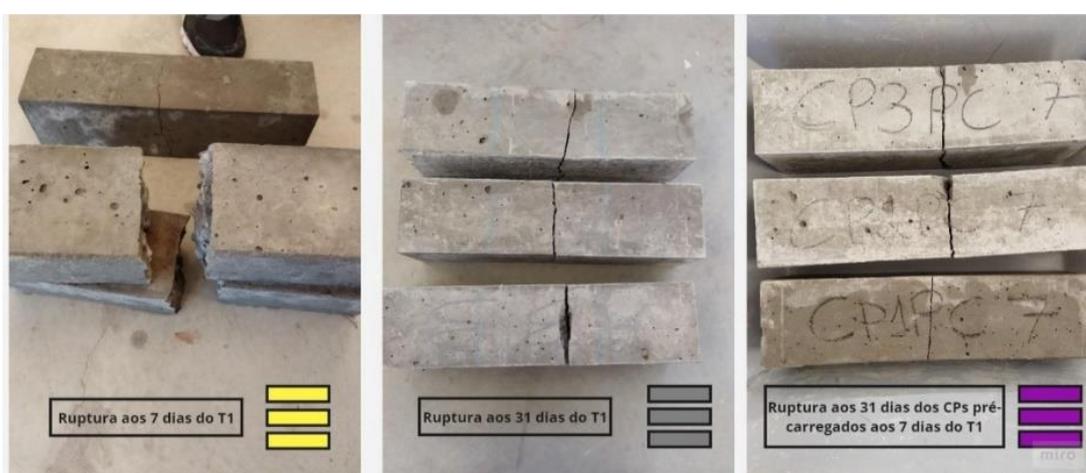
4.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi avaliada de acordo com as recomendações normativas da NBR 12142 (ABNT, 2010).

O objetivo do ensaio de resistência à tração na flexão foi de avaliar a capacidade de autocicatrização do concreto após a indução dos danos (microfissuras) nas primeiras idades. De acordo com a literatura é sabido que o concreto é capaz de auto regenerar quando sofre algum dano, porém dentro de um certo limite e com determinadas condições de cura. A comparação dos resultados para os concretos submetidos e não submetidos ao pré carregamento permitiram avaliar se houve manutenção ou melhoria da propriedade avaliada, confirmando ou não a ação do cristalizante frente ao fenômeno da autocicatrização.

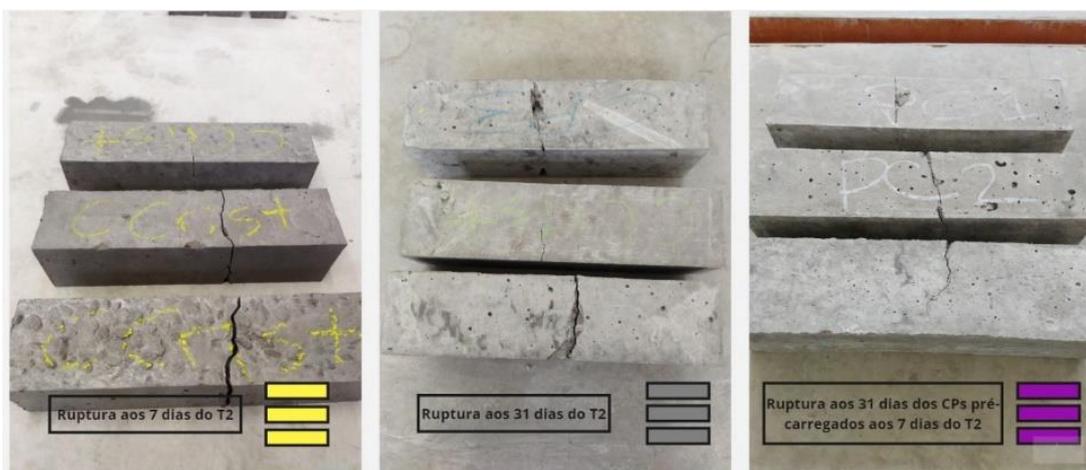
São mostrados nas Figura 17 e Figura 18 o posicionamento da ruptura das amostras. Para ambos os traços (T1) e (T2), todas as amostras apresentaram rupturas no terço médio.

Figura 17 – Corpos de provas rompidos por tração na flexão do traço (T1).



Fonte: Elaboração própria.

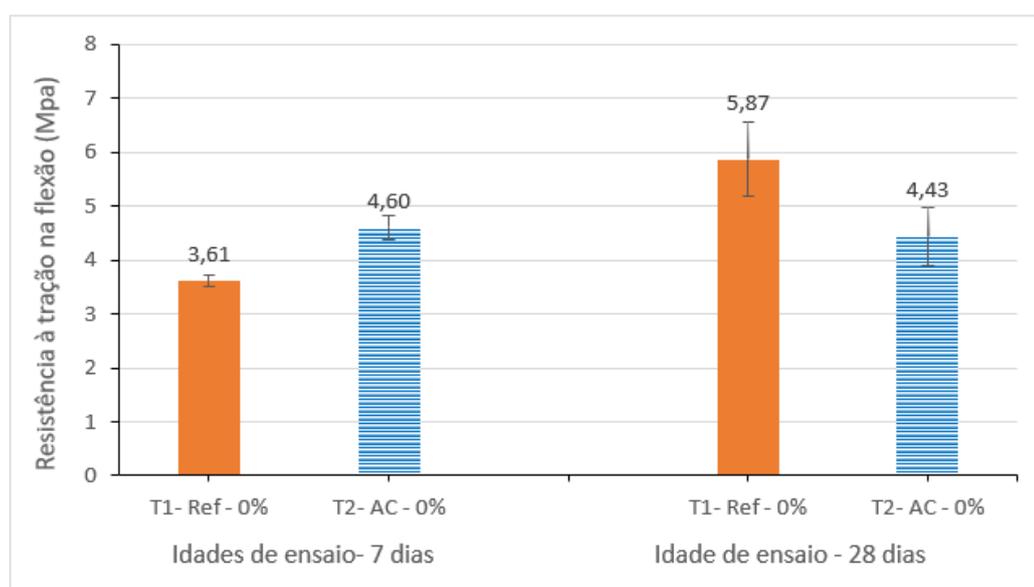
Figura 18 – Corpos de provas rompidos por tração na flexão do traço (T2).



Fonte: Elaboração própria

É mostrado na Figura 19 os resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão para o traço 1 (T1), sem cristalizante, e para o traço 2 (T2), com cristalizante, para os concretos de referência (sem pré carregamento).

Figura 19 – Resistência média de tração na flexão de concretos sem e com aditivo cristalizante e não submetidos ao pré carregamento.

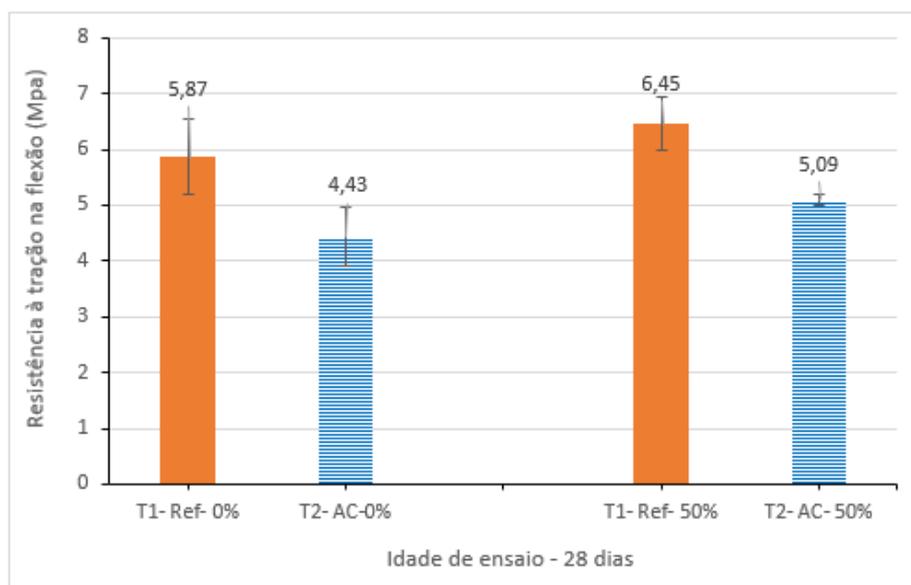


Fonte: Elaboração Própria.

É mostrado na Figura 19 que com o aumento da idade de controle (7 para 28 dias) há um aumento da propriedade avaliada no traço referência, mostrando um comportamento esperado para matrizes cimentícias. Na idade de 7 dias, os concretos com a incorporação de aditivo cristalizante apresentaram melhor desempenho que o traço de referência, porém para a idade de 28 dias esse comportamento não foi verificado.

É mostrado na Figura 20 os resultados médios da resistência à tração por flexão aos 28 dias, para os corpos de prova sem pré carregamento e para os corpos de prova submetidos ao pré-carregamento nas idades iniciais (7 dias). Os dados apresentados na Figura 20 correspondem a média de três resultados por tipo de concreto.

Figura 20 – Resistência média à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados mostram que o pré carregamento aplicado em ambos os concretos (com e sem aditivo cristalizante) nas primeiras idades, promoveram um aumento da resistência à tração na flexão aos 28 dias de 9,88% no traço sem aditivo cristalizante, e 14,90% no traço com aditivo cristalizante. Os melhores resultados foram observados para os concretos sem aditivo cristalizante, independente do pré carregamento aplicado. Os resultados encontrados podem ser justificados pelo fato de que os corpos de prova retornavam à câmara úmida após a imposição do dano. Supõem-se que houve uma recuperação da propriedade mecânica, uma vez que a abertura de microfissuras pode ter contribuído com a entrada de água nos interstícios do concreto, favorecendo a hidratação de compostos não hidratados (anidros). Com relação aos resultados inferiores apresentados para os concretos com aditivo cristalizante em relação aos concretos sem aditivo cristalizante, pode-se supor que para a propriedade mecânica avaliada a ação do aditivo cristalizante não tenha contribuído de forma tão relevante quanto para a propriedade mecânica de compressão. Outra suposição seria em relação a qualidade do produto utilizado. Apesar de estar dentro da validade, o aditivo cristalizante poderia ter apresentado perda do seu desempenho. Porém, os resultados obtidos os ensaios de compressão axial mostraram que o aditivo cristalizante melhorou esta propriedade. Em função do exposto, é necessário que novos estudos sejam realizados para um melhor

entendimento do comportamento de concretos microfissurados nas primeiras frente a propriedade de tração na flexão.

Para uma melhor avaliação da resistência à tração e a influência que o uso do aditivo cristalizante e do pré carregamento dos corpos de provas tiveram sobre essa propriedade mecânica, foi feito uma análise estatística (ANOVA).

Tabela 3 – Análise estatística da resistência à tração.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	357,7392	1	357,7392	1628,088	0,000000
Aditivo	5,8520	1	5,8520	26,633	0,000595
% Carregamento	1,1532	1	1,1532	5,248	0,047704
Erro	1,9776	9	0,2197		

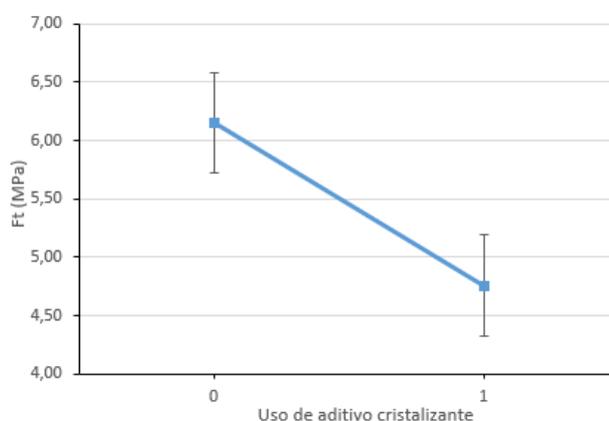
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 0,05\%$ = efeito significativo.

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Tabela 3, podemos dizer que as variáveis independentes foram significativas, já que o nível de significância ficou dentro do limite estatístico de 0,05%. Em suma, isso significa que o aditivo cristalizante e o pré carregamento influenciaram de forma significativa na resistência à tração na flexão.

As Figuras 21 e 22 a seguir trazem o efeito isolado do comportamento das variáveis que foram significativas frente a propriedade avaliada (Ft).

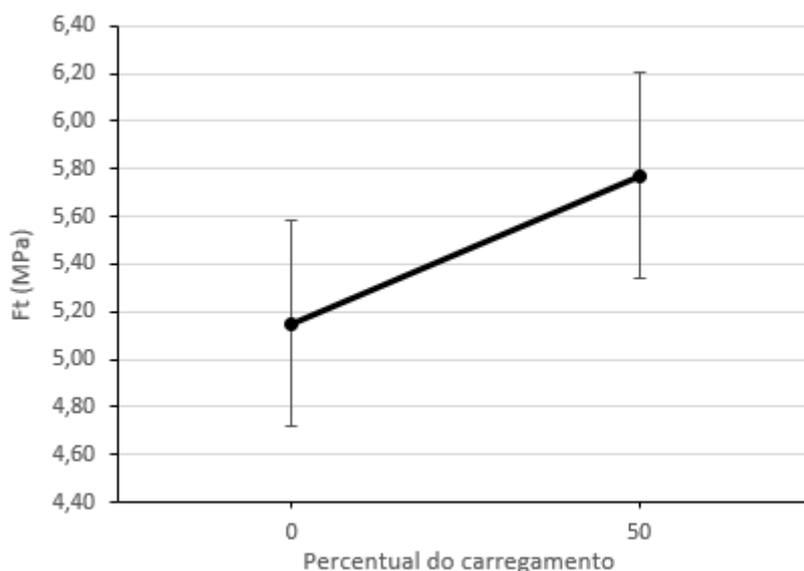
Figura 21 – Influência do aditivo cristalizante na resistência à tração.



Fonte: Elaboração Própria

Avaliando o resultado do gráfico mostrado na Figura 21, a variável “aditivo cristalizante”, não influenciou de maneira positiva a propriedade mecânica avaliada. Para validar o comportamento observado, novos estudos deverão ser realizados.

Figura 22 – Influência do pré carregamento na resistência a tração.



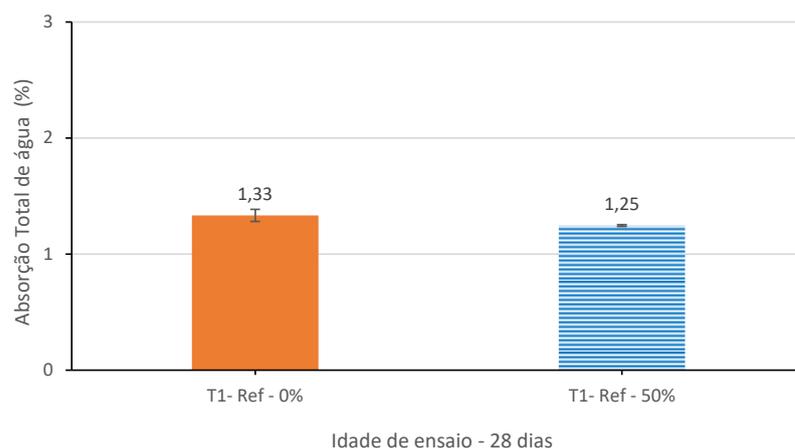
Fonte: Elaboração Própria.

Avaliando o resultado do gráfico mostrado na Figura 22, observa-se que o pré-carregamento aplicado nos concretos promoveu um aumento da propriedade avaliada. Com base no trabalho de tese da Silva (2016), este resultado obtido vai de encontro com o que a autora explica que como o pré carregamento no ensaio de flexão à tração submeteu os concretos à compressão nas fibras superiores e tração nas fibras inferiores, com isso causou uma compactação superior e microfissuração inferior, essa compactação quebrou os cristais de hidróxido de cálcio mais frágeis assim densificando a matriz. Já a microfissuração dos concretos nas idades iniciais possibilitou a hidratação continuada que permitiu que novos silicatos hidratados de cálcio fossem formados, assim o pré carregamento corroborou para o aumento da resistência dos concretos na idade de 28 dias.

4.3 Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram realizados na idade de controle de 28 dias. Em função de um problema técnico durante a realização do ensaio, foram descartados os resultados do traço com aditivo cristalizante. É apresentado na Figura 23 os resultados do Traço de referência.

Figura 23 – Resultado da absorção total dos traços de Referência.



Fonte: Elaboração Própria.

4.4 Ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)

O ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) foi executado com o objetivo de avaliar a resistência à corrosão das barras de aço CA-50, em meio a um ambiente agressivo simulado.

Os resultados obtidos após a realização do ensaio CAIM são apresentados nas Tabelas 4, 5, e 6.

Tabela 4 – Relação das massas das barras do Traço 1 – sem aditivo cristalizante.

Massa das barras de aço CA-50 (Kg) - 24h de exposição					
Pré-carregamento dos concretos	Pré-carregados		Sem pré-carregamento		
Amostras	PC1	PC2	CP1	CP2	CP3
Massa das amostras antes do ensaio	0,1910	0,1885	0,1865	0,1865	0,1870
Massa das amostras depois do ensaio	0,1890	0,1870	0,1850	0,1850	0,1850
Perda de massa (%)	1,05	0,80	0,80	0,80	1,07
Perda de massa média (%)	0,92		0,89		

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os resultados da Tabela 4, observa-se que, apesar da diferença dos resultados ser pequena, a maior perda de massa média (0,92%) ocorreu nos corpos de prova submetidos aos danos (pré-carregamento) nas primeiras idades.

Tabela 5 – Relação das massas das barras do Traço 2 – com aditivo cristalizante.

Massa das barras de aço CA-50 (Kg) - 24h de exposição					
Pré-carregamento dos concretos	Pré-carregados		Sem pré-carregamento		
Amostras	PC1	PC2	CP1	CP2	CP3
Massa das amostras antes do ensaio	0,1890	0,1910	0,1895	0,1885	0,1880
Massa das amostras depois do ensaio	0,1875	0,1900	0,1880	0,1880	0,1875
Perda de massa (%)	0,79	0,52	0,79	0,27	0,27
Perda de massa média (%)	0,66		0,44		

Fonte: Elaboração própria.

É indicado na Tabela 5 uma maior perda de massa média das barras de aço para os concretos submetidos ao pré-carregamento nas primeiras idades, corroborando com a tendência de comportamento obtida para os concretos sem aditivo cristalizante (Tabela 4). Observa-se também que os concretos com aditivo cristalizante (Tabela 5) apresentaram menor perda de massa das barras de aço em comparação aos resultados obtidos para os concretos de referência (Tabela 4), indicando um efeito positivo do aditivo cristalizante na microestrutura dos concretos.

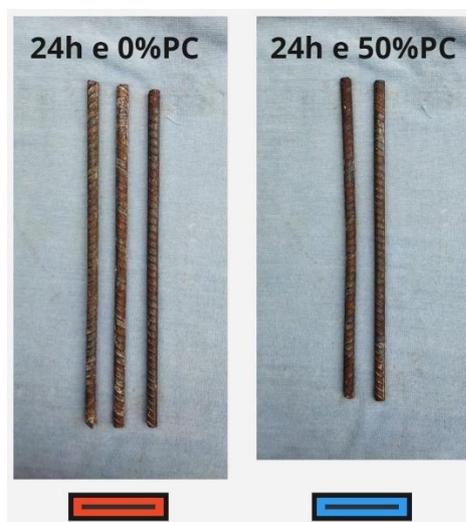
Em suma, comparando as Tabelas 4 e 5 nota-se que a média de perda de massa em ambos os traços é maior nos corpos de provas que foram pré-carregados em relação aos concretos não submetidos a danos (microfissuras). O que sugere que o pré-carregamento permitiu maior passagem do íon cloreto da solução para o interior dos concretos. Alguns autores, como Venquiaruto (2017), Wang e Ueda (2011) entre outros, concluíram em suas pesquisas que a presença de microfissuras facilita a penetração de cloretos no concreto. Além disso, reforçam que quanto maior o pré-carregamento, maior a penetração de íon cloreto. Paul e Zijl (2014) observaram em suas pesquisas uma penetração significativa de cloretos nas vigas de concreto que foram microfissuradas por carregamento de flexão.

Ainda comparando as Tabelas 4 e 5, mas analisando a presença ou não do aditivo cristalizante, percebe-se que a média de perda de massa é menor no traço com aditivo cristalizante, o que sugere que estes concretos apresentaram maior resistência de o íon cloreto chegar até a armadura. Este resultado está de acordo o trabalho de Ziegler (2020), onde a autora concluiu que o aditivo cristalizante utilizado em alguns concretos dificultou a passagem do íon cloreto em comparação aos concretos de referência, retardando a chegada do cloreto até a armadura. Porém, a

autora complementa que o aditivo cristalizante deveria fazer uma selagem mais significativa ou até mesmo completa da fissura para evitar a corrosão.

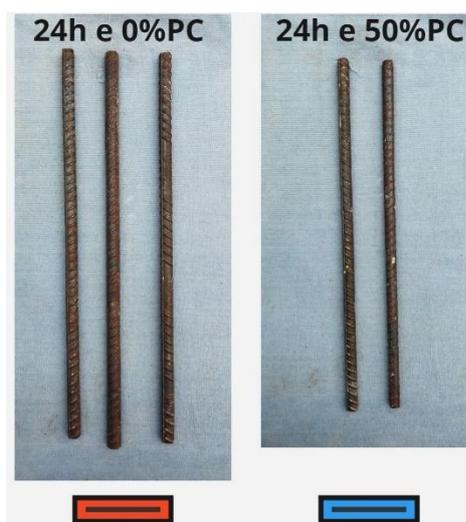
É mostrado nas Figuras 24 e 25 o aspecto das barras de aço após o ensaio de corrosão acelerada (CAIM).

Figura 24 – Barras ensaiadas do traço 1 (T1).



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 25 – Barras ensaiadas do traço 2 (T2).



Fonte: Elaboração Própria.

Alguns fatores que podem ter influenciado para que as barras não corroessem de maneira esperada para esse estudo, são os fatores a/c e a absorção de água, que estão relacionados entre si.

De acordo com Helene (1983), os concretos que apresentam um teor de absorção de água menor ou igual que 4,2% são considerados concretos duráveis e de alto desempenho. Para este trabalho a absorção de água obtida para o traço de referência e submetido ao processo de carregamento foi de 1,2%. O que pode explicar a baixa corrosão nas barras de aço. Acredita-se que a água do meio agressivo encontrou dificuldades para penetrar o corpo de prova e chegar até a barra de aço em função da baixa permeabilidade dos concretos estudados.

Torres, Guimarães e Filho (2006) aplicaram o ensaio CAIM em suas pesquisas com uma tensão maior do que 30V. Os autores concluíram que para os corpos de prova de concreto que foram confeccionados com a relação a/c de 0,35 a degradação das barras de aço foi baixíssima ou nula, corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou avaliar a influência de um aditivo cristalizante na propriedade de autocicatrização de microfissuras para restauração de propriedades mecânicas de compressão axial, tração na flexão, e corrosão da armadura.

Quanto as propriedades mecânicas de compressão axial concluem-se que o aditivo cristalizante foi estatisticamente significativo para uma melhora positiva da resistência mecânica à compressão axial dos concretos investigados.

Quanto as propriedades mecânicas de tração na flexão concluem-se que o aditivo cristalizante não colaborou efetivamente na melhora dessa propriedade, pois o traço referência apresentou maior resistência aos 28 dias. Em contrapartida, concluiu-se que o pré-carregamento aplicado nos concretos nas primeiras idades não implicou em perdas da propriedade avaliada (resistência à tração na flexão) para a idade de controle aos 28 dias.

Quanto a influência do aditivo cristalizante na proteção contra a corrosão de armadura pelo ensaio CAIM conclui-se que os concretos com aditivo cristalizante promoveram uma menor perda de massa das barras de aço. Este resultado sugere que o aditivo cristalizante promoveu um refinamento da porosidade do concreto, retardando o ataque do íon cloreto à armadura, quando comparado ao concreto referência (sem aditivo cristalizante).

Quanto ao pré-carregamento dos concretos frente ao ensaio CAIM em ambos os traços se conclui que a indução dos danos (microfissuras) aos 7 dias, facilitou a passagem dos íons cloretos para o interior do concreto até a armadura.

Em suma, reforça-se que os resultados e conclusões obtidas são válidos o para as condições e metodologias aplicadas nesta pesquisa. Para validação dos resultados desta pesquisa e para um melhor entendimento das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos submetidos a danos (microfissuras) nas primeiras idades novos estudos devem ser realizados.

6 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

- Ensaio CAIM em que corpos de provas tenham relações a/c diferentes, principalmente as usada nas limitações das diferentes classes ambientais da NBR 6118;
- Ensaio CAIM com corpos de prova com resistência menores, com pelo menos 25MPa para fazer uma comparação com o trabalho estudado;
- Ensaio CAIM comparando diferentes porcentagem de teor do mesmo aditivo cristalizantes;
- Ensaio de tração à flexão com diferentes porcentagens pré carregamento fazendo uso do aditivo cristalizante;

7 REFERÊNCIAS

AZARSA, P. *et al.* **Durability and Self-Sealing Examination of Concretes Modified with Crystalline Waterproofing Admixtures.** *Materials*, 2021.

BERNARDINO DA SILVA, L.M. **A influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto.** 2016. Tese (Doutorado em Construção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BODANESE, B. **Concreto autocicatrizante contendo aditivo cristalizante: Avaliação da resistência à penetração de íons cloreto.** 2020. UFRGS, Porto Alegre.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do Ensaio de Migração em condições de Fluxo Não Estacionário na Previsão da Penetração de Cloretos em Concreto.** Florianópolis, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

CARVALHO, G. V; *et al.* **Influência do aditivo cristalizante na autocicatrização de concretos submetidos a danos em diferentes idades.** 64º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON ISSN 2175-8182, 2023.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

DE ROOIJ, M. R; SCHLANGEN, E; JOSEPH, C. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials.** *RILEM* 11. p 1-17, 2013.

DE BELIE, N. *et al.* **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures.** *Advanced Materials Interfaces*, v.5, n. 17, 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A. **A fracture testing based approach to assess crack Healing of concrete with and without crystalline admixtures.** *Construction and Building Materials*, v. 68, 2014.

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,** 2016.

FERREIRA JUNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de altoforno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura.** 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

GARDNER, D; *et al.* **Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials.** *Cement and Concrete Research*, v. 58, 2014.

GUZLENA, S; SAKALE, G. **Self-healing concrete with crystalline admixture – a review**. Materials Science and Engineering, v.660, 2019.

HEARN, N. **Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference**. Materials and Structures, v.31, p 563-567, 1998.

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

HELENE, P. *et al.* **Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.11, p. 544-563, 2018.

HUANG, H. *et al.* **Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions**. Materials and Design, v. 92, p. 499-511, 2016.

IGARASHI, S; KUNIEDA, M; NISHIWAKI, T. **Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Materials**. Technical Committee Reports, 2009.

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. p. Keynote Lecture, pp. 89-96.

JONKERS, H. M; *et al.* **Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete**. Ecological Engineering, v.36, p. 230-235, 2010.

LI, V. C; HERBERT, E. **Robust Self-healing concrete for sustainable Infrastructure**. Journal of Advanced Concrete technology, v.10, p.207-218, 2012.

LI, V. C; *et al.* **Recovery Against Mechanical Actions**. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, v.11, p.119-215, 2013.

LI, W; *et al.* **Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials**. Advanced Materials, ed.30, 2018.

MAES, M; SNOECK, D; DE BELIE, N. **Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing**. Construction and Building Materials, v. 115, p. 114-124, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. São Paulo: IBRACON, 2014.

PAUL, S. C., ZIJL G. P. A. G. **Crack Formation and Chloride Induced Corrosion in Reinforced Strain Hardening Cement-Based Composite (R/SHCC)**. Journal of Advanced Concrete Technology. v. 12, p. 340-351, 2014.

QIAN, S; *et al.* **Self-Healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials**. Cement & Concrete Composites, v.31, p.613-621, 2009.

ROIG-FLORES, M. *et al.* **Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests**. Construction and Building Materials, v. 114, 2016.

SHABAB, M. E. *et al.* **Effect of mineral admixtures on the Properties of mass concrete – A review**. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering ISSN 2319-5347, Vol. 02, No. 04, ResearchGate, October 2013. Pakistan, 2013

TAMBARA, R. F. *et al.* **Avaliação do desempenho mecânico e absorção capilar de concretos com incorporação de aditivos cristalizantes submetidos a danos nas primeiras idades**. Revista Matéria ISSN 1517-7076, Vol.29, N.1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0355>

TAN, N. P. B; *et al.* **Silica-based self-healing microcapsules for self-repair in concrete**. Journal of Applied Polymer, v. 10, 2016.

TANG, W; KARDANI, O; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review**. Construction and Building Materials, v.81, p.233-247, 2015.

TER HEIDE, N. **Crack healing in hydrating concrete**. Thesis (Master of Applied Science) - Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Microlab,Delft, 2005.

TER HEIDE, N; SCHLANGEN, E. **Crack healing of early age cracks in concrete**. Measuring and Modeling Concrete Properties, p.273-284, 2007.

TITTELBOOM, K. V; DE BELIE, N. **Self-healing in cementitious Materials – A review**. Materials, v.6, p.2182-2217, 2013.

TORRES, A. da S; GUIMARÃES, D; FILHO, L. C. P. da S. **QUALIFICAÇÃO DO ENSAIO CAIM DE CORROSÃO ACELERADA**. 48ºCongresso Brasileiro do Concreto. IBRACON ISSN 85-98576-09-3, 2006.

VENQUIARUTO, S. D. **Influência Da Microfissuração Causada Nas primeiras Idades Na Durabilidade De Concretos Ao Longo Do Tempo (Self-Healing)**. 2016. Tese (Doutorado em Construção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

WANG, L.; UEDA T. **Mesoscale Modelling of the Chloride Diffusion in Cracks and Cracked Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology. 2011; v. 9, n.3, p. 241–249.

WHITE, S. R; *et al.* **Autonomic healing of polymer composites**. NATURE, v.409, p 794-797, 2001.

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

YANG, Y; YANG, E; LI, V.C. **Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age**. Cement and Concrete Research, v.41, p.176-183, 2011.

ZHANG, C. *et al.* **Corrosion resistance of RC/UHTCC beams with various Healing promoters in marine environment**. Cement and Concrete Composites. v. 131, 2022.

ZHONG, W; YAO, W. **Influence of damage degree on self-healing of concrete**. Construction and Building Materials, v.22, p.1137-1142, 2008.

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