

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL FUMACO TAMBARA

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ADITIVOS
CRISTALIZANTES**

**Alegrete
2022**

RAFAEL FUMACO TAMBARA

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ADITIVOS
CRISTALIZANTES**

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: Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2022**

RAFAEL FUMACO TAMBARA

AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES

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 e aprovado em: 15 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

PROFA. DRA. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA - ORIENTADORA
PROF. DR. JELSON BUDNY - UNIPAMPA
PROF. ME. ALDO LEONEL TEMP



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 13:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDO LEONEL TEMP, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 14:38, 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 **0759690** e o código CRC **1A5A64DE**.

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos que sempre me apoiaram e me incentivaram a crescer. Dedico também a todos os mestres e doutores que dividiram sua sabedoria comigo e tornaram este trabalho possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial a minha orientadora, Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, por ser um exemplo de pessoa, profissional e professora, por ter aceitado me orientar neste trabalho de conclusão de curso e pelo tempo dedicado a me auxiliar durante todo o período de realização deste trabalho.

Agradeço a minha namorada Thamiris, por me apoiar das mais diversas formas para conclusão dessa caminhada. Obrigada pelo companheirismo e por estar ao meu lado sempre! Agradeço aos meus familiares pelo empenho e por sempre me apoiarem para a realização e conclusão do curso de graduação, sempre me desejando o melhor da vida.

Aos amigos que a cidade de Alegrete me proporcionou a conhecer e aos que conheci graças a UNIPAMPA, em especial aos meus colegas de curso Alvimar, Bernardo, Carlos Eduardo, Pedro, Jhulianni, Luíza, Mayara, Matheus e Thais pelos momentos juntos e pelos dias e noites de estudos, agradeço por ter vivido essa experiência com vocês. Aos professores, mestres e doutores que em algum momento passaram em minha vida compartilhando conhecimentos comigo. Aos membros da banca, Prof. Dr. Jaelson Budny e Prof. Me. Aldo Leonel Temp por todo o apoio e contribuições para comigo e para este trabalho. Desejo muita saúde, sucesso e tudo de bom para todos.

Agradeço aos técnicos Marcelo de Jesus Dias de Oliveira e a Raquel dos Santos Machado pelo auxílio no laboratório para a execução deste trabalho e obrigado ao colega Carlos Eduardo Keller Bertolo pelo auxílio na elaboração dos ensaios e coleta de dados.

RESUMO

TAMBARA R. F. **autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes**. Orientadora: Simone Dornelles Venquiaruto. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2022.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência na autocicatrização de fissuras em concretos estruturais produzidos com cimento Portland (CP V ARI – RS) e utilizando diferentes aditivos cristalizantes. Após a produção dos concretos, parte das amostras foram submetidas a danos de compressão nas idades de 3 e 14 dias. Os pré-carregamentos foram executados em laboratório e para cada idade de carregamento foram rompidas até o limite, três amostras de cada traço. A partir do valor médio de ruptura obtido foi determinado o percentual de carga que seriam aplicados em parte dos concretos (75% do $f_{ck_{méd}}$). Antes e após o carregamento os corpos de prova permaneceram em cura submersa visando promover um aumento da ocorrência da autocicatrização. Os ensaios de controle (resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade) foram realizados nas idades de 28 e 76 dias. Os resultados obtidos permitem concluir que: (i) através do ensaio de resistência à compressão axial constatou-se que os aditivos cristalizantes aumentaram a resistência mecânica do concreto; (ii) a utilização dos aditivos cristalizantes promoveu uma redução significativa da absorção de água por capilaridade na idade de 28 para 76 dias; (iii) a idade do carregamento não influenciou significativamente na autocicatrização dos concretos. Conclui-se que todos os aditivos cristalizantes analisados apresentaram a mesma tendência de comportamento, de redução da absorção de água por capilaridade com o passar do tempo e aumento da resistência à compressão axial. Em suma, conclui-se que a utilização de aditivo cristalizante contribuiu positivamente para o processo de autocicatrização dos concretos investigados, melhorando as propriedades avaliadas.

Palavras-Chave: *autocicatrização, aditivos cristalizantes, concreto, fissuras*

ABSTRACT

TAMBARA R. F. **autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes**. Orientadora: Simone Dornelles Venquiaruto. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2022.

The present work aims to evaluate the influence on the self-healing of cracks in structural concrete produced with Portland cement (CP V ARI – RS) using different crystallizing additives. After the preparation of the concrete, samples were tested for compressive strength at the ages of 3 and 14 days. The preloads were carried out in the laboratory and for each age of loading, three samples of each trait were broken up to the limit. From the mean failure value obtained, the percentage of load that would be applied to part of the concrete (75% of f_{cj}) was determined. Before and after loading, the specimens remained in submerged curing in order to increase the self-healing. Control tests (axial compressive strength and water absorption by capillarity) were performed at the ages of 28 and 76 days. The results obtained showed that: (i) through the axial compressive strength test, it was found that the crystallizing additives increased the mechanical strength of the concrete; (ii) the use of crystallizing additives promoted a significant reduction in water absorption by capillarity at the age of 28 to 76 days; (iii) loading age did not significantly influence the self-healing of concrete. It was concluded that all the crystallizing additives analyzed showed the same tendency of reduction of water absorption by capillarity over time and increase of the compressive strength. In summary, it is concluded that the use of crystallizing additive contributed positively to the self-healing process of the investigated concretes, improving the properties evaluated.

Keywords: self-healing, crystallizing additives, concrete, cracks

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Autocicatrização do Concreto.....	24
Figura 2 - Causas físicas, químicas e mecânicas da autocicatrização natural.....	25
Figura 3 - Processo de formação dos cristais no interior do concreto.....	32
Figura 4 - Organização do programa experimental.....	42
Figura 5 - Distribuição granulométrica da areia.....	45
Figura 6 - Distribuição granulométrica da brita 1.....	46
Figura 7 - Fluxograma da Etapa 2: Passo a passo dos processos de fissuração dos concretos por traço, cura e ensaios de controle.....	49
Figura 8 – Resistência média à compressão axial nas idades de 3, 7 e 14 dias para concretos não submetidos a carregamentos.....	53
Figura 9 - Resistência média à compressão axial dos concretos com diferentes carregamentos.....	54
Figura 10 - Efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos em função dos aditivos utilizados.....	57
Figura 11 - Comportamento dos concretos frente a absorção de água para as idades de 28 dias e 76 dias.....	62
Figura 12 - Efeito isolado da variável “Idade de ensaio” na absorção de água por capilaridade dos concretos.....	64
Figura 13 – Ascensão da água para o concreto de referência – após o ensaio de absorção na idade de 76 dias.....	65
Figura 14 – Ascensão da água para o concreto com aditivo cristalizante - X - após o ensaio de absorção na idade de 76 dias.....	66
Figura 15 – Ascensão da água para o concreto com aditivo cristalizante - Y - após o ensaio de absorção na idade de 76 dias.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterizações química do cimento CP V ARI - RS.....	44
Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo	44
Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo.....	46
Tabela 4 - Caracterizações químicas do aditivo X	47
Tabela 5 - Aditivo cristalizante, teor de argamassa, consumo de cimento	48
Tabela 6 - Resistência à compressão axial aos 28 dias sem pré-carregamento	55
Tabela 7 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 3 dias.....	55
Tabela 8 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 14 dias.....	55
Tabela 9 - Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial	56
Tabela 10 - Análise da variância (ANOVA) entre os aditivos cristalizantes aos 28 dias	58
Tabela 11 – Resultados da absorção média de água por capilaridade aos 28 dias e 76 dias.....	60
Tabela 12 - Variação percentual da absorção de água por capilaridade dos 28 dias para os 76 dias.....	61
Tabela 13 - Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade entre os aditivos	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos com aditivos cristalizantes em concretos para avaliação–das propriedades mecânicas	40
Quadro 2 - Trabalhos com aditivos cristalizantes para avaliação das propriedades de durabilidade.....	41
Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos materiais	43
Quadro 4 - Quantitativo de corpos de prova (CPs) por traço para os ensaios de controle aos 28 dias.	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)

°C – Graus celsius

CA – Aditivo Cristalizante

Ca²⁺ – Cálcio

CaCO₃ – Calcita

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CEM II/A-L – Cimento Portland II – Calcário

cm - Centímetro

CO₃²⁻ – Carbonato

CP II / A-L Cimento Portland II – Calcário

CP II-F – Cimento Portland II – Fíler

CP II-E – Cimento Portland II – Escória

CP III RS – Cimento Portland III – Resistente a Sulfato

CP IV – Cimento Portland IV - Pozolânico

CP V ARI – Cimento Portland V – Alta Resistência Inicial

CP V ARI - RS – Cimento Portland V – Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfato

CPP – Classe G – Cimento Portland para Poços de Petróleo

CPs – Corpos de Prova

fck – Resistência Característica do Concreto à Compressão

fcm – Resistência Média do Concreto à Compressão

ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica

JCI – Japan Concrete Institute (Instituto Japonês do Concreto)

MPa – MegaPascal

mm – Milímetro

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

pH – Potencial de Hidrogênio

PRAH – Aditivos Redutores de Permeabilidade para condições de Pressão Hidrostática

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

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UNISINOS – Universidade Federal do Vale dos Sinos

UR – Umidade Relativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.1.3	Justificativa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Mecanismos de Microfissuração do Concreto	19
2.1.1	Fissuração no Estado Plástico	19
2.1.2	Fissuração no Estado Endurecido	19
2.1.2.1	Fissuração por Ação Física	20
2.1.2.1.1	Movimentação de Fôrmas e Escoramento	20
2.1.2.1.2	Recalques de Fundação	20
2.1.2.1.3	Acidentes	21
2.1.2.2	Fissuração por Ação Química	21
2.1.2.2.1	Fissuração por Ação de Cloretos	22
2.1.2.2.2	Fissuração por Ação de Sulfatos	22
2.1.2.2.3	Fissuração por Reação Álcali-Agregado	22
2.2	Autocicatrização de Materiais Cimentícios (Self-Healing)	23
2.2.1	Tipos de Autocicatrização	23
2.2.1.1	Cicatrização Natural	24
2.2.1.2	Cicatrização Autônoma	25
2.2.1.3	Reparo Ativado	26
2.2.1.4	Cicatrização Autógena	27
2.2.1.5	Cicatrização/Reparo Modificado	27
2.2.1.6	Autocicatrização/Reparo	27
2.3	Fatores Intervenientes na Autocicatrização em Materiais Cimentícios	27
2.3.1	Aglomerantes	27
2.3.2	Relação Água/Aglomerante	28
2.3.3	Idade e Abertura de Fissuras	29
2.3.4	Ambiente de Exposição	30
2.4	Aditivos cristalizantes	31
2.5	Autocicatrização de Materiais Cimentícios com Aditivos Cristalizantes – Estudo de Casos	33
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42
3.1	Etapa 1 – Caracterização dos Materiais	43
3.1.1	Cimento	43
3.1.2	Agregado Miúdo	44
3.1.3	Agregado Graúdo	45
3.1.4	Aditivo Cristalizante	46
3.1.5	Aditivo Superplastificante	47
3.1.6	Água	47
3.2	Etapa 2 – Produção dos Concretos	47
3.2.1	Pré-carregamento dos Concretos	48

3.3	Etapa 3 – Ensaio de Controle.....	51
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	53
4.1	Resistência à Compressão Axial.....	53
4.2	Absorção de Água por Capilaridade.....	59
4.2.1	Ascensão de água nos concretos	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
6	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	69
7	REFERÊNCIAS	70

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 mecânico é um dos produtos mais utilizados na Construção Civil. No entanto, apesar de resistente, o concreto pode estar sujeito a processos de fissuração quando exposto a esforços excessivos, variações de temperatura, agentes agressivos, infiltrações, dentre outros fatores. Segundo a norma brasileira (ABNT 6118:2014, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), o limite de abertura de fissuras no concreto é de no mínimo 0,2mm de espessura quando se encontra em um estado de agressividade ambiental de classe IV e no máximo 0,4mm quando encontra-se em classe I. Quando uma determinada estrutura de concreto apresenta fissuras de maiores espessuras, é necessária uma avaliação técnica para encontrar outro meio para repará-las, a fim de evitar a entrada de água e substâncias agressivas que possam vir a degradá-la com o passar do tempo.

A autocicatrização é um fenômeno de auto recuperação que acontece em concretos microfissurados. Segundo o comitê RILEN 221-SCH (2013), esse processo envolve o fechamento de microfissuras de um material que tenha sido danificado por algum processo anteriormente, sem necessariamente apresentar uma melhoria na performance desse material. Por definição, a autocicatrização é a habilidade dos materiais de repararem fissuras de forma autônoma, ou seja, sem intervenções externas (GHOSH, 2009, *apud* BIACHIN, 2018).

Embora tenha sido observado pela primeira vez, há muitos anos, o fenômeno de autocicatrização vem surgindo como um conceito alternativo na prevenção e gestão de danos no concreto (BERNARDINO, 2016). No Brasil, a autocicatrização de concretos tem chamado a atenção de alguns pesquisadores, sendo um tema bastante abordado por trabalhos científicos na última década (VIEIRA, 2008; BERNARDINO, 2016; VENQUIARUTO, 2017; CAPELLESSO, 2018; BERNARDI *et. al.*, 2018; OLIVEIRA, 2019; ZIEGLER, 2020).

Os materiais de autocicatrização, denominados como self-healing, podem ser materiais com capacidade interna autógena para reparar danos ou com ajuda mínima de algum estímulo externo desenvolvendo reparação de maneira autônoma (DE ROOIJ *et. al.*, 2013, *apud* CAPELLESSO, 2018). A autocicatrização autógena vem da junção da autocicatrização natural e a autocicatrização autônoma, sendo a

autônoma onde se utiliza materiais cimentícios complementares, como escória de alto forno e o uso de aditivos cristalizantes.

Os aditivos cristalizantes podem ser utilizados nas estruturas de concreto de duas formas, como um impermeabilizante (aplicado em forma de pintura em estruturas acabadas), ou incorporados na mistura durante a produção do concreto, formando uma barreira de cristais insolúveis impedindo a entrada de água e agentes agressivos na estrutura. Segundo Ferrara *et. al.* (2014), *apud* Bianchin (2018), esses aditivos também possuem a capacidade de promover reações de hidratação posteriores, toda vez que o cristalizante entrar em contato novamente com a água ou estiver submetido a um aumento significativo da umidade. Implicando na potencialização do fenômeno de autocicatrização, visto que sempre que houver fissuras devido a entrada de água, haverá reações secundárias de hidratação.

Este trabalho tem como proposta avaliar a capacidade de autocicatrização autógena de concretos estruturais sem e com adição de aditivo cristalizante, submetidos a processos de microfissuração nas primeiras idades. O aditivo será incorporado ao concreto durante a sua produção, utilizando a dosagem recomendada pelo fabricante. O programa experimental será desenvolvido no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da UNIPAMPA, campus Alegrete/RS.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a contribuição de aditivos cristalizantes no processo de autocicatrização autônoma de concretos estruturais (25MPa) submetidos a um processo de microfissuração nas primeiras idades em comparação a concretos estruturais não fissurados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas de compressão;
- b) Avaliar a influência da idade do carregamento nas propriedades mecânicas de compressão;

c) Avaliar o desempenho dos concretos descritos anteriormente quanto à durabilidade por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade.

1.1.3 Justificativa

Segundo Cappellesso (2018), ao se projetar estruturas de concreto armado já são esperadas a ocorrência de algumas fissuras, devido a umidade, variação de temperatura, entre outros fatores. Na indústria da Construção Civil, as empresas durante os processos de concretagens, em geral, procuram controlar alguns fatores (consistência, tempo de transporte, lançamento, adensamento, cura, entre outros) para minimizar ou limitar a quantidade de fissuras nas estruturas de concreto. No entanto, existe muita dificuldade em se conseguir controlar todas as variáveis influentes na microfissuração dos concretos, pois surge a necessidade da obtenção de um conhecimento mais detalhado por meio de ensaios de todos os processos envolvidos.

Em função do exposto, a produção de um concreto com capacidade autoregenerativa tem chamado a atenção do meio técnico e científico em diversos países nas últimas décadas (Roig-Flores, 2016; Bernardino da Silva, 2016; Alazhari *et. al.*, 2017; Luo *et. al.*, 2018; Leyang Lv *et. al.*, 2019; Oliveira, 2019; Reddy, Ramesh e Kumar, 2020; Wu *et. al.*, 2020; Algaifi *et. al.*, 2020; entre outros). Apesar da vantagem que este tipo de concreto apresenta pela capacidade de se autorregenerar sem a necessidade de uma ação externa, a sua produção ainda se mostra onerosa.

No Brasil, a tecnologia dos concretos autocicatrizantes só passou a ser desenvolvida em 2011, pelo laboratório de pesquisa do Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), e tem sido aplicado em projetos específicos, onde se busca maior durabilidade das obras (TAKAGI, 2013). Entre as obras que utilizaram a aplicação de concretos autocicatrizantes destacam-se a laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som, em Copacabana (Rio de Janeiro), a Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio, no centro da cidade do Rio de Janeiro (TAKAGI, 2013). Também foi aplicado nas lajes de fundo de algumas estações da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro. A obra mais recente fica em Porto Alegre, no Edifício Pontal, na aplicação da laje de subpressão, situada abaixo do nível do Lago Guaíba (ZIEGLER, 2020).

A importância do tema impulsionou o desenvolvimento de trabalhos científicos relacionados ao estudo da autocicatrização em algumas universidades brasileiras. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui vários trabalhos abordando este tema, como: “Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto”, elaborado por Bernardino em 2016; “Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-healing)”, elaborado por Venquiaruto em 2017; “Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos”, elaborado por Cappellesso em 2018; “Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes”, elaborado por Ziegler em 2020; “Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades”, elaborado por Bianchin em 2017. Além da UFRGS, a Universidade Federal do Vale dos Sinos (UNISINOS) também possui trabalhos nessa temática como: “Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto”, elaborado por Pacheco em 2020.

A aplicabilidade de concretos com capacidade autoregenerativa se tornam relevantes, não somente pela questão da minimização de custo com reparos, mas também por permitir que a estrutura apresente um melhor desempenho e uma maior vida útil, principalmente em ambientes mais agressivos. Em função do exposto, a relevância dessa pesquisa é justificada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão tratados alguns conceitos importantes, como a microfissuração do concreto, os tipos de autocicatrização, os aditivos cristalizantes e a autocicatrização em materiais cimentícios com introdução de aditivos cristalizantes. A fundamentação teórica trará o embasamento necessário, e contribuirá para o norteamento da pesquisa.

2.1 Mecanismos de Microfissuração do Concreto

Pode-se dizer que, a ocorrência de retração no concreto se dá por dois momentos diferentes, primeiramente no estado plástico e posteriormente no estado endurecido.

2.1.1 Fissuração no Estado Plástico

Quando o concreto se encontra no estado plástico, podem ocorrer fissuras devido a retração plástica, assentamento plástico e a movimentação das estruturas de suporte, no qual o assentamento plástico está diretamente ligado a dois fenômenos: a acomodação das partículas sólidas pela gravidade, causando a sedimentação e, em sentido inverso, a exsudação, que representa a movimentação do ar aprisionado e da água. (LAPA, 2008).

A sedimentação pode causar fissuras nas idades iniciais do concreto, logo após seu lançamento, devido a existência de obstáculos como agregados maiores ou armaduras, nas quais impedem a movimentação homogênea das partículas sólidas. Na retração plástica, sua causa é a perda de água do concreto devido a exposição de sua superfície as intempéries como alta temperatura, vento, baixa umidade relativa do ar. (LAPA, 2008).

2.1.2 Fissuração no Estado Endurecido

Este tipo de fissuração ocorre após o endurecimento do concreto, podendo se manifestar nas primeiras semanas ou até mesmo depois de vários meses. Sua ocorrência pode ser de origem estrutural, química, física e térmica.

2.1.2.1 Fissuração por Ação Física

Podemos classificar as fissuras causadas pela ação física como: movimentação de fôrmas/escoramento; recalques por fundação e também devido a acidentes.

2.1.2.1.1 Movimentação de Fôrmas e Escoramento

Na movimentação das fôrmas o surgimento de fissuras ocorre devido as tensões no concreto, tendo como fase mais crítica sua idade inicial. Segundo Dal Molin (1989), algumas das causas da ocorrência dessa movimentação se dá pela: remoção temporária dos escoramentos para dar acesso a equipamentos e materiais; falta de travamento do escoramento; deslocamento das escoras ocasionadas por vibrações excessivas de veículos, pessoas e equipamentos; escoramento fora de prumo; escoras muito esbeltas; apoio inadequada das escoras e pela mão de obra pouco qualificada.

Nos casos em que essa movimentação ocorre antes que o concreto tenha atingido sua resistência para que sua forma não se altere mais, pode ocasionar danos na estrutura. Isso se dá, pois, a resistência do concreto está atrelada às ligações internas na sua microestrutura. Portanto, se essas ligações não geram resistência suficiente para o concreto se manter unido, a tensão gerada pela gravidade em uma massa que não se encontra totalmente em um estado endurecido, vai ocorrer fissuras (RIPPER; SOUZA, 1998 *apud* VIEIRA, 2017).

2.1.2.1.2 Recalques de Fundação

Os recalques de fundações, ou recalques diferenciais, estão diretamente ligados a deficiências na capacidade de suporte da fundação da estrutura. Segundo Dal Molin, 1989 *apud* Vargas, 1995, quatro são as causas mais frequentes de ocorrência de recalques, são elas:

- Recalques Normais: Ocasionado pela compressão do solo através das cargas dos edifícios, esse tipo de recalque é previsível e pode ser calculado;

- Recalques Indeterminados: São decorrentes do escoamento visco-plástico quando a pressão aplicada ultrapassa a pressão crítica do escoamento. São indeterminados pois há um crescimento mesmo sem o aumento de pressões.

- Recalques por Deterioração das Fundações: Provenientes do apodrecimento das estacas de madeira ou deterioração do concreto de sapatas, tubulões, estacas ou blocos de fundações pela ação de solo ou água agressiva.

- Recalques Imprevisíveis: São recalques devido a construções ou escavações vizinhas; rebaixamento do lençol freático e também pela passagem de túneis ou galerias.

2.1.2.1.3 Acidentes

Neste caso, são considerados diversos processos de fissuramento que em algum momento possam resultar em ações aplicadas localizadamente como por exemplo, choques de veículos como por introdução de esforços de protensão, ou também pela carga proveniente das vigas ou pilares, consideradas como cargas concentradas (SOUZA *et. al.*, 1998).

2.1.2.2 Fissuração por Ação Química

Conforme Andrade (2003), os processos de deterioração no concreto ocorrem devido a reações químicas, que em geral, são ocasionados pela interação química entre os agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento, com exceção dos álcali-agregados, que ocorre entre o álcali e certos agregados do cimento. Na teoria, qualquer ambiente no qual apresente um pH menor que 12,5 pode ser considerado agressivo, visto que com uma redução da alcalinidade, levaria a desestabilização dos produtos de hidratação dos materiais cimentícios.

A maior parte dos problemas causados por agentes químicos são de fluídos agressivos que penetram no interior dos poros no concreto, a penetração desses agentes pode ocorrer de três formas: Difusão, resultante da diferença de concentrações iônicas entre o fluído externo e o interno; pressão hidrostática, oriundo da diferença de pressão entre os fluídos; e das forças capilares, resultantes do mecanismo capilar. (FERREIRA, 2000).

2.1.2.2.1 Fissuração por Ação de Cloretos

Quando se trata de durabilidade do concreto, a corrosão das armaduras está entre os fatores mais prejudiciais. A ação dos íons de cloretos é considerada o maior causador de corrosões das armaduras de concreto. Existem diversas maneiras desses íons chegarem até o concreto, como: aceleradores de tempo de pega; impurezas na água; água do mar e maresia; processos industriais. (LAPA, 2008).

Dos agentes agressivos presentes no concreto, o cloreto é o mais comum e pode ser introduzido pelo uso de agregados contaminados, águas salinas utilizadas como água de amassamento, aditivos aceleradores de endurecimento contendo cloreto de cálcio. Também entre os agentes agressivos encontrados na atmosfera o cloreto é o mais intenso e se encontra em atmosferas marinhas, chegando a uma velocidade de corrosão de 30 a 40 vezes maior nessas regiões (DAL MOLIN, 1989 *apud* HELENE 1986).

2.1.2.2.2 Fissuração por Ação de Sulfatos

De acordo com Dal Molin (1989), os principais sulfatos como o Magnésio, Cálcio e Sódio, são encontrados nas águas do mar, solos e águas subterrâneas e também em certas águas industriais. Os sais, quando presentes no subsolo em estado sólido, acabam não atacando o concreto, porém ao serem dissolvidos na água podem reagir com a pasta de cimento ocasionando sérios efeitos. Essas reações geralmente são acompanhadas pela expansão do concreto, ocasionando fissuras que permitem a entrada de agentes agressivos até que a estrutura fique totalmente comprometida.

2.1.2.2.3 Fissuração por Reação Álcali-Agregado

De maneira geral, a reação álcali-agregado ocorre internamente na estrutura de concreto, os minerais que estão presentes nos agregados reagem com os álcalis (geralmente são provenientes do cimento, da água de amassamento e aditivos químicos), formando um gel higroscópico que, ao entrar em contato com a umidade pode acabar ocasionando fissuras e trincas no concreto, comprometendo sua estabilidade e principalmente sua durabilidade (GOMES NETO *et. al.*, 2013).

As manifestações desse tipo de reação, normalmente se dá pelo aparecimento de fissuras com mapeamento ou pele de crocodilo, que com o passar do tempo, vai aumentando de tamanho, abertura e extensão. Em certos casos, a geometria e até mesmo a armadura, podem influenciar nas fissurações (fissuras alinhadas com as armaduras ou ao comprimento do pilar/viga) (DAL MOLIN, 1989 *apud* HOBBS, 1978).

2.2 Autocicatrização de Materiais Cimentícios (Self-Healing)

Como visto anteriormente, o concreto possui certa facilidade em formações de fissuras devido à resistência baixa a tração, por este motivo, o concreto é combinado com o uso de aço para resistir a essas cargas. Porém, apesar de restringirem a largura das fissuras eles não previnem completamente a abertura dessas fissuras, colocando em risco a estrutura com a entrada de agentes agressivos (TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Várias técnicas estão sendo testadas para que novas tecnologias possam ser aprimoradas com o intuito de elaborar concretos que sejam capazes de se autorreparar devido a abertura de fissuras (CAPPELLESSO, 2018).

O conceito foi inspirado através do ponto de vista biológico de tecidos autorreparáveis em humanos, plantas e microrganismo. Tendo como objetivo deste material aumentar a vida útil de estruturas e sistemas no qual sejam implementados (TAN *et. al.*, 2016).

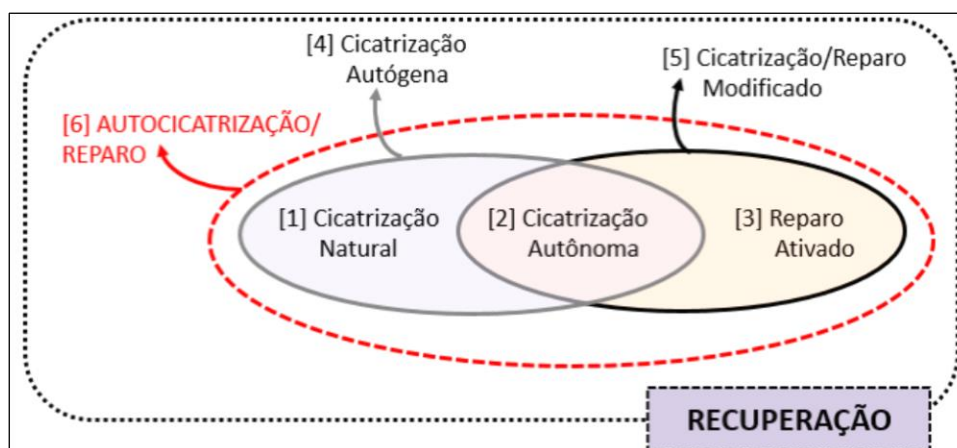
Em 2005, teve como marco a criação do Comitê Técnico 221-SHC, para tratar dos “fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”, onde a partir do qual começaram a ser desenvolvidas diversas abordagens para desenvolvimento de concretos que tenham a capacidade de reparar suas próprias fissuras. Nos anos seguintes, uma série de outros comitês começaram a elaborar pesquisas sobre o tema onde também tiveram uma grande contribuição em despertar o interesse de pesquisas a esse tópico (BERNARDINO DA SILVA, 2016).

2.2.1 Tipos de Autocicatrização

Devido à enorme quantidade de trabalhos sendo desenvolvidos abordando o tema sobre autocicatrização de fissuras em concreto, e a devida falta de padronização quanto a terminologia empregada por seus pesquisadores, foi buscado pelos comitês

técnicos criados no JCI e RILEM, sistematizar os conceitos e classificar os tipos de autocicatrização (BERNARDINO DA SILVA, 2016). Contudo, IGARASHI *et. al.* (2009), propôs uma classificação mais detalhada quanto aos tipos de autocicatrização de concreto: a cicatrização natural, cicatrização autônoma, reparo ativado, cicatrização autógena, cicatrização/reparo modificado e autocicatrização/reparo. A Figura 1, apresenta os tipos de autocicatrização possíveis de ocorrerem no concreto.

Figura 1 - Tipos de Autocicatrização do Concreto



Fonte: Adaptado de JCI – TC075B (2009)

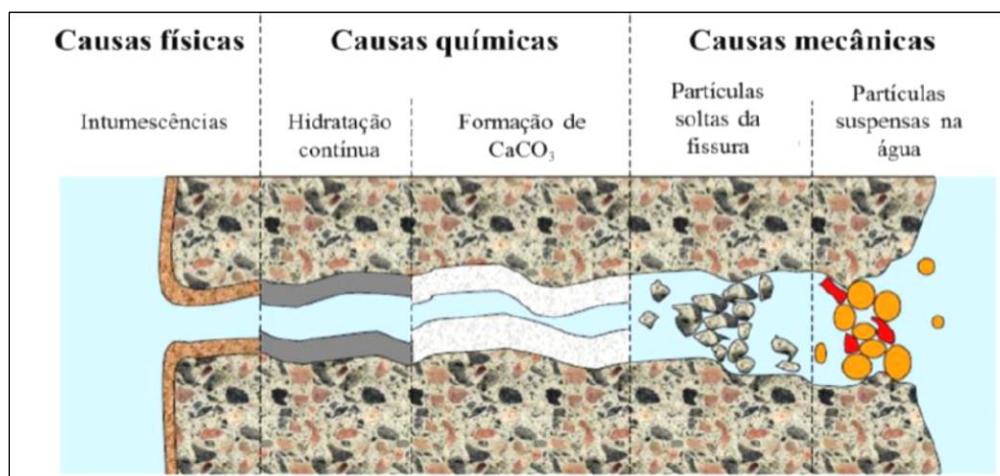
2.2.1.1 Cicatrização Natural

É um fenômeno no qual as fissuras do concreto são naturalmente preenchidas em ambientes com a presença de umidade, sem qualquer arranjo especial no projeto do material (IGARASHI *et. al.*, 2009).

Para Tittelboom; De Belie (2013), existem três condições especiais para que ocorra a autocicatrização natural: a restrição da abertura de fissuras, o fornecimento de água, hidratação contínua e cristalização.

Segundo De Rooij *et. al.* (2013), a diminuição da largura de uma fissura com o tempo é um exemplo de recuperação contra a ação ambiental por meio da autocura. Existem várias causas para isso, na qual pode-se distinguir entre: causas físicas, químicas e mecânicas, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Causas físicas, químicas e mecânicas da autocicatrização natural



Fonte: DE ROOIJ *et. al.* (2013)

A causa física, é proveniente do inchaço da pasta de cimento hidratado que estão próximas as faces da trinca, este fenômeno ocorre quando a água é absorvida pela pasta de cimento hidratado e atinge o espaço entre os constituintes da pasta, quando ocorre a secagem do concreto, a fissura poderá aumentar novamente. Já na causa química, existem dois processos, sendo o primeiro a hidratação contínua do cimento, quando há presença de água e grãos de cimento anidro que crescem no espaço livre da fissura, esses produtos de hidratação ocupam cerca do dobro do espaço do grão de cimento original. No entanto, a hidratação contínua não é capaz de reparar totalmente a fissura, mas, assumindo uma pequena largura de fissura de 0,1mm e aliada a outras causas, pode-se obter a autocura. O segundo processo químico é a formação de carbonato de cálcio, esse processo se dá pela junção dos íons de cálcio da água dos poros do concreto (Ca^{2+}) com os íons carbonato da água na fissura (CO_3^{2-}) presentes na água da fissura. O processo depende da temperatura, pH e concentração dos reagentes. Para a causa mecânica, existem duas causas que contribuem para a autocura, a presença de partículas de suspensão e partículas devido as fraturas sofridas pelas fissurações.

2.2.1.2 Cicatrização Autônoma

Fenômeno no qual as fissuras são preenchidas no concreto com uso de material especial, como por exemplo o uso de materiais cimentícios suplementares apropriados para que exerçam efeitos favoráveis ao preenchimento de fissuras, ou

até mesmo o aceleração desse processo, em um ambiente com a presença de umidade (IGARASHI *et. al.*, 2009).

Neste processo, as adições são incorporadas propositalmente na matriz de cimento, em um ambiente contendo a presença de umidade, com o intuito de fechar a fissura ou de acelerar a sua cura. A partir disso, o uso de adições com propriedades pozolânicas como a cinza volante, pode ser considerado um princípio da cicatrização autônoma, pois a hidratação contínua desses materiais possui um alto potencial de cicatrização no concreto (JCI – TC075B, 2009 *apud* OLIVEIRA, 2019).

Segundo Sisomphon *et. al.*, (2012) *apud* Ziegler (2020), esse processo também pode ser aprimorado com a utilização de produtos comerciais, chamados de aditivos cristalizantes.

Conforme Bianchin (2018), nos concretos, o mecanismo de aumento da durabilidade através do uso de cristalizantes se dá pela diminuição da porosidade capilar. Parte dessas reações e fechamento dos poros ocorre ao mesmo tempo que à hidratação, quando o aditivo cristalizante e o cimento consomem a umidade excedente presente na mistura.

Contudo, esses aditivos possuem também a capacidade em promover reações posteriores de hidratação, sempre que o cristalizante entrar em contato com a água ou submetido a um aumento de umidade, implicando na potencialização do fenômeno de autocicatrização, visto que a formação de fissuras devido a entrada de água se dá toda vez que ocorrem reações secundárias de hidratação, isso também pode acontecer em idades mais avançadas (BIANCHIN, 2018).

2.2.1.3 Reparo Ativado

Fenômeno no qual as fissuras são preenchidas por um mecanismo colocado previamente no concreto com a finalidade de reparar suas fissuras de forma autônoma (IGARASHI *et. al.*, 2009).

A propriedade de autocura do concreto pode ser realizada pela introdução de agentes biológicos (bactérias) no concreto. Quando as fissuras são expostas a umidade, as bactérias são ativadas. Existem dois métodos para implementar as bactérias no concreto utilizados por pesquisadores para entender o efeito nas propriedades curativas do concreto, o método direto e o método do encapsulamento (YATISH REDDY; RAMESH; KUMAR, 2020).

2.2.1.4 Cicatrização Autógena

Essa classificação engloba a cicatrização natural e a cicatrização autônoma, é um fenômeno de preenchimento de fissuras em ambientes em que há presença de umidade (IGARASHI *et. al.*, 2009).

2.2.1.5 Cicatrização/Reparo Modificado

Abrange a cicatrização autônoma e o reparo ativado, neste fenômeno as fissuras são preenchidas/reparadas pela utilização de concretos especiais no qual são produzidos a partir de projetos específicos para essa finalidade de preenchimento/reparo de fissuras (IGARASHI *et. al.*, 2009).

2.2.1.6 Autocicatrização/Reparo

É um fenômeno global de preenchimento de fissuras no concreto, onde não há intervenção direta do homem no reparo (IGARASHI *et. al.*, 2009).

2.3 Fatores Intervenientes na Autocicatrização em Materiais Cimentícios

Conforme Bianchin (2018), há inúmeros fatores que podem influenciar na resistência e estanqueidade do concreto, como: a composição do concreto, relação água/aglomerante, gravidade dos danos, tipo de cimento, condições de umidade, idade do concreto quando ocorreu a fissuração, período e o tipo de cura e a largura e tortuosidade da fissura.

Para uma melhor compreensão do trabalho, nos próximos tópicos serão analisados alguns desses fatores, entre eles destacam-se: O tipo de cimento (aglomerantes), relação água/aglomerante, idade e abertura de fissuras e ambiente de exposição.

2.3.1 Aglomerantes

Conforme Gjorv (2015) *apud* Cappellesso (2018), os aglomerantes exercem a maior influência na autocicatrização das fissuras no concreto quando são relacionados

à cicatrização autógena. Mesmo a relação água/aglomerante sendo de enorme importância, o tipo de cimento e o sistema aglomerante, também podem ser muito significativos.

No entanto, ainda há bastante escassez de pesquisas que abrangem os diferentes tipos de cimentos, ao se tratar de propriedades de autocicatrização. Para que se possa ter uma melhor compreensão dos produtos formados na autocicatrização de fissuras no concreto devido aos tipos de cimento utilizado, é preciso lembrar os compostos químicos presentes no cimento. Para sua produção são utilizadas matérias primas, como: calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, assim, com a fusão desses materiais resultam-se produtos mais complexos quando se alcança um equilíbrio e obtém-se o clínquer, que é o produto base na fabricação do cimento Portland. A principal significância desses compostos é de se transformarem em fases hidratadas a partir da presença de água, fazendo assim com que se resulte no endurecimento da matriz cimentícia. (CAPPELLESSO, 2018).

Cimentos Portland compostos de materiais pozolânicos ou com escória de alto forno, geram uma quantidade de C-S-H considerável, quando comparados com os cimentos puros. Com isso, nesse tipo de cimento ocorre uma menor formação de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) (GJØRV, 2015 *apud* CAPPELLESSO, 2018). As pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, produzindo C-S-H com menor proporção, assim, contribuindo com o fechamento das fissuras. Portanto, os cimentos que são constituídos com adições pozolânicas podem acarretar na autocicatrização devido às reações pozolânicas provenientes da hidratação incompleta dos materiais constituintes do cimento (CAPPELLESSO, 2018).

Outro fator no qual afeta a retração do concreto é a finura. Os cimentos Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), onde há presença de mais finos, aumenta de forma mais rápida a resistência do concreto, devido a área de superfície das partículas de clínquer, levando a uma maior taxa de hidratação (DESHPANDE; DARWIN; BROWNING, 2007).

2.3.2 Relação Água/Aglomerante

Outro fator muito importante que está relacionado na autocicatrização do concreto é a relação água/aglomerante. Quando se trata de uma relação baixa, podem ocorrer sobras de aglomerantes anidros nos materiais cimentícios que, ao entrarem

em contato com a água, irão servir como produtos de autorreparação. Já para relações maiores, onde haverá pouca quantidade de anidro ou nenhuma, o autorreparo encontrará dificuldades em relação à hidratação tardia, isso acontece devido a elevada proporção de água junto a mistura, contudo, devido a capacidade maior de lixiviação, poderá ser mais preponderante, exceto quando a quantidade ou dimensões dos poros não exceda esta vantagem (CAPPELLESSO, 2018). Porém, devido ao grau de hidratação da matriz, tem-se uma maior possibilidade da presença de grãos de clínquer não hidratados, no qual estão relacionados diretamente a quantidade de água disponível e conseqüentemente à relação água/cimento. Assim, obtém-se concretos menos porosos e com menos fissuras, onde resultarão na autocicatrização de forma mais prática através dos produtos de hidratação residual. (NA *et. al.*, 2012 *apud* CAPPELLESSO, 2018).

Segundo Neville, 2016 *apud* Cappellesso, 2018, quando o concreto for curado com água, há uma relação de água/aglomerante mínima para que ocorra a hidratação completa da matriz cimentícia, no valor de 0,36. Conforme diz o autor, caso essa relação seja menor do que 0,36 poderá acontecer de não haver espaços suficientes para a acomodação dos produtos de hidratação. No entanto, essa relação pode ser maior que 0,36 se caso a cura da matriz cimentícia seja realizada sem o acesso da água externa na mistura (sistema fechado).

Cappellesso (2018) afirma que misturas com relações água/cimento (a/c) mais elevadas encontrarão mais dificuldade na autorreparação. Segundo o autor, nessa situação haverá uma quantidade muito pequena ou nenhuma de material anidro disponível, devido à maior quantidade de água utilizada inicialmente na mistura.

2.3.3 Idade e Abertura de Fissuras

As reações de hidratação do cimento podem ocorrer durante vários anos, por longos períodos de tempo. No entanto, as reações tendem a ser mais rápidas e intensas durante as idades iniciais do concreto, assim, é possível concluir que a idade do concreto tem relação diretamente na sua capacidade de autocicatrização. Com o aumento da idade, pode significar uma hidratação maior e, conseqüentemente, uma recuperação menor de resistência (BIANCHIN, 2018).

“A idade da abertura de fissuras influencia na colmatação autógena, visto que em pequenas idades os materiais cimentícios têm grande poder de autocicatrização

pela quantidade de cimento não hidratado na matriz” (YANG; YANG; LI, 2011 *apud* CAPPELLESSO, 2018, p. 30). Contudo, em idades mais elevadas, haverá uma hidratação na matriz cimentícia maior, resultando na diminuição de materiais capazes de contribuir para o fechamento das fissuras. Em concretos com idades mais avançadas, também existe uma menor quantidade de vazios capilares que se dá pelo avanço nas reações de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No entanto, segundo Cappellessso (2018), o aglomerante anidro disponível que excede na matriz cimentícia, não se dá apenas pela idade de aberturas das fissuras como também pelo volume de água disponível para a hidratação, com isso a relação água/cimento também apresenta uma enorme influência na quantidade de anidro restante dentro da matriz.

2.3.4 Ambiente de Exposição

O ambiente de exposição em que os concretos fissurados são contidos exercem uma grande influência na autocicatrização autógena, visto que esse fenômeno tem a água como elemento principal para dar início à reação físico-química de cristalização e fechamento de fissuras (ZIEGLER, 2020).

Com isso, Ferrara *et. al.* (2014) *apud* Ziegler (2020), através de estudos, analisaram a cura de concretos no qual foram expostos ao ar com uma umidade relativa (UR) de 20% e 95%, com ciclos controlados com certas variações de temperatura e uma umidade relativa de 95% e, por fim, com concretos submersos na água, confirmando então que fissuras reparadas em ambientes de submersão na água foram mais efetivas. Porém, os autores verificaram ainda, que a presença de aditivos cristalizantes no concreto, resultaram numa grande contribuição na autocicatrização de fissuras com até 0,2mm, mesmo em condições desfavoráveis para o acontecimento deste fenômeno.

Nesse sentido, com o objetivo de intensificar o processo da autocicatrização de fissuras nos concretos, vários trabalhos foram elaborados utilizando ciclos de molhagem/secagem às amostras cimentícias, conforme apresentado a seguir:

Sisomphon *et. al.* (2013), ao analisarem a recuperação do concreto com aditivos cristalizantes onde eram submetidos a diferentes ambientes de exposição, chegaram a uma conclusão que através de ciclos de 12 em 12 horas, sendo 12 horas de molhagem e 12 horas de secagem, pode-se observar uma avaliação mais

favorável, com isso, os autores descreveram uma ordem da condição de ambiente mais eficaz para a menos eficaz: 1º ciclo de molhagem/secagem, 2º imersão em água sem uma troca regular, 3º imersão em água com uma troca regular e por último, 4º a exposição ao ar.

Sakale (2019), também obteve como resultado, que a autocicatrização com o uso de aditivos cristalizantes resultam em uma reparação de fissuras mais rápida e de melhor qualidade quando as amostras são curadas imersas em água.

Maes *et. al.* (2016) *apud* Cappellesso (2018), realizaram ensaios em argamassas de cimento Portland submersos e com ciclos de molhagem/secagem, sendo utilizado em ambos os ensaios a água destilada. Assim como o estudo de Sisomphon *et. al.* 2013, foram realizados ciclos de 12 horas de imersão e 12 horas de secagem. Contudo, nesse trabalho a diferença na autocicatrização em cura submersa não foi muito expressiva, já no ensaio por ciclos, obteve-se após sete ciclos, a reparação de fissuras inferiores a 0,15mm.

Ma *et. al.* (2014), chegaram à conclusão em seus estudos, que a realização de ensaios com ciclos de molhagem/secagem comparado com outros regimes de cura, resultou em um comportamento de fechamento das fissuras mais rápido em comparação à imersão em água, os autores atribuíram esse comportamento a formação de calcita ($CaCO_3$).

O fenômeno da autocicatrização em materiais cimentícios pode ser observado tanto nos períodos de secagem quanto nos ciclos de molhagem. Onde no período em que se encontra imerso, é verificado a hidratação tardia dos grãos de anidro, bem como a ativação dos aditivos cristalizantes, enquanto que no ciclo de molhagem/secagem é perceptível a formação da calcita ($CaCO_3$) na fissura. (SNOECK e DE BELIE, 2015 *apud* ZIEGLER, 2020).

“Assim, o fenômeno da autocicatrização tem a água como agente principal para seu início, mas a alternância entre as condições de cura (ciclos de molhagem e secagem) tende a intensificar tal fenômeno” (ZIEGLER, 2020, p. 41).

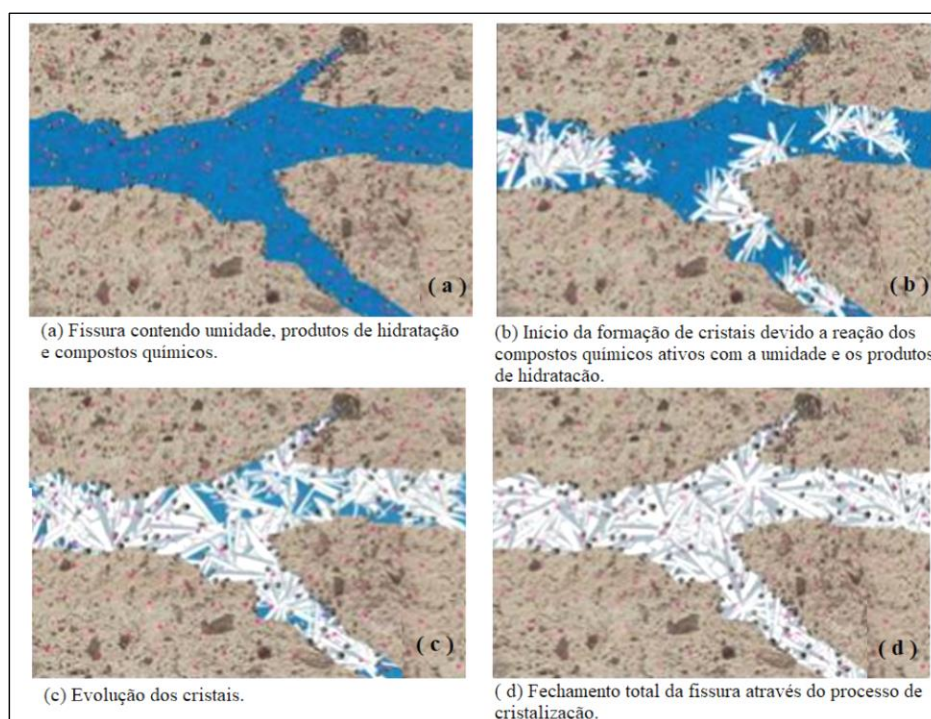
2.4 Aditivos cristalizantes

Conforme o Instituto de Concreto Americano (ACI 212.32-10), aditivos cristalizantes são classificados como Aditivos Redutores de Permeabilidade para condições de Pressão Hidrostática (PRAH). Esse aditivo redutor de permeabilidade é

um produto químico que tem por objetivo bloquear a passagem de água e agentes agressivos para o interior do material através da formação de uma estrutura cristalina, responsável por preencher os poros presentes no concreto.

Sua atuação no concreto ocorre por meio da reação dos compostos químicos ativos que reagem com a água, hidróxido de cálcio e alumínio, formando uma estrutura cristalina. No caso do surgimento de novas fissuras durante a vida útil do concreto, ocorrerá novamente a formação de cristais, fazendo com que a passagem de água e/ou agentes agressivos por esses caminhos seja interrompida. Entretanto, segundo Lema (2015) enquanto não houver presença de água no interior das fissuras, esses cristais ficam “inertes”, sendo somente ativados na presença de água, quando voltam a crescer, protegendo o concreto. Esse processo de formação de cristais por incorporação de aditivo cristalizante no concreto pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Processo de formação dos cristais no interior do concreto.



Fonte: Adaptado de MC – *Bauchemie apud* Alpes (2019).

Takagi (2013) afirma que o uso desses cristalizantes podem ser muito utilizados para reparos de concretos em lugares em que o acesso é mais restrito, dificultando a sua manutenção, como por exemplo nas lajes de subpressão, tomada d'água de barragens e até mesmo nas instalações de resíduos nucleares.

Segundo Ferrara *et. al.* (2014), *apud* Ziegler (2020), diversos produtos de aditivos cristalizantes são comercializados no mercado da construção civil, com suas composições químicas mantidas confidenciais por seus fabricantes. Os aditivos podem ser incorporados durante o processo de fabricação do concreto, ou então na aplicação de pinturas de impregnação em estruturas já finalizadas.

2.5 Autocicatrização de Materiais Cimentícios com Aditivos Cristalizantes – Estudo de Casos

Neste tópico é apresentado um levantamento de alguns trabalhos científicos que abordaram o tema da autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes, bem como os resultados alcançados pelos autores.

Takagi (2013) embasou a sua pesquisa a partir de estudos científicos que mostravam que a cicatrização autógena como um mecanismo capaz de melhorar a colmatação natural do concreto. O autor verificou a partir de uma revisão bibliográfica que um dos mecanismos de gatilhos para ativação do catalisador cristalino (aditivo) é a própria fissura, pois permitia a entrada de água expondo uma nova superfície na qual são formadas por escórias não ativadas e cimentos sub-hidratados. Este catalisador cristalino, favorecia na formação de produtos hidratados nas faces das fissuras, devido à elevação da alcalinidade da água. Baseado nessas informações, Takagi (2013) desenvolveu a sua pesquisa. Objetivando fazer uma análise deste gatilho, foram moldadas amostras de concreto com diferentes cimentos, escória de alto forno, adição de catalisador cristalino, e fibras de vidro. Para a produção dos concretos o autor utilizou três tipos distintos de cimento (CP III RS, CP II-E e CP V ARI), e incorporou nas misturas porcentagens distintas de escória de alto forno nos teores de 55%, 34% e 0% (em relação ao peso de cimento), respectivamente. Após a moldagem e na idade de 28 dias, os corpos de prova foram pré-carregados com uma carga de 90% da carga de ruptura, objetivando gerar fissuras no seu interior. Posteriormente, os concretos foram submersos em água para que ocorresse a autocicatrização. Após a conclusão do período de cura, nas idades de 28, 56 e 84 dias, os concretos foram ensaiados quanto às propriedades mecânicas (resistência a compressão axial e determinação de velocidade de propagação de ultrassom) e de estanqueidade (absorção por capilaridade e difusão de íons de cloreto). Takagi (2013) concluiu que, tanto para a recuperação das propriedades mecânicas quanto para a

estanqueidade, foram obtidos resultados mais satisfatórios para os concretos confeccionados com os cimentos CP III RS, CP V ARI e CP II-E, nesta ordem. Segundo o autor, para as misturas com cimentos CP III RS e CP II-E foi observado uma autocicatrização mais demorada nos corpos de prova que continham escória de alto forno nas idades iniciais, comparadas ao CP V.

Roig Flores *et. al.* (2015) analisou os efeitos da autocicatrização de concretos através de misturas cristalinas em diferentes tipos de exposição ambiental. Para essa verificação foram utilizados corpos de prova fissurados, e curados através de testes de permeabilidade, onde para observação do processo de fechamento das fissuras foi utilizado o microscópio óptico. Os autores optaram por manter uma fissura fixa abaixo de 0,3mm com uma idade de pré-fissuração de 2 dias, o teste de permeabilidade foi realizado no dia seguinte após a pré-fissuração. Após o teste, as amostras analisadas tiveram um tempo de cicatrização previsto de 42 dias. Como variáveis de estudo, foram utilizados uma dosagem de mistura cristalina de 0% para espécimes de controle (referência) e de 4% (espécimes de aditivo cristalizante) em relação ao peso do cimento. Segundo os autores, as amostras foram submetidas a quatro diferentes tipos de exposição a Autocura: imersão em água, contato com água, câmara de umidade e exposição ao ar conforme as condições de laboratórios. Como resultados Roig Flores *et. al.* (2015) verificaram que o processo de autocura foi presente tanto na cicatrização autógena (mistura de referência) quanto na composta de misturas cristalinas. Os autores observaram um comportamento distinto de cicatrização para cada tipo de amostra, dependendo do tipo de exposição ambiental e da presença da mistura cristalina. Também visualizaram que as maiores taxas de autocura (perto de 95%) ocorreu para as amostras contendo aditivo cristalino e armazenadas em imersão em água. Observaram também, que as misturas, que estiveram em contato direto com a água mostraram taxas de cicatrização consideravelmente altas, se comparadas com as misturas submetidas a exposição ao ar. Esses resultados, segundo os autores, confirmam a necessidade da presença de água para a ocorrência da reação de autocura.

Roig Flores *et. al.* (2016) estudaram as propriedades de autocura de concretos de classe C30/37 e C45/55, produzidos com a incorporação de misturas cristalinas (4% pelo peso do cimento) e submetidos a um processo de fissuração nas primeiras idades. Após uma pré-fissuração dos concretos na idade de dois dias, as amostras foram deixadas para autocicatrização durante 42 dias, em três condições distintas de

cura, imersão em água com temperatura de 15°C e 30°C e através de ciclos de molhagem/secagem. O pré-carregamento dos concretos gerou larguras de trincas em torno de 0,10 a 0,40mm. Após o processo cura foi medida a permeabilidade e as espessuras das trincas dos corpos de prova. Como resultados, os autores observaram uma capacidade de cicatrização ótima para as amostras submetidas a cura submersa a água a 30°C, sendo estes resultados melhores dos que os obtidos com a imersão em água a 15°C. Para a condição de cura pelo método da molhagem/secagem, os resultados não foram muito satisfatórios. Os autores também reforçam a importância, do uso de pelo menos dois parâmetros para que se obtenha uma avaliação mais precisa da Autocura de concretos.

Pereira e Nascimento (2017) estudaram os efeitos causados por diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, procurando comparar o desempenho de quatro aditivos cristalizantes encontrados no Brasil. Para a realização da pesquisa foi utilizado seis traços de concreto sem aditivo, quatro com aditivo cristalizante e um traço contendo sílica ativa. Os concretos foram submetidos a ensaios de absorção de água por capilaridade, permeabilidade (método do cachimbo) e resistência a compressão. Através dos resultados obtidos pelos ensaios de absorção de água, os autores verificaram uma redução da absorção capilar em concretos com três dos quatro aditivos testados, nos percentuais de 88,2%, 59,1% e 42,9%, quando comparados ao traço de referência (sem aditivos). Segundo os autores, não foi encontrado mudanças significativas quanto aos resultados obtidos pela resistência a compressão axial devido ao uso dos aditivos cristalizantes. Pereira e Nascimento (2017) também reforçam que a mistura com sílica ativa foi a que apresentou melhor resultado no ensaio de ascensão capilar, apresentando uma redução de 35% comparada ao traço sem aditivo e também apresentou um crescimento de 24,1% na resistência a compressão axial na idade de 28 dias. Com relação ao controle das misturas no estado fresco, os autores reforçam que dois dos aditivos cristalizantes utilizados reduziram o abatimento do concreto (50mm comparado ao traço de referência). Por fim, Pereira e Nascimento (2017) concluem que os diferentes tipos de aditivos cristalizantes testados apresentaram um desempenho distinto entre eles.

Bianchin (2018) estudou a aut cicatrização em concretos produzidos com aditivos cristalizantes fissurados nas primeiras idades com o intuito de comparar o fechamento de fissuras entre o concreto usual (sem aditivo cristalizante) e o concreto

com o uso de aditivo cristalizante. Para isso, foram moldadas amostras com diferentes traços e relações a/c (0,43, 0,50 e 0,66) e com ou sem uso de aditivo cristalizante. As amostras foram pré-carregadas aos 7 dias, após serem curadas por imersão em água a uma temperatura constante (variando na faixa de $23 \pm 2^\circ\text{C}$), segundo a NBR 5738:2015. Algumas amostras foram mantidas sem o carregamento para servir como referência. Após o processo de moldagem e cura, os concretos foram ensaiados aos 28 e 56 dias quanto as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial) e de durabilidade (penetração de íons cloretos). Os resultados obtidos mostraram que os concretos com relações água/aglomerante de 0,43 apresentaram um aumento de desempenho mecânico para os concretos fissurados. Para os concretos fissurados e com a incorporação de aditivos cristalizantes, o autor observou um aumento mais considerável de sua resistência à compressão axial. Em contrapartida, para efeitos de durabilidade, observou um aumento na penetração de íons cloreto. O autor associou os resultados de penetração de íons cloreto aos carregamentos dos concretos e conclui não ter observado nenhum resultado expressivo quanto ao uso dos aditivos cristalizantes.

Helene *et. al.* (2018) investigou a influência de se utilizar aditivos cristalizantes no processo de autocicatrização dos concretos através da penetração de íons cloretos, e também avaliou a sua interferência na vida útil de projeto. Segundo o autor, o aditivo cristalizante tem o papel de forçar a colmatação das fissuras e de reduzir a porosidade da matriz, diminuindo a infiltração dos íons de cloreto. Para o trabalho, Helene *et. al.* (2018) utilizou na produção dos concretos, cimento Portland com escória de alto forno. Foram estabelecidas três relações água/cimento (0,45; 0,55 e 0,65) e a incorporação de aditivos cristalinos em algumas misturas. Para o processo de cura do concreto, os corpos de prova foram deixados em câmara úmida até a data de ensaio, nas idades de 28 e 91 dias. Para a determinação das propriedades dos concretos foram realizados ensaios de compressão axial, penetração de íons de cloreto. Por fim, após análises dos resultados, os autores observaram que os concretos com o uso do aditivo cristalizante mantiveram a resistência a compressão axial praticamente sem alterações, quando comparados ao concreto de referência. Helene *et. al.* (2018) também visualizaram uma redução de até 30% para o ensaio de penetração de íons cloreto, e quanto a vida útil de projeto, observaram um aumento de até 34%.

Oliveira (2019) estudou o potencial de estimulação da autocicatrização em concretos com uso de aditivos cristalizantes. Para o desenvolvimento do trabalho o

autor utilizou matrizes com pouco potencial de cicatrização (maior grau de hidratação), justamente para ter uma melhor análise da atuação do aditivo cristalizante (CA), e promoveu com aplicação de carga, fissuras nos concretos com duas classes de aberturas distintas. O trabalho avaliou a influência da dosagem de aditivos cristalizantes e a recuperação das propriedades mecânicas (resistência à tração por compressão diametral) e de durabilidade (permeabilidade de gás nitrogênio) dos concretos submetidos a fissuração. O processo de cura foi de imersão em água com temperatura de 60°C, sem uma troca regular, com um pH variando em torno de 10,5. Através dos ensaios de tração por compressão diametral e de permeabilidade de gás, o autor quantificou a autocicatrização devido a indicadores de recuperação mecânica e de selamento das fissuras. Concluiu que para ambas as cargas aplicadas, os concretos apresentaram um resultado positivo de restauração, apresentando um excelente desempenho frente os ensaios realizados. O autor associou os resultados encontrados aos 2% de dosagem de aditivo cristalizante.

Ziegler (2020) estudou a autocicatrização de concretos com cimento Portland através do uso de diferentes aditivos cristalizantes. Como variáveis de estudo para o experimento, o autor adotou três tipos de aditivos cristalizantes, uma mistura apenas com sílica ativa para comparação dos efeitos e uma relação de água cimento (CP II-F) de 0,4. Para a cura dos corpos de prova, foram utilizados 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem para intensificar os fenômenos da autocicatrização, sendo que, a abertura de fissuras ocorreu aos 3 dias. Para a obtenção dos resultados foram realizados ensaios, como o ensaio de difusão de íons cloretos (com o objetivo de analisar o desempenho da autocicatrização nas fissuras), o ensaio de microscopia ótica (para medição do fechamento das fissuras), o ensaio de resistência a compressão axial (para a caracterização dos concretos), e também o ensaio de absorção de água por capilaridade. Ziegler (2020) chegou a quatro conclusões sobre os dados coletados. Segundo o autor, a utilização de aditivos cristalizantes e sílica ativa não afetaram a resistência à compressão axial dos concretos, porém reduziram a absorção de água através da capilaridade. Não foi possível a visualização de aberturas de fissuras em todos os corpos de prova, através do ensaio de microscopia ótica. Ziegler (2020) concluiu também que o uso de aditivos cristalizantes reduziu a passagem de íons cloretos pelas fissuras, quando comparados ao concreto referência. Para o autor essa redução foi da ordem de 59,72% na difusão de íons cloretos, conseqüentemente, elevando a vida útil dos concretos em torno de 37 anos. Para os concretos com sílica

ativa foi observado um aumento de 32,15% na difusão de íons cloretos e, conseqüentemente, diminuição da vida útil do concreto em torno de 15,3 anos. Não houve passagem de cloretos nas amostras não fissuradas. Por fim, o autor concluiu que o uso de diferentes aditivos cristalizantes apresentou uma melhora notável na autocicatrização do concreto, enquanto que o uso de sílica ativa apresentou resultados menos satisfatórios.

Polesello e Maus (2020) avaliaram a eficiência do concreto com uso de aditivos cristalizantes quanto à estanqueidade das estruturas, objetivando verificar um incremento em sua durabilidade e vida útil. O estudo abrangeu a análise de concretos produzidos com cimento o CP IV 32 RS e com incorporação de um tipo de cristalizante com três percentuais diferentes de dosagem (0,50%, 0,80% e 1,00% em relação à massa de cimento). A produção dos concretos foi caracterizada por três relações água/cimento (a/c) distintas, definidas em 0,40, 0,50 e 0,60. Após a produção, foram submetidos a dois processos de cura (úmida e submersa), no entanto, os concretos para este ensaio não sofreram um pré-carregamento para geração de microfissuras. A análise quanto ao desempenho foi realizada aos 28 dias de idade pela verificação da resistência à compressão axial e da permeabilidade, determinada por meio da absorção por capilaridade. Como resultado, os autores concluíram que tanto o tipo de cura, quanto a relação a/c e a dosagem do aditivo, apresentam influência significativa nas propriedades do concreto. Porém, no concreto onde utilizou-se a cura submersa, foi observado pelos autores—um melhor desempenho quanto à resistência à compressão do concreto. Para os concretos com maiores teores de aditivos cristalizantes, observaram em uma maior absorção de água por capilaridade.

Martin (2021) buscou avaliar em seu trabalho a autocicatrização de fissuras em concretos com adição de cristalizantes, tanto para estruturas reais como em ensaios de laboratório. Foram analisados a influência de quatro tipos diferentes de ambientes de exposição, sendo eles: ambiente natural, ciclos de molhagem/secagem, submersas com e sem renovação. Para isso, foram moldados corpos de prova cilíndricos (100x200) mm para os ensaios de análise da resistência à compressão e para análise da autocicatrização em laboratório. O cimento Portland utilizado no estudo foi o CP IV 32 RS, com uma relação a/c de 0,43 e uma porcentagem de CA de 3,08%. Foram realizados, aos 14 dias (dia da fissuração) e seis meses após, ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e análise de imagem por microscopia ótica. O autor mostrou que, em laboratório, as amostras que

permaneceram em ambiente submerso, apresentaram os melhores resultados quanto ao percentual de fechamento (85%), seguidas pelas que passaram por ciclos de molhagem e secagem (61%) e as expostas ao ambiente natural (50%). Em obra, a estrutura presente no subsolo 2 apresentou maior número de fissuras e melhor índice de fechamento, em relação ao subsolo 1. O ensaio de propagação de onda ultrassônica indicou que as amostras expostas aos ciclos de molhagem/secagem apresentaram maior percentual de recuperação, o que pode indicar uma maior recuperação interna, segundo o autor. Também concluiu que a resistência dos concretos apresentou um percentual de crescimento médio de aproximadamente 10%, entre os vinte e oito (28) e sessenta e três (63) dias. Por fim, Martin (2021) confirmou o fenômeno de autocicatrização nos concretos com a presença de aditivos cristalizantes, e reforçou a necessidade da presença de água para a ativação do mecanismo.

Vilela *et. al.* (2021) avaliou a eficácia do uso de aditivo cristalizante com diferentes teores (1% e 2%) na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas. Para o estudo foi utilizado o cimento Portland CP V ARI, com uma relação de água/cimento de 0,47. A análise foi realizada através de ensaios de expansão de barras de argamassa pelo método acelerado em RAA em paralelo com ensaios de desempenho mecânico (compressão axial), absorção de água por capilaridade, porosidade e índice de vazios. O autor observou que a presença de produtos alcalinos na composição do aditivo aumentou significativamente as expansões iniciais dentro dos primeiros sete dias. Quanto ao que se refere aos resultados de desempenho mecânico, absorção de água e vazios, mostrou-se um resultado satisfatório, melhorando as propriedades das argamassas.

Os quadros 1 e 2 apresentam um resumo dos trabalhos citados nesse tópico e de suas contribuições. No Quadro 1 são apresentados os trabalhos com aditivos cristalizantes em concretos para avaliação-das propriedades mecânicas, e no Quadro 2, as propriedades de durabilidade.

Quadro 1 - Trabalhos com aditivos cristalizantes em concretos para avaliação-das propriedades mecânicas

Autor (es)	Investigação	% de CA	Tipo cimento	a/c	Ensaio	Conclusão
Takagi (2013)	Autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes tipos de cimentos	2,50	CP III RS, CP II-E, CP V	0,50	Resistência à compressão axial	Melhorou
Roig Flores <i>et. al.</i> (2015)	Capacidade de autocura de concretos com aditivos cristalizantes em diferentes ambientes de cura	4,00	CEM II/A-L ¹	0,45	Teste de fechamento de fissuras	Não influenciou
Roig Flores <i>et. al.</i> (2016)	Efeitos dos aditivos cristalinos na capacidade de autocura do concreto precoce (primeiras idades)	4,00	CP II / A-L	0,45 0,60	Teste de fechamento de fissuras	Não influenciou
Pereira e Nascimento (2017)	Efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto fresco e endurecido	1,00	CP IV	0,60	Resistência à compressão axial	Não influenciou
Helene <i>et. al.</i> (2018)	Avaliação da penetração de cloretos e vida útil de concretos com uso de aditivos cristalizantes	7,96 6,50 5,50	CP III RS	0,45 0,55 0,65	Resistência à compressão axial	Não influenciou
Oliveira (2019)	Potencial do aditivo cristalizante como estimulador da autocicatrização de concretos	0,50 1,00 2,00	CPP – Classe G ²	0,44 e 0,25	Tração por compressão diametral	Melhorou
Ziegler (2020)	Avaliação da autocicatrização de concretos com uso de aditivos cristalizantes	2,20	CP II-F	0,40	Resistência à compressão axial	Melhorou
Polesello e Maus (2020)	Influência do aditivo cristalizante no concreto, avaliando sua eficiência quanto à estanqueidade das estruturas	0,50 0,80 1,00	CP IV 32 RS	0,40 0,50 0,60	Resistência à compressão axial	Melhorou
Martin (2021)	Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório	3,08	CP IV 32 RS	0,43	Resistência à compressão axial	Melhorou
Vilela <i>et. al.</i> (2021)	Avaliar a eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas	1,00 2,00	CP V	0,47	Resistência à compressão axial	Melhorou

Fonte: Elaboração Própria

¹ Cimento CEM II/ AL – É um cimento Portland de calcário

² CPP – Classe G – É um cimento Portland para Poços de Petróleo

Quadro 2 - Trabalhos com aditivos cristalizantes para avaliação das propriedades de durabilidade

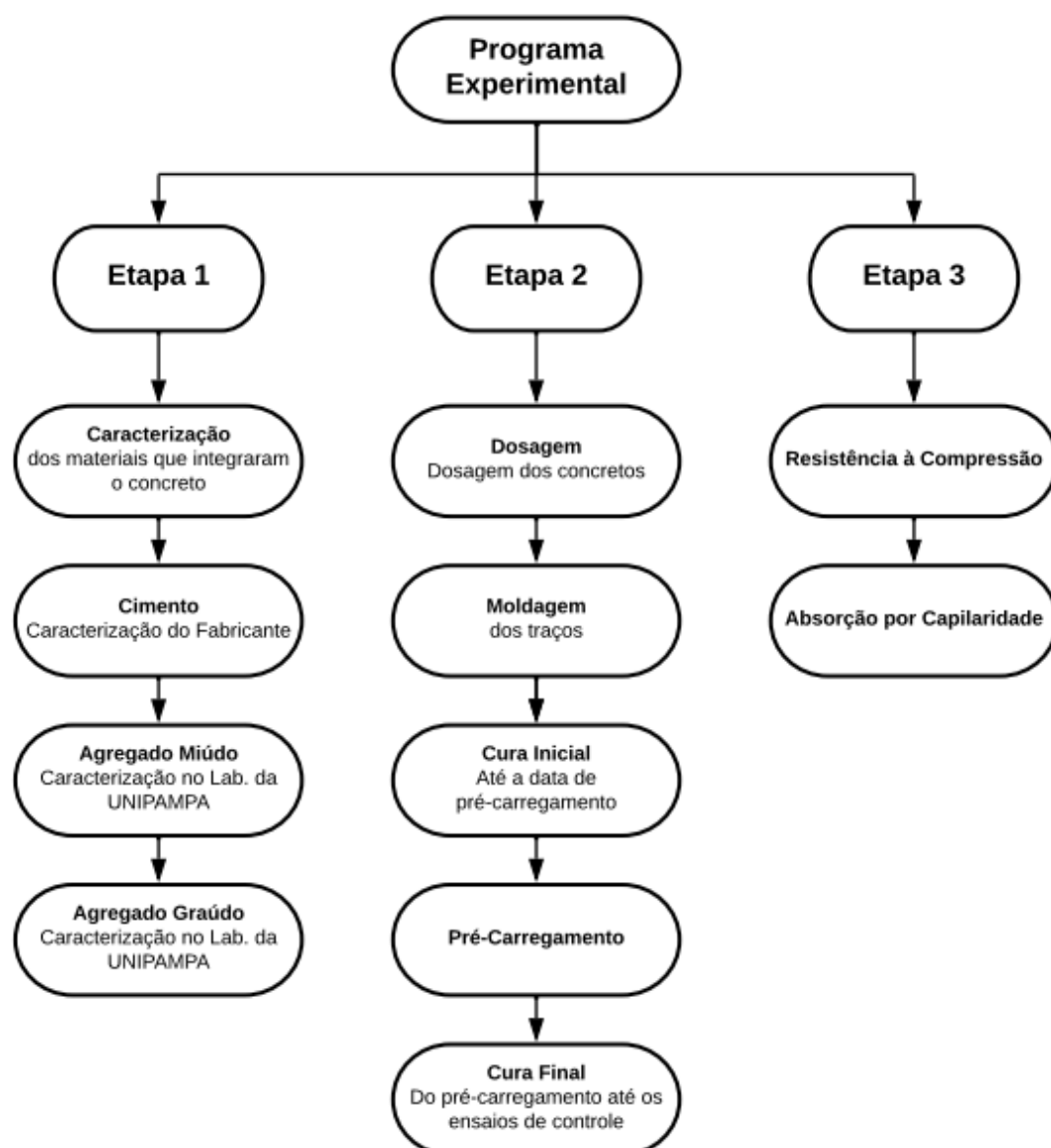
Autores	Investigação	% CA	Tipo cimento	a/c	Ensaio	Conclusão
Takagi (2013)	Autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes tipos de cimentos	2,50	CP III RS CP II-E CP V	0,50	Teste de permeabilidade	Melhorou
Roig Flores <i>et. al.</i> (2015)	Capacidade de autocura de concretos com aditivos cristalizantes em diferentes ambientes de cura	4,00	CP II/A-L	0,45	Teste de permeabilidade	Melhorou
Roig Flores <i>et. al.</i> (2016)	Efeitos dos aditivos cristalinos na capacidade de autocura do concreto precoce (primeiras idades)	4,00	CP II/A-L	0,45 0,60	Teste de permeabilidade	Não influenciou
Pereira e Nascimento (2017)	Efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto fresco e endurecido	1,00	CP IV	0,60	Absorção de água por capilaridade, Permeabilidade pelo método do cachimbo	Melhorou
Helene <i>et. al.</i> (2018)	Avaliação da penetração de cloretos e vida útil de concretos com uso de aditivos cristalizantes	7,96 6,50 5,50	CP III RS	0,45 0,55 0,65	Difusão de íons cloretos e Indicadores colorimétricos	Melhorou
Oliveira (2019)	Potencial do aditivo cristalizante como estimulador da autocicatrização de concretos	0,50 1,00 2,00	CPP – Classe G	0,44 0,25	-	Não influenciou
Ziegler (2020)	Avaliação da autocicatrização de concretos com uso de aditivos cristalizantes	2,20	CP II-F	0,40	Permeabilidade e difusão de cloretos	Melhorou
Polesello e Maus (2020)	Influência do aditivo cristalizante no concreto, avaliando sua eficiência quanto à estanqueidade das estruturas	0,50 0,80 1,00	CP IV 32 RS	0,40 0,50 0,60	Absorção de água por capilaridade	Melhorou
Martin (2021)	Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório	3,08	CP IV 32 RS	0,43	-	Não influenciou
Vilela <i>et. al.</i> (2021)	Avaliar a eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas	1,00 2,00	CP V	0,47	Absorção de água por porosidade, capilaridade e índice de vazios	Melhorou

Fonte: Elaboração Própria

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil, na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) campus Alegrete/RS. O programa experimental foi organizado em três etapas distintas (Figura 4). Nos itens 3.1 a 3.3 será apresentado um detalhamento de cada uma das etapas da pesquisa.

Figura 4 - Organização do programa experimental



Fonte: Elaboração Própria.

3.1 Etapa 1 – Caracterização dos Materiais

A etapa de caracterização dos materiais corresponde ao conjunto de ensaios que foram realizados anteriormente à produção dos concretos, para determinar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais que foram utilizados para a confecção das misturas.

A caracterização física e química do aglomerante e a caracterização química do aditivo cristalizante foram obtidas com os respectivos fabricantes. A caracterização dos agregados (miúdo e graúdo) foi executado no laboratório de Materiais do curso de Engenharia civil da Unipampa – campus Alegrete e seguiu as recomendações normativas vigentes para estes materiais. Os dados do (Quadro 3) apresentam um breve resumo dos ensaios que foram executados para a caracterização dos materiais.

Quadro 3 - Ensaios de caracterização dos materiais

Material	Propriedades	Obtenção	Norma Regulamentadora
Aditivo Cristalizante	Químicas	Fabricante	-
Cimento Portland	Físicas, químicas e mecânicas	Fabricante	-
Agregado Miúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica		NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Aparente		NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Unitária		NBR 16972 (ABNT, 2021)
Agregado Graúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica		NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Aparente		NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Unitária		NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Elaboração Própria

3.1.1 Cimento

O cimento adotado para confecção da pesquisa foi o CP V ARI - RS que apresenta resistência a sulfato assim como uma alta resistência nas primeiras idades, e também por ser um cimento mais puro. Por apresentar um baixo teor de adições minerais este tipo de cimento permite melhor análise da ação do aditivo cristalizante

nas misturas. Segundo Ary (2019), cimentos mais puros são mais indicados para avaliação dos aditivos cristalizantes nas propriedades dos concretos, por não interferirem junto com os aditivos no processo de autocicatrização. Na Tabela 1 são apresentadas a caracterização química do cimento.

Tabela 1 - Caracterizações química do cimento CP V ARI - RS

Substância	Concentração (% em massa)
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Aluminato tricálcico	1 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 25
Óxido de magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de cálcio (livre)	0 - 2

Fonte: Fabricante

3.1.2 Agregado Miúdo

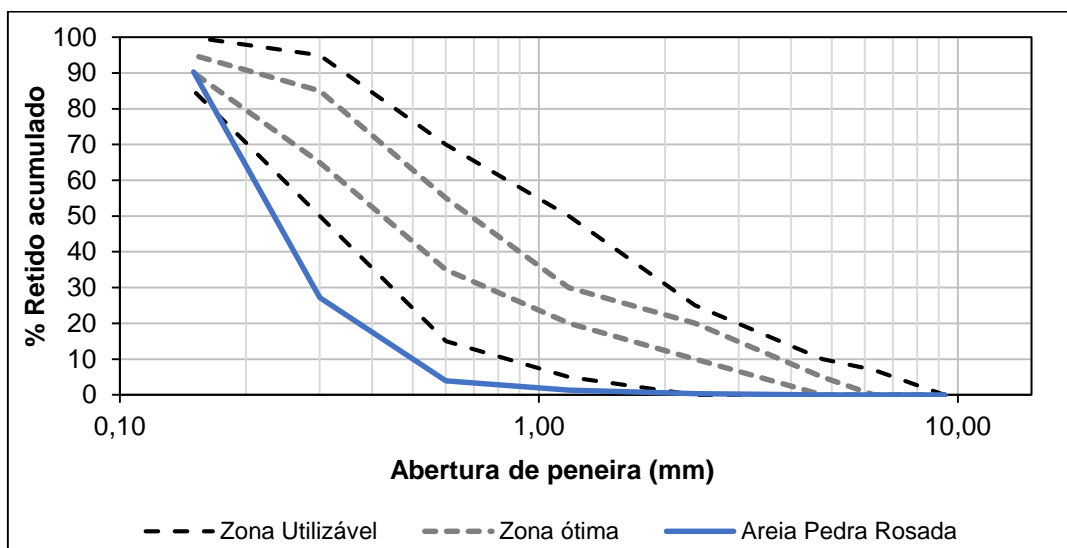
O agregado miúdo (areia) utilizado para a execução do concreto é proveniente do município de Alegrete/RS, tendo sua dimensão máxima de 0,60 mm e módulo de finura de 1,23. Na Figura 5 é apresentada sua composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O agregado também foi ensaiado para a determinação de as suas massas específicas de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo

Massa específica agregado seco (g/cm ³)	2,547
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,552
Massa unitária (kg/m ³)	1538,31
Absorção de água (%)	0,166

Fonte: Elaboração Própria

Figura 5 - Distribuição granulométrica da areia



Fonte: Elaboração Própria

O agregado miúdo apresentou granulometria abaixo do limite normativo inferior indicado para agregado miúdo. Apesar desta limitação, o agregado será utilizado para a produção dos concretos, principalmente em função da dificuldade de adquirir areia com granulometria que se enquadre dentro da zona utilizável ou ótima, na região de Alegrete/RS.

3.1.3 Agregado Graúdo

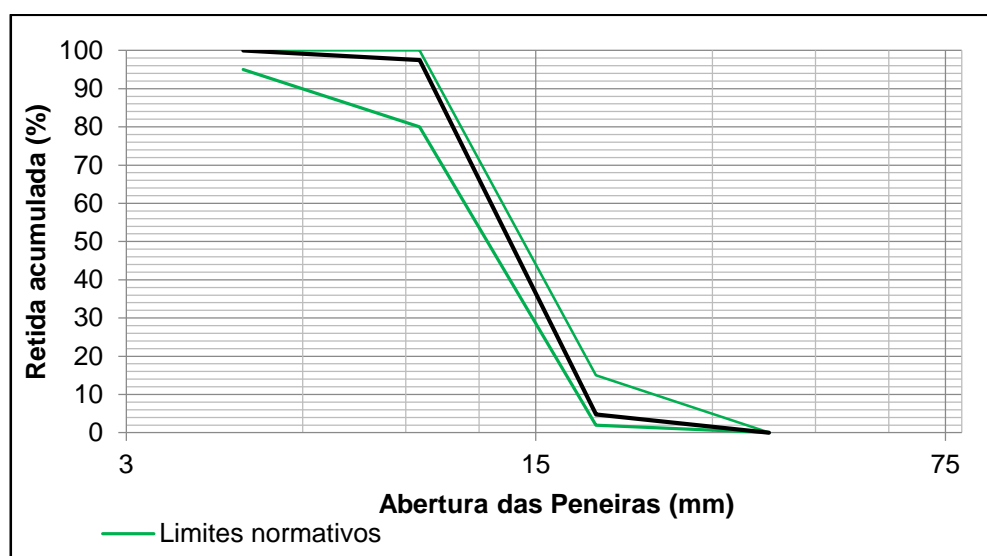
O agregado graúdo (brita) utilizado para a produção do concreto é oriundo do município de Alegrete/RS, sendo classificado como brita 1 com diâmetro máximo de 19 mm e módulo de Finura de 7,02. Na Figura 6 é apresentada sua composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), podemos observar que o agregado se enquadrou na zona utilizável. O agregado também foi ensaiado para a determinação de as suas massas específicas de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo

Massa específica agregado seco (g/cm ³)	2,78
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,80
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,84
Massa unitária (kg/m ³)	1530
Absorção de água (%)	0,72

Fonte: Elaboração Própria

Figura 6 - Distribuição granulométrica da brita 1



Fonte: Elaboração Própria

O agregado graúdo utilizado na pesquisa apresentou granulometria (Figura 6) dentro dos limites normativos, atendendo os parâmetros para o seu emprego em concretos.

3.1.4 Aditivo Cristalizante

Foram utilizados dois diferentes aditivos cristalizantes em pó (X e Y), adquiridos de empresas nacionais e a sua incorporação ao concreto ocorreu durante o processo de produção das misturas. A dosagem do aditivo cristalizante nas misturas cimentícias seguiu as recomendações do próprio fabricante, sendo as recomendações de 0,8% para o aditivo X e 2,0% para o aditivo Y, ambos em relação a massa de cimento. Na Tabelas 4 são mostradas as caracterizações do aditivo cristalizante X. Quanto ao

aditivo Y, as caracterizações não foram disponibilizadas pela empresa que comercializa o produto no Brasil.

Tabela 4 - Caracterizações químicas do aditivo X

Substância	Concentração (% em massa)
Cimento Portland	65 – 80
CTS – 15 – 1* (Segredo industrial)	10 - 30
CTS – 15 – 2* (Segredo Industrial)	5 - 10
Hidróxido de cálcio e magnésio	1,5 - 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio	1,5 – 6
Hidróxido de cálcio	1 - 2

Fonte: Fabricante X

3.1.5 Aditivo Superplastificante

Para a produção dos concretos foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos de última geração. Segundo o fabricante, o produto é um aditivo orgânico que proporciona boa dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água de amassamento e ganho de resistência mecânica. Possui uma massa específica que varia entre $1,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, pH $3,0 \pm 1,0$, sendo a dosagem recomendada nos teores de 0,2 a 2,0% em relação ao peso de cimento.

3.1.6 Água

A água utilizada na fabricação do concreto e no processo de cura por submersão, foi proveniente da rede pública de abastecimento de água de Alegrete/RS.

3.2 Etapa 2 – Produção dos Concretos

A definição do traço se deu a partir do obtido pelo trabalho de Dacheri (2019) onde foi definido o traço unitário em massa 1:4,5 (cimento; agregados), com a utilização do cimento Portland (CP V ARI - RS), sendo definido o teor de argamassa ideal para os materiais empregados igual a 48%. A relação água/cimento utilizada para todos os traços foi definida em 0,42. Foram desenvolvidos três traços (T1 – Traço

de referência (sem aditivo cristalizante); T2 – Traço com aditivo cristalizante X; T3 – Traço com aditivo cristalizante Y) ambos realizados com os mesmos procedimentos e equipamentos. O aditivo superplastificante entrou na composição dos concretos em um teor de 0,005% para a padronização da consistência.

Tabela 5 - Aditivo cristalizante, teor de argamassa, consumo de cimento

Traço	Relação a/c	Teor de Aditivo Cristalizante (%)	Teor de Argamassa (%)	Consumo de Cimento (kg/m³)
T1	0,42	0	48	417,49
T2	0,42	0,8	48	417,49
T3	0,42	2,0	48	417,49

T1 – Traço de referência (sem aditivo);
T2 – com aditivo cristalizante X;
T3 - com aditivo cristalizante Y.

Fonte: Elaboração Própria

A mistura dos materiais foi feita com a utilização de uma betoneira de eixo inclinado. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi efetuada segundo as recomendações da literatura (brita, uma parte de água, todo o cimento, o restante da água, aditivo superplastificante e a areia). Na sequência, dependendo do traço produzido, o aditivo cristalizante em pó era adicionado. Após a mistura dos materiais, a trabalhabilidade do concreto foi analisada. O controle da consistência do concreto foi realizado através do ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo fixado em 8 ± 2 cm. Com a finalidade de manter a padronização em todas as misturas, o ensaio foi aplicado para todos os traços executados, sendo realizado sempre por um mesmo operador a fim de se evitar alterações nas medições.

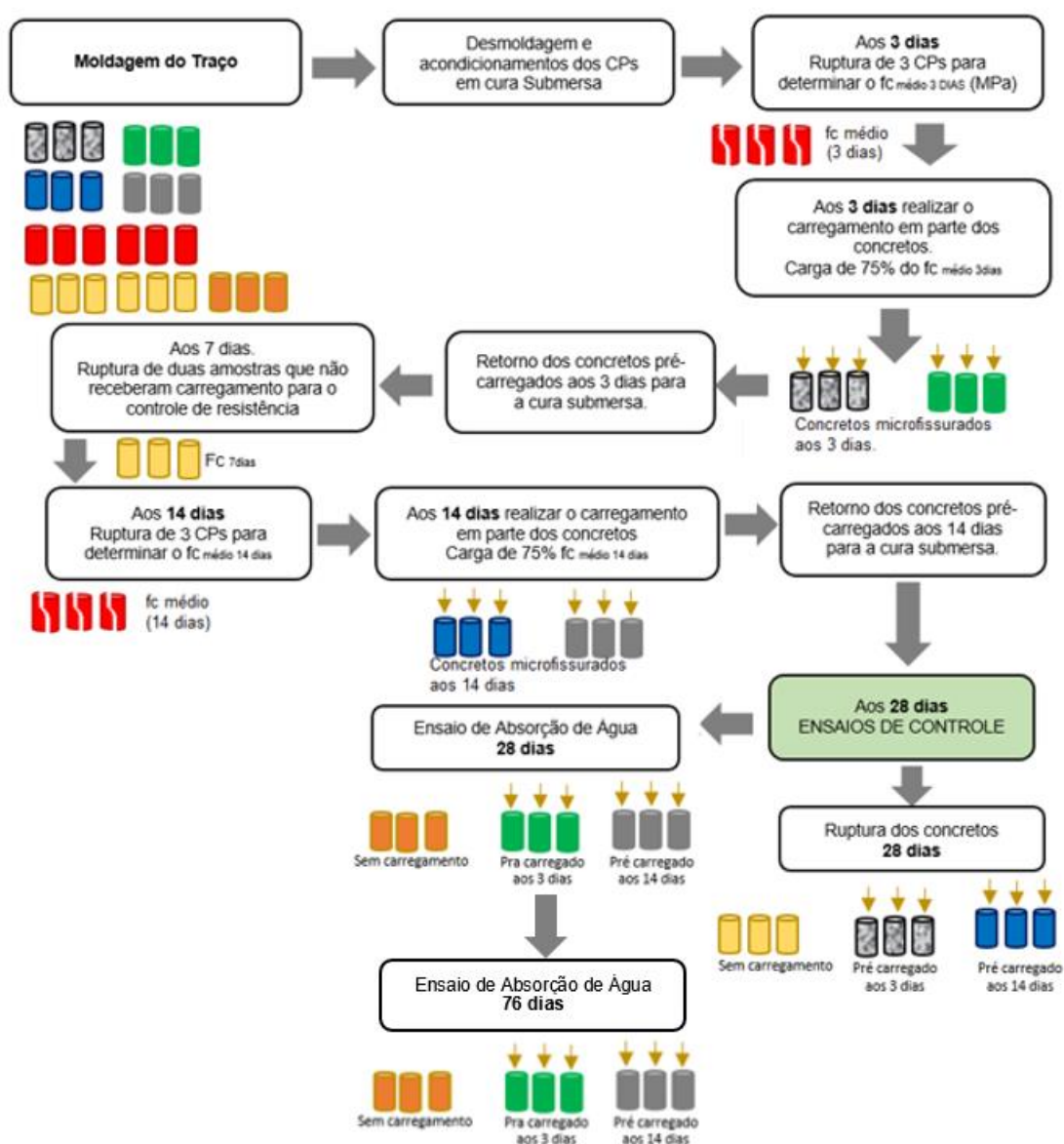
Após o processo de mistura e produção dos concretos, o ensaio da massa específica do concreto fresco foi realizado conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008), sendo realizada para cada betonada executada e também pelo mesmo operador. Tendo como resultados para os traços de referência, aditivo X e aditivo Y os seguintes valores de 2484,07 kg/m³, 2484,57 kg/m³ e 2490,44 kg/m³, respectivamente.

3.2.1 Pré-carregamento dos Concretos

O pré-carregamento em diferentes idades permitiu observar o comportamento dos concretos com e sem aditivo cristalizante no processo de autocura. Após a

moldagem dos concretos, parte das amostras de ambos os traços passaram por um processo de fissuração por cargas de compressão nas idades de três (3) e de quatorze (14) dias. Após o processo de carregamento, as amostras retornaram ao processo de cura submersa, permanecendo nessa situação até a idade de 28 dias, quando tiveram as suas propriedades mecânicas (resistência à compressão axial) e de indicativo de durabilidade (absorção de água por absorção capilar), determinadas. A Figura 7 apresenta de forma detalhada um passo a passo da Etapa 2 do Programa experimental que foi aplicado para os traços estudados (T1 - T_{Ref.}, T2 - T_{CAx} e T3 - T_{CAy}).

Figura 7 - Fluxograma da Etapa 2: Passo a passo dos processos de fissuração dos concretos por traço, cura e ensaios de controle.



Fonte: Elaboração Própria

Conforme mostrado na Figura 7, para cada traço (T1 - T_{Ref.}, T2 - T_{CAx} e T3 - T_{CAy}) foram moldados 27 corpos de prova. Após a desmoldagem, os corpos de prova tiveram as suas superfícies retificadas em serra circular, foram identificados e acondicionados em cura submersa. Na idade de três dias, nove corpos de prova foram retirados da cura. Destes, três amostras foram rompidas até o limite (Figura 7) e foi determinado a resistência à compressão média aos 3 dias ($f_{cm_{3\text{dias}}}$). Sobre o valor médio de resistência obtido aos três dias ($f_{cm_{3\text{dias}}}$) foi calculado o valor do percentual de carregamento ($75\% * (f_{cm_{3\text{dias}}})$) que foi aplicado nos concretos. A escolha do percentual de carregamento aplicado ($75\% * f_{cm_{x\text{ dias}}}$) se justifica por este percentual de carregamento promover um dano interno importante (microfissuras) no corpo de prova sem leva-lo à ruptura total. A indução de microfissuras no concreto permitirá a avaliação da ação dos aditivos cristalizantes a partir da recuperação e/ou manutenção das propriedades avaliadas (resistência à compressão e absorção). Após o cálculo do carregamento, as seis amostras restantes retiradas da cura aos três dias foram pré-carregadas. Para o processo de fissuração dos concretos foi utilizada a mesma prensa do ensaio de compressão. Cada corpo de prova recebeu o carregamento de compressão ($75\% * (f_{cm_{3\text{dias}}})$) na mesma velocidade de aplicação do ensaio de compressão, conforme as especificações normativas. Após este processo, os corpos de prova foram novamente identificados e novamente acondicionados em cura submersa até a idade de 28 dias. Na idade de sete dias, três amostras que ainda não receberam carregamento foram retiradas da cura submersa e rompidas até o limite. Esses dados serviram para o controle de resistência à compressão do traço com o passar do tempo. Na idade de controle de 14 dias, novos corpos de prova passaram por um processo de fissuração. Nessa etapa, nove corpos de prova que ainda não receberam carregamento foram retirados da cura submersa. Três deles foram rompidos até o limite para determinação da resistência à compressão média aos 14 dias ($f_{cm_{14\text{dias}}}$). A partir desse valor foi calculado o valor percentual de carregamento ($75\% * (f_{cm_{14\text{dias}}})$) que foi aplicado nos seis corpos de prova retirados da cura úmida. Após este processo, os corpos de prova foram identificados e na sequência foram acondicionados em cura submersa até a data dos ensaios de controle (28 dias). Na idade de 28 dias, todas as amostras foram retiradas da cura úmida para a determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade. Após as amostras serem submetidas ao ensaio de indicativo de durabilidade (absorção de água) aos 28 dias, as mesmas retornaram para a cura submersa - permanecendo nesta condição

até a idade de 76 dias - quando a propriedade de absorção de água foi novamente avaliada. Esse procedimento permitiu verificar se a ação dos aditivos cristalizantes na autocicatrização dos concretos continuaria a acontecer de forma efetiva em um período de tempo maior.

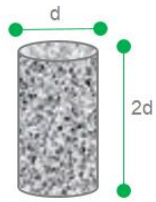
3.3 Etapa 3 – Ensaios de Controle

Os ensaios de controle permitem realizar a comparação de desempenho frente a autocura de corpos de prova que não receberam carregamento (amostras de referência) e dos corpos de prova submetidos a diferentes idades de carregamentos (amostras pré-carregadas), além de permitir analisar as modificações impostas na matriz cimentícia pela utilização dos aditivos cristalizantes X e Y.

Os ensaios de resistência à compressão axial para os concretos de referência (sem carregamento) foram realizados em diferentes idades: três (3), sete (7), quatorze (14) e vinte e oito dias (28). Nas idades de três (3) e quatorze dias (14), os ensaios de resistência à compressão axial também serviram para o cálculo do percentual de carregamento que foi aplicado nos concretos microfissurados nestas idades (3 e 14 dias), conforme mostrado na Figura 7. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para as idades de sete (7) e vinte e oito dias (28) foram utilizados para avaliação desta propriedade do concreto ao longo do tempo.

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade foram testados nove corpos de prova (CPs) por traço, sendo três corpos de prova sem pré-carregamento (amostras de referência), e seis corpos de prova com carregamento (CPs microfissurados). Destes, três CPs receberam pré-carregamento na idade de três dias e três CPs receberam pré-carregamento na idade de 14 dias. O Quadro 4 apresenta o quantitativo de amostras para os ensaios de controle que foram realizados na idade de 28 dias.

Quadro 4 - Quantitativo de corpos de prova (CPs) por traço para os ensaios de controle aos 28 dias.

Identificação dos concretos		Número de CPs / Ensaio de Controle		Dimensão dos CPs
		Resistência (Fc)	Absorção (água)	
T-0	Referência – 0% carregamento	3 CPs	3 CPs	 <p>(d) - 10 cm (2d) - 20 cm H = 2d</p>
TP-3	Pré-carregado aos 3 dias	3 CPs	3 CPs	
TP-14	Pré-carregado aos 14 dias	3 CPs	3 CPs	
Total de Corpos de Prova por Traço: 18				

Fonte: Elaboração Própria

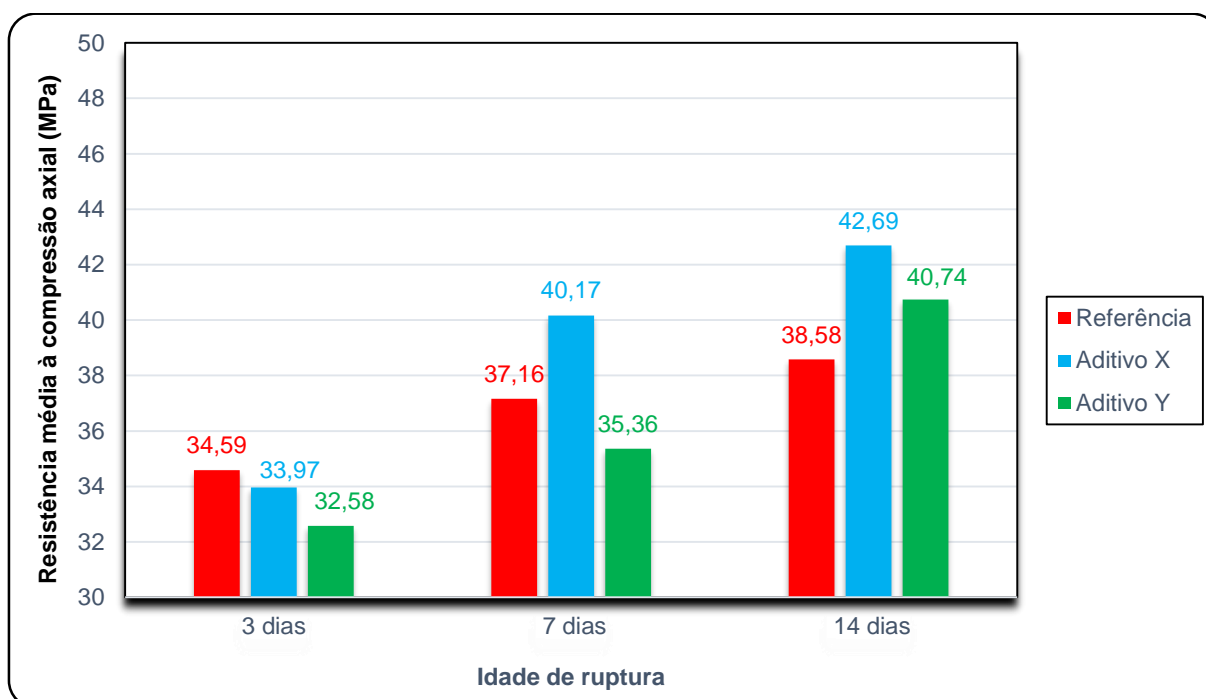
4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes a caracterização dos concretos obtidos através do ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade.

4.1 Resistência à Compressão Axial

A resistência mecânica dos concretos foi avaliada de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 5739 (2018). A Figura 8 apresenta o comportamento mecânico dos concretos ao longo do tempo. Os valores médios de resistência obtidos nas idades de três (3) dias e de quatorze (14) dias foram utilizados para calcular a intensidade dos pré-carregamentos aplicados em parte dos concretos.

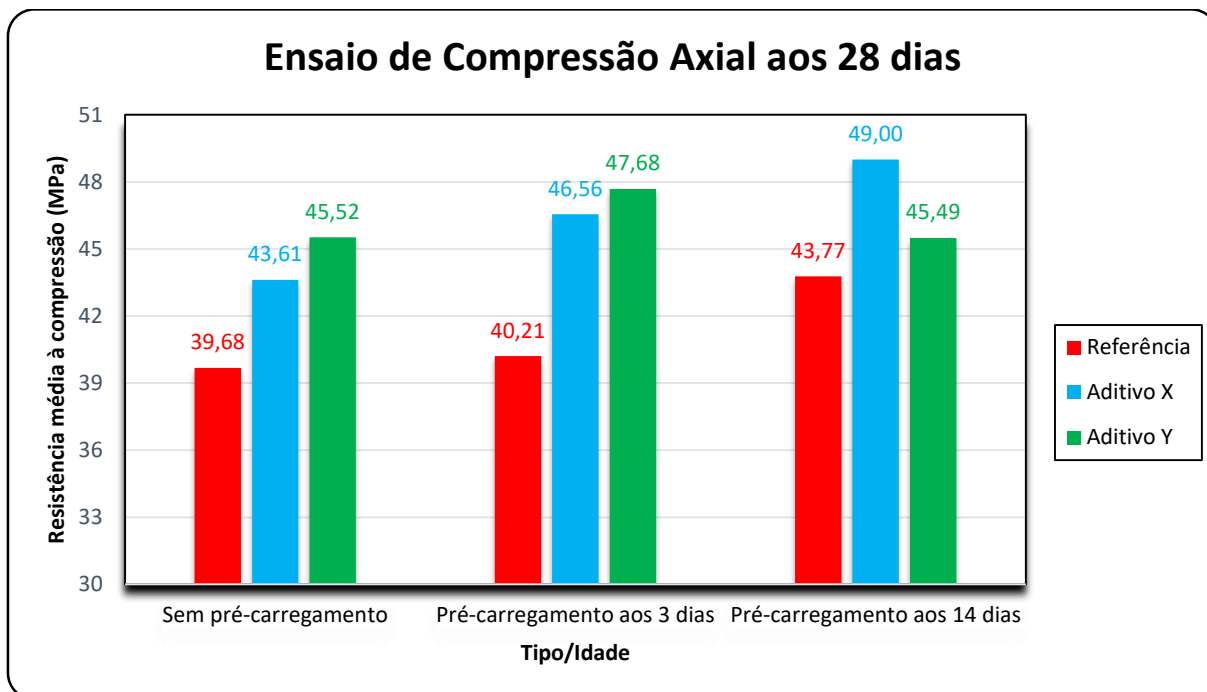
Figura 8 – Resistência média à compressão axial nas idades de 3, 7 e 14 dias para concretos não submetidos a carregamentos



Fonte: Elaboração Própria

Os valores obtidos dos ensaios de compressão axial aos 28 dias para os concretos sem pré-carregamento e pré-carregados aos 3 e 14 dias, são apresentados na Figura 9. Onde as médias foram retiradas a partir da ruptura de três corpos de prova para cada tipo de carregamento.

Figura 9 - Resistência média à compressão axial dos concretos com diferentes carregamentos



Fonte: Elaboração Própria

Pode-se perceber na Figura 9 um aumento na resistência à compressão dos traços com aditivos cristalizantes em comparação ao traço de referência, independentemente da aplicação do carregamento nas primeiras idades. Esses resultados são um indicativo de que os aditivos cristalizantes atuaram de forma positiva no desenvolvimento da resistência mecânica dos concretos investigados, através da minimização das microfissuras geradas nas primeiras idades.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias também são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, nas quais também são informados os desvios padrão e os coeficientes de variação entre as amostras. O coeficiente de variação (CV) é interpretado como uma medida que expressa a variação dos dados com relação à sua média. Quanto menor o valor do CV, menor a dispersão dos dados. Nas tabelas apresentadas (Tabelas 6, 7 e 8), somente os traços de referência (T1-T_{Ref}-sem pré-carregamento e o traço T1-T_{Ref}-pré-carregado aos 3 dias) apresentaram coeficientes de variação superior a 10%

Tabela 6 - Resistência à compressão axial aos 28 dias sem pré-carregamento

Traço	Relação a/c	Resistência Média (MPa)	DP	CV (%)	Varição em relação ao T1-T_{Ref} (%)
T1- T _{Ref}	0,42	39,69	3,48	12,15	-
T2- T _{CAx}		43,61	3,08	9,51	+ 9,87
T3 - T _{CAy}		45,52	3,06	9,42	+ 14,69

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 6 mostra que, aos 28 dias, os traços com aditivos cristalizantes X e Y sem pré-carregamento promoveram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 9,87% e 14,69%, respectivamente.

Tabela 7 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 3 dias

Traço	Relação a/c	Resistência Média (MPa)	DP	CV (%)	Varição em relação ao T1-T_{Ref} (%)
T1- T _{Ref}	0,42	40,21	3,25	10,60	-
T2- T _{CAx}		46,56	0,43	0,20	+15,79
T3 - T _{CAy}		47,68	3,00	8,99	+ 18,58

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

Os traços com aditivos cristalizantes X e Y e microfissurados na idade de 3 dias apresentaram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 15,79% e 18,58%, respectivamente. Em comparação com dados dos concretos não microfissurados (Tabela 6), esses concretos mostraram um desenvolvimento de resistência mecânica mais efetivo.

Tabela 8 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 14 dias

Traço	Relação a/c	Resistência Média (MPa)	DP	CV (%)	Varição em relação ao T1-T_{Ref} (%)
T1- T _{Ref}	0,42	43,77	2,41	5,02	-
T2- T _{CAx}		49,00	2,28	0,08	+ 11,95
T3 - T _{CAy}		45,49	0,29	5,20	+ 3,93

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

De acordo com a Tabela 8 observa-se que os traços com aditivos cristalizantes X e Y com pré-carregamento aos 14 dias, promoveram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 11,95% e 3,93%, respectivamente.

Este acréscimo de resistência mecânica observado aos 28 dias nos concretos estudados pode estar relacionado ao fechamento dos poros e vazios da matriz promovidos pelos aditivos cristalizantes. Da mesma forma, Roig Flores *et. al.* (2015) obtiveram em seu trabalho um aumento de cerca de 15% de resistência à compressão de concretos com aditivos cristalizantes em comparação ao concreto de referência. Segundo os autores, esse aumento pode estar relacionado com o efeito filer proporcionado pelo material a ponto de favorecer com a colmatação dos poros da matriz. Ainda, tal material pode ter atuado como um ativador da hidratação do cimento, contribuindo para o aumento da quantidade de produtos de hidratação, reduzindo a porosidade e o diâmetro dos poros nos concretos com aditivo cristalizante (AZARSA *et. al.* 2019).

Para a análise da significância das variáveis controláveis do experimento (Idade de carregamento e Tipo de aditivo cristalizante), foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) através da utilização do software Excel (Tabela 9). O valor $p < 0,05$, mostra que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%.

Tabela 9 - Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste – F	p	SIG
Intercessão	53738,54	1	53738,54	7857,70	0,00000	-
Idade do Carregamento	45,21	2	22,60	3,305	0,05558	Não
Tipo de Aditivo	155,83	2	77,92	11,393	0,00040	Sim
Erro	150,46	22	6,84	-	-	-

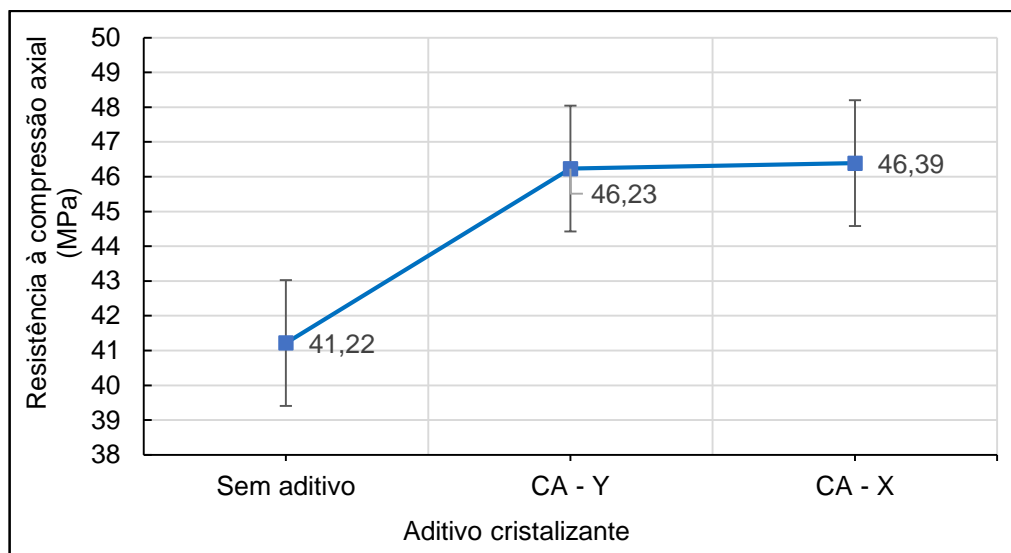
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo; SIG: Significância

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se que entre as variáveis independentes estudadas, somente a variável “Aditivo cristalizante” (Tabela 9) foi significativa, ou seja, interferiu matematicamente na resistência à compressão dos concretos estudados, melhorando sua propriedade.

Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura 10, cujo gráfico foi gerado a partir da análise ANOVA.

Figura 10 - Efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos em função dos aditivos utilizados



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 10 mostra um crescimento significativo da resistência dos concretos com a incorporação dos aditivos cristalizantes. Ou seja, a incorporação dos aditivos cristalizantes nos concretos foi benéfica para o desempenho mecânicos dos concretos, independentemente de os concretos terem ou não passado pelo processo de pré-carregamento.

Ziegler (2020) em seu estudo, após obter os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, encontrou para os aditivos X, Y e Z um ganho na resistência de 15,4%, 30,9% e 54,6%, respectivamente. Guignone *et al.* (2015) *apud* Ziegler (2020) também observou em seu estudo, um aumento na resistência à compressão de 19% e 20%, respectivamente, entre os concretos contendo aditivos cristalizantes e o concreto de referência. Por outro lado, Pazderka e Hájková (2016) utilizando um teor de aditivo cristalizante de 2% da massa de concreto, não obtiveram em seus resultados uma elevação significativa da resistência à compressão dos concretos estudados aos 28 dias. O mesmo foi verificado por Ferrara e Krelani (2010), onde os autores ao compararem as amostras de referência e com aditivo cristalizante (com teor de 1% da massa de cimento) verificaram que não houve aumento da resistência à compressão na idade de 28 dias.

Analisando os dados entre os traços com aditivos cristalizantes apresentados na Figura 10, se observa que matematicamente parece não haver diferença entre os resultados. Em função do exposto, foi realizada uma nova Análise de Variância (ANOVA), através do software Excel, considerando somente os dados de resistência à compressão axial dos traços com aditivos cristalizantes para a idade de 28 dias. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise da variância (ANOVA) entre os aditivos cristalizantes aos 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste – F	p	SIG
Intercessão	38604,94	1	38604,94	6513,21	0,00000	-
Idade de Carregamento	27,43591	2	13,71795	2,3144	0,13539	Não
Tipo de Aditivo	0,112022	1	0,112022	0,0188	0,89261	Não
Erro	82,98044	14	5,927174			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo; SIG: Significância
Fonte: Elaboração Própria

Os resultados da ANOVA (Tabela 10) mostrou que entre os concretos com aditivos cristalizantes não há diferença significativa de resistência à compressão axial na idade de 28 dias. Assim como a variável “idade de carregamento”, que também não se mostrou significativa na análise.

Quanto à influência da idade de pré-carregamento nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com cimento CP V ARI, alguns autores como Bernardino da Silva (2016), Vieira (2008) e Cappellesso (2018) encontraram resultados semelhantes ao deste trabalho, de que a idade de carregamento dos concretos não se mostrou significativa (Tabela 9).

Bernardino da Silva (2016) estudou o processo de autocicatrização de concretos microfissurados nas primeiras idades à tração na flexão, avaliando a retração dos concretos em função do tempo. Nos resultados obtidos, a autora concluiu que a variável “idade de carregamento” também não se mostrou significativa para os concretos produzidos com cimento CP V ARI para a propriedade avaliada. Segundo Bernardino da Silva (2016), o resultado pode estar relacionado com as características físico-químicas do cimento utilizado, que desde a idade de um dia acabam propiciando o rápido desenvolvimento da capacidade resistente dos concretos. Vieira (2008) também não encontrou mudanças significativas na propriedade de resistência à

compressão axial para os concretos produzidos com os cimentos CP V ARI e CP V ARI – RS e submetidos a carregamentos precoces nas primeiras idades. Segundo a autora, isso se deve ao fato de que os cimentos de alta resistência inicial já apresentarem cerca de 82% da resistência exercida aos 28 dias, já nas primeiras idades. Cappellesso (2018) em sua pesquisa, aplicou um pré-carregamento para a abertura de fissuras por meio da resistência de tração na flexão em quatro pontos nas amostras prismáticas aos 3 e 28 dias, utilizando traços distintos produzidos com três tipos de cimento Portland (CP II – F, CP IV e CP V ARI) e avaliou suas propriedades mecânicas. A autora observou que a resistência à compressão axial das amostras pré-fissuradas aos 28 dias para os traços com cimento CP V ARI apresentou uma resistência muito semelhante aos valores dos concretos pré-carregados aos 3 dias. Segundo a autora, para os concretos produzidos com cimento CP V ARI as idades de pré-fissuração dos concretos não apresentou significância na propriedade avaliada.

4.2 Absorção de Água por Capilaridade

Para esta pesquisa, o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme as prescrições da ABNT NBR 9779 (2012), nas idades de 28 dias e 76 dias. De acordo com Neville, 2016, *apud* Ziegler, 2020 o mecanismo de absorção de água por capilaridade é influenciado através das características do líquido, como densidade, tensão superficial e viscosidade. Também depende das características do sólido, como a tortuosidade, raio e comunicação entre os poros capilares. Segundo os autores, quanto menores os diâmetros dos poros, maior será sua absorção de água. Na Tabela 11 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade nas idades de controle de 28 e 76 dias.

Tabela 11 – Resultados da absorção média de água por capilaridade aos 28 dias e 76 dias

Traço	Tipo de carregamento aplicado nos concretos	Ensaio - 28 dias	Ensaio - 76 dias
		Absorção média 72h (g/cm ³)	Absorção média 72h (g/cm ³)
Referência (Sem aditivo)	Sem Carregamento	0,227	0,203
	Pré-carregado – 3 dias	0,269	0,177
	Pré-carregado – 14 dias	0,282	0,258
Aditivo X	Sem Carregamento	0,707	0,203
	Pré-carregado – 3 dias	0,759	0,254
	Pré-carregado – 14 dias	0,767	0,233
Aditivo Y	Sem Carregamento	0,512	0,304
	Pré-carregado – 3 dias	0,398	0,232
	Pré-carregado – 14 dias	0,669	0,451

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 11 mostra que aos 28 dias os traços produzidos com os aditivos cristalizantes X e Y apresentaram uma absorção média maior que a do traço referência, levando em consideração os tipos de carregamentos. Os resultados mostraram que os aditivos cristalizantes podem ter alterado a conectividade dos poros capilares dos concretos, influenciando nos resultados de absorção. No entanto, este comportamento precisa ser melhor investigado. Entre os concretos com aditivos cristalizantes, podemos notar que os concretos com aditivo X apresentaram as maiores taxas de absorção, quando comparado aos concretos confeccionados com o aditivo Y. No entanto, aos 76 dias, observa-se que a absorção média destes concretos apresentaram uma redução considerável, aproximando-se dos resultados obtidos para o traço de referência. Também é possível perceber que o concreto referência não apresentou uma redução da absorção dos 28 para os 76 dias, mostrando que a redução da absorção observada nos demais traços pode ser associada principalmente ao efeito dos aditivos cristalizantes utilizados.

No estudo realizado por Joa *et al.* (2015) foi possível verificar uma redução da porosidade e da absorção de água com a utilização de 3% de aditivo cristalizante em argamassas. No entanto, Hassani *et al.* (2017) constatou em seu estudo, que com a utilização de 1% de aditivo cristalizante aos 28 dias não foi possível verificar diferença considerável nos resultados de absorção de água nos concretos. Moreira (2016) utilizou em sua pesquisa concretos com teor de aditivo cristalizante de 0,8% e uma relação a/c de 0,45, e obteve resultados distintos para cada tipo de cimento.

Encontrando um maior potencial de cristalização na redução da absorção por capilaridade aos 28 dias nos concretos produzidos com cimento CP II – E. No caso do cimento CP V ARI, as amostras com aditivo cristalizante apresentaram igual absorção de água por capilaridade das amostras referências. No estudo de Takagi (2013), o concreto utilizado em sua pesquisa possuía um teor de aditivo cristalizante de 2,5% e uma relação a/c de 0,50. Obtendo assim, uma redução da absorção por capilaridade causados pela cristalização de 33%, 34% e 35% para os concretos com cimento CP II-E, CP III e CP V ARI, respectivamente, aos 56 dias. Oliveira (2018) em seu estudo, utilizando amostras com teor de 2% de aditivo cristalizante, verificou que os concretos com relação água/cimento de 0,60 obtiveram resultados semelhantes aos 28 dias, na qual os menores valores de absorção ocorreram nos concretos contendo aditivos cristalizantes, quando comparados ao concreto de referência. Pedroso (2019), utilizou em sua pesquisa concretos com teores de 1% de aditivo cristalizante sobre a massa de cimento, chegando a conclusão de que os concretos que apresentaram uma maior redução da absorção por capilaridade foram os concretos produzidos com os cimentos CP III – 40 – RS e o CP V ARI, seguido do CP II – F – 40.

A tabela 12 apresenta a variação percentual dos resultados de absorção de água por capilaridade dos 28 dias para os 76 dias.

Tabela 12 - Variação percentual da absorção de água por capilaridade dos 28 dias para os 76 dias

Traço	Tipo de carregamento aplicado nos concretos	Variação da absorção de água (%)
Referência (Sem aditivo)	Sem Carregamento	-10
	Pré-carregado – 3 dias	-34
	Pré-carregado – 14 dias	-9
Aditivo X	Sem Carregamento	-71
	Pré-carregado – 3 dias	-67
	Pré-carregado – 14 dias	-70
Aditivo Y	Sem Carregamento	-41
	Pré-carregado – 3 dias	-42
	Pré-carregado – 14 dias	-33

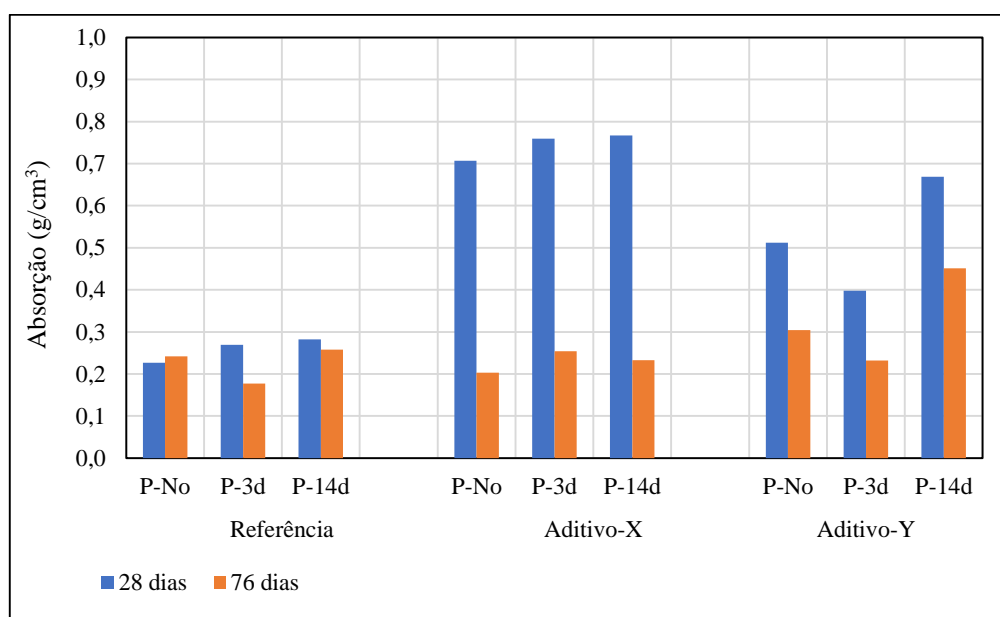
Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 12 mostra que a variação da idade (28→76 dias) promoveu uma redução dos valores de absorção para os concretos investigados, sendo essa

variação mais importante para os traços com aditivos cristalizantes. Os resultados mostram que os concretos com aditivos cristalizantes promoveram uma maior redução da absorção de água por capilaridade nos concretos, mostrando a sua efetividade na autocicatrização dos concretos.

O gráfico da Figura 11 apresenta os resultados médios dos ensaios de absorção de água realizados nas idades de controle de 28 dias e 76 dias.

Figura 11 - Comportamento dos concretos frente a absorção de água para as idades de 28 dias e 76 dias



Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 11 que os concretos do traço de referência apresentaram as menores absorções entre os traços investigados para ambas as idades de controle. Em geral observa-se uma tendência de crescimento da absorção com a variação da idade de carregamento dos concretos. Para Vieira (2008) este fato ocorre por que o cimento CP V ARI já possui uma estrutura interna mais formada nas primeiras idades, com isso o dano gerado no concreto após esta idade poderá promover microfissuras que não são recuperadas tão facilmente pela hidratação de produtos remanescentes do cimento. Como a molécula de água é pequena, consegue passar com facilidade pelas microfissuras presentes na matriz cimentícia.

Alguns autores (Oberholster (1983); Ramachandran (2002) *apud* Venquiaruto (2017), entre outros) associam uma maior porosidade da matriz com cimento CP V ARI ao fato da não presença de adição pozolânica neste tipo de cimento. Segundo

Ramachandran (2002) uma maior quantidade de poros pode ser formada em matrizes cimentícias com CPV ARI, ocasionando um aumento de sua porosidade e permeabilidade, motivo pelo qual pode apresentar maior absorção capilar

Venquiaruto (2017) estudou o efeito isolado da idade de carregamento na absorção de água de concretos produzidos com distintos cimentos (CP V ARI, CP II Z e CP IV RS) submetidos a pré-carregamentos de 75% da carga de ruptura nas idades de 1, 3 e 7 dias. A autora concluiu que entre os traços investigados, a idade de pré-carregamento somente foi significativa para os concretos produzidos com os cimentos CP II Z e CP IV RS, mostrando uma tendência de redução da absorção com o aumento da idade em que as solicitações foram impostas aos concretos.

Conforme o estudo de Cappellesso (2018) os concretos com menores relações água/cimento apresentam um maior grau de dano causado no momento da microfissuração, e devido ao fato de a molécula de água ser muito pequena, acaba penetrando com facilidade nas microfissuras geradas.

Nesta pesquisa, as maiores absorções foram observadas para o traço com aditivo cristalizante - X na idade de controle de 28 dias, seguido pelo traço com aditivo - Y. Para a idade de controle de 76 dias os traços com aditivos cristalizantes apresentaram um comportamento semelhante ao do traço de referência, indicando que ambos os aditivos atuaram de forma importante na autocicatrização dos concretos, uma vez que reduziram a absorção de água quase se igualando aos valores obtidos para o traço de referência.

Para uma análise mais aprofundada das variáveis controláveis foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) através da utilização do software Excel. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 13. Para esta análise foi considerando apenas os resultados de absorção dos concretos com aditivos cristalizantes, objetivando verificar se as composições químicas distintas dos aditivos promoveriam influência importante nos resultados de absorção dos concretos para as idades estudadas.

Tabela 13 - Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade entre os aditivos

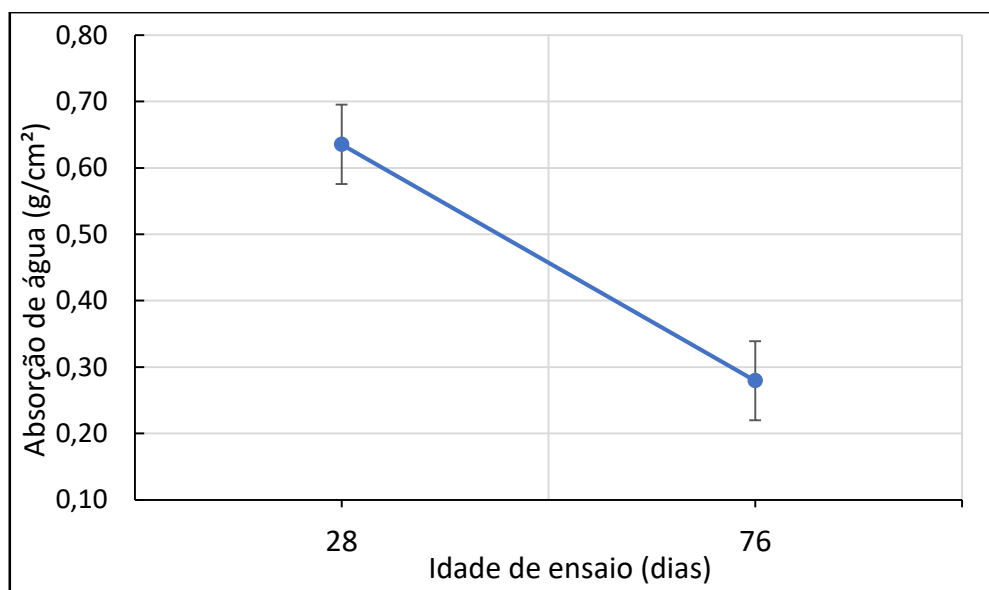
Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste – F	p	SIG.
Intercessão	7,532280	1	7,532280	489,0033	0,000000	-
Idade de Carregamento	0,097455	2	0,048728	3,1634	0,056204	<i>Não</i>
Tipo de Aditivo	0,031862	1	0,031862	2,0685	0,160386	<i>Não</i>
Idade de Ensaio	1,140268	1	1,140268	72,0274	0,000000	<i>Sim</i>
Erro	0,477503	31	0,015403			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo; SIG: Significância
 Fonte: Elaboração Própria

A análise de variância (Tabela 13) mostrou que entre as variáveis independentes estudadas, somente a variável “idade de ensaio” se mostrou significativa ($p < 0,05$). Observa-se também que matematicamente, não existe diferença entre os resultados de absorção dos concretos produzidos com os aditivos cristalizantes “X e Y”.

O gráfico da Figura 12 mostra o efeito isolado da variável “Idade de ensaio” na absorção de água dos concretos estudados.

Figura 12 - Efeito isolado da variável “Idade de ensaio” na absorção de água por capilaridade dos concretos



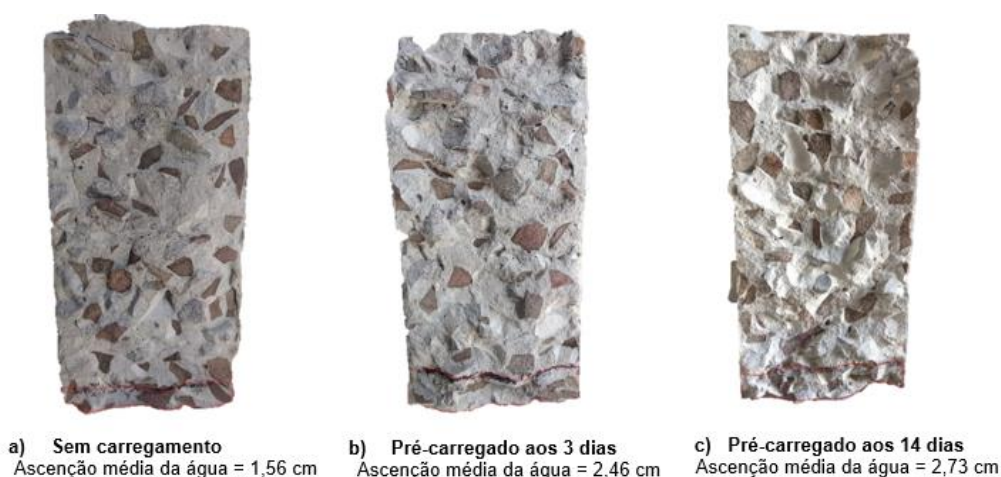
Fonte: Elaboração Própria

A variação da idade em que o ensaio é realizado promoveu uma redução importante na absorção de água por capilaridade dos concretos. Conforme Takagi (2013) estes resultados podem estar relacionados ao fato de que em maiores idades houve um maior tempo para a ação dos aditivos cristalizantes atuarem na colmatação das microfissuras, exercendo um preenchimento progressivo por géis de CSH formados devido os efeitos de autocicatrização, dificultando a passagem de água na matriz cimentícia.

4.2.1 Ascensão de água nos concretos

Após a finalização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, parte dos corpos de prova foram rompidos diametralmente para a observação da altura de ascensão de água, que foi determinada em cada amostra pela média de três pontos, determinados com o paquímetro digital. Posteriormente, com a digitalização das imagens, a ascensão média da água nos corpos de prova foi confirmada com a utilização do software JRule. Os resultados obtidos por ambos os métodos foram similares. As Figuras 13, 14 e 15 apresentam alguns dos corpos de prova após o rompimento diametral.

Figura 13 – Ascensão da água para o concreto de referência – após o ensaio de absorção na idade de 76 dias



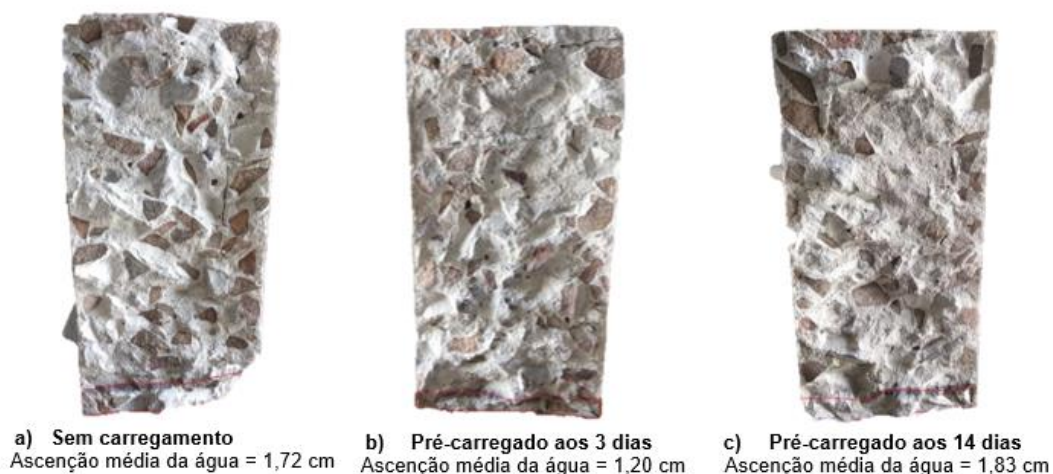
Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Ascensão da água para o concreto com aditivo cristalizante - X - após o ensaio de absorção na idade de 76 dias



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Ascensão da água para o concreto com aditivo cristalizante - Y - após o ensaio de absorção na idade de 76 dias



Fonte: Elaboração própria

Podemos observar que o traço referência com pré-carregamento aos 14 dias (Figura 13), foi o que apresentou maior altura de ascensão de água, chegando a 2,74cm, enquanto que o traço com aditivo cristalizante Y com pré-carregamento aos 3 dias (Figura 15), foi o que apresentou menor altura de ascensão de água, no valor de 1,20cm. No estudo de Pedroso (2019), o autor concluiu que dentre as amostras analisadas com e sem pré-carregamento, a que apresentou menor absorção com cimento CP V ARI, foi obtida na amostra sem aplicação de pré-carga e com aditivo cristalizante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresentou como objetivo principal avaliar a influência da utilização de diferentes aditivos cristalizantes em concretos fabricados com o cimento Portland CP V ARI – RS sobre seu potencial de autocratização. Para isso, o programa experimental desenvolvido procurou analisar uma avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de amostras de concretos pré-carregados em diferentes idades comparando com as amostras não fissuradas (referência). Os resultados obtidos no estudo foram analisados para verificar se as variáveis independentes estudadas (tipo de aditivo cristalizante, idade de carregamento e idade de ensaio) causaram um efeito significativo nas propriedades avaliadas (resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade). É importante salientar que as conclusões aqui apresentadas se limitam aos materiais e métodos utilizados neste estudo, qualquer alteração nesses processos pode ocasionar variações nos resultados.

Conclui-se que o pré-carregamento aplicado nos concretos nas primeiras idades não se refletiu nos ensaios de controle, devido ao fato do cimento CP V ARI já apresentar grande parte de sua resistência nas primeiras idades.

A análise dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias mostrou que os concretos com a incorporação de aditivos cristalizantes (submetidos ao pré-carregamento ou não) apresentaram um ganho de resistência mecânica, quando comparados aos concretos sem aditivo (concretos de referência). O bom desempenho dos concretos sugerem um indicativo de recuperação das microfissuras geradas nas primeiras idades pela ação dos aditivos cristalizantes, sugerindo que os dois produtos atuaram de forma positiva na minimização dos danos causados aos concretos nas primeiras idades.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade mostraram que os concretos com aditivos cristalizantes apresentaram um desempenho inferior ao do traço de referência para a idade de controle de 28 dias. Acredita-se que os aditivos cristalizantes possam ter alterado a conectividade dos poros capilares dos concretos, influenciando nos resultados de absorção para esta idade de controle, porém este comportamento precisa ser melhor estudado. No entanto, para a idade de 76 dias os traços com aditivos cristalizantes apresentaram um comportamento semelhante ao do traço de referência,

Considerando o uso de aditivos cristalizantes em matrizes cimentícias submetidas a danos nas primeiras idades, conclui-se que os aditivos utilizados nesta pesquisa são produtos promissores quando se deseja a recuperação mecânica de concretos microfissurados.

Diante do exposto, conclui-se que a incorporação de aditivos cristalizantes em matrizes cimentícias visando a recuperação de microfissuras, apresentaram evidências positivas por conta dos resultados obtidos nesse estudo, uma vez que foi observado benefícios para as propriedades avaliadas.

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestões para futuras pesquisas recomenda-se:

- Reproduzir a metodologia aplicada neste estudo para concretos produzidos com outros tipos de cimento Portland;
- Reproduzir a metodologia aplicada neste estudo para concretos submetidos a diferentes tipos de cura;
- Estudar as propriedades mecânicas de concretos com aditivo cristalizante (AC) e produzidos com diferentes tipos de cimento Portland submetidos a carregamentos distintos e em diferentes idades iniciais;
- Estudar a propriedade de absorção de água por capilaridade em diferentes idades de controle em concretos com AC submetidos a danos nas primeiras idades, objetivando avaliar a atuação do aditivo cristalizante ao longo do tempo;
- Estudar a influência de diferentes dosagens de aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos submetidos a pré-carregamentos nas primeiras idades;
- Estudar a penetração de cloretos em concretos com AC submetidos ao pré-carregamento nas primeiras idades;
- Estudar as modificações da estrutura interna do concreto nas primeiras idades por meio de microscopia óptica e/ou velocidade de propagação de onda ultrassônica;
- Executar um ensaio de água sob pressão para avaliar a estanqueidade em corpos de prova fissurados de concreto com aditivos cristalizantes;

7 REFERÊNCIAS

ALAZHARI, M.; SHARMA, T.; HEATH, A.; COOPER, R.; PAINE, K. **Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete**. 2017. BRE Centre for Innovative Construction Materials, University of Bath, UK, 2017.

ALGAIFI, H. A.; BAKAR, S. A.; SAM, A. R.; ISMAIL, M.; ABIDIN, A. R. Z.; SHARIR, S.; ALTOWAYTI, W. A. H. **Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete**. School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia, 2020.

ALPES, E. T. de A. **Influência dos aditivos cristalizantes na impermeabilização do concreto com a utilização de materiais da região de goiânia**. Orientador: André Luiz Bortolacci Geyer. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Curso de Engenharia Civil, Goiânia, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 212.3R-10: Report on Chemical Admixtures for Concrete, Committee 212**. Farmington Hills: ACI, 2010.

ANDRADE, J.J.O.; TISBIEREK, F. T.; RATHER, L. P. R.; NOBRE, T. R. S. Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO– REIBRAC, 45, 2003, Vitória - ES. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2003.

ARY, C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto**. Orientador: Antônio Eduardo Bezerra Cabral. 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. **Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement.** *Cement and Concrete Composites*. v. 99, n. February, p. 17–31, 2019a.

BERNARDI, T.; JANK, D. de M.; VENQUIARUTO, S. D. **Estudo da autocicatrização de concretos microfissurados nas primeiras idades submetidos a diferentes tipos de cura.** *In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO (SIEPE)*, 2018, Santana do Livramento. **Anais [...]**. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), 2018.

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

BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades.** Orientadora: Angela Borges Masuero Denise Carpena Coitinho Dal Molin. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre, 2018.

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

DACHERI, M. E. F. **avaliação do comportamento de concretos com politereftalato de etileno submetidos a elevadas temperaturas.** Orientadora: Simone Dornelles Venquiaruto. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2019.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do rio grande do sul.** 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre, 1988.

DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials.** State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, v. 11. Springer Science & Business Media, 2013.

DESHPANDE, S.; DARWIN, D.; BROWNING, J. **Evaluating Free Shrinkage of Concrete for Control of Cracking in Bridge Decks.** SM Report No. 89, University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS, p.290. 2007.

FERRARA, L.; KRELANI, V. **A fracture testing based approach to assess the self healing capacity of cementitious composites.** VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010.

FERREIRA, R. M. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia do Minho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Materiais e Reabilitação da Construção, Guimarães, 2000.

GJØRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2015.

GOMES NETO, D. P.; BARRETO, L. S. **Uma discussão sobre a reação álcalia-agregado (raa), seu mecanismo e fatores que a influenciam.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE PATOLOGIA E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS (CINPAR), 2013, João Pessoa. **Anais [...].** Universidade Federal de Sergipe, 2013.

HELENE, P.; GUIGNONE, G.; VIEIRA, G.; RONCETTI, L.; MORONI, F. **Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 3, p. 544–563, maio 2018.

IGARASHI, S.; KUNIEDA, M.; NISHIWAKI, T. **Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Materials.** Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09 (Nagoya, Japan), JCI, Keynote Lecture, 89-96. 2009.

JCI - TC075B. **Autogenous healing in cementitious materials: state of the art report of the JCI Technical committee TC-075B.** Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, 2009.

JOA, B. W. et al. **Effect of incorporation of self healing admixture (SHA) on physical and mechanical properties of mortars.** Journal of Ceramic Processing Research, v. 16, n. November 2015, p. s138–s143, 2015.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto.** 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Belo Horizonte, 2008.

LEMA, D.; MORAES, E.F.S.; OURIVES, C.N. **Durabilidade das estruturas pela impermeabilização por cristalização integral do concreto.** In: Revista concreto e construções nº 57. SÃO PAULO: IBRACON. 2015.

LEYANG, L.; GUO, P.; LIU, G.; HAN, N.; XING, F. **Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive.** Guangdong Province Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, School of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, PR China, 2019.

LUO, J.; CHEN, X.; CRUMP, J.; ZHOU, H.; DAVIES, D. G.; ZHOU, G.; ZHANG, N.; JIN, G. **Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete**. Department of Plant Biology, Rutgers University, New Brunswick, NJ, United States, 2018.

MA, H.; QIAN, S.; ZHANG, Z. **Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of Medium-Early-Strength Engineered Cementitious Composites**. Construction and Building Materials, v. 68, p. 92–101, 2014.

MARTIN, J. F. de F. S. **Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório**. Orientadora: Angela Borges Masuero Denise Carpena Coitinho Dal Molin. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre, 2021.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil, Brasília, 2016.

MOHAMMADREZA HASSANI, E. et al. **Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete**. ACI Materials Journal, v. 114, n. 6, p. 911–922, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. In: CREMONINI, R. A. (Tradução) 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, A. de S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras em matrizes cimentícias**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2019.

OLIVEIRA, T. A. de. **Autocicatrização autônoma de concretos com adição de nanorreservatórios de sílica e Idhs de nitrito sujeitos à ação de íons cloreto ou sulfato**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná (UFPR). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, 2019.

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, 2020.

PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. **Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete**. Acta Polytechnica, v. 56, n. 4, p. 306–311, 2016.

PEREIRA, B. C. G.; NASCIMENTO, R. S. **Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido**. 2017. Relatório Final (Programa de Iniciação científica) - Faculdade de tecnologia e ciências sociais aplicadas (FATECS), Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Brasília, 2017.

POLESELLO, E.; MAUS, M. A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido. 2021. **Revista Tecnologia e Tendências**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 1, p. 14-36, jan./jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v11i1.1986>. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistatecnologiaetendencias/article/view/1986>. Acesso em: 28 ago. 2021.

REDDY P. V. Y.; RAMESH B.; KUMAR L. P. **Influence of bacteria in self healing of concrete** - a review. 2020. Department of Civil Engineering, Saveetha School of Engineering, Saveetha Institute of Medical and Technical Sciences, (SIMATS), Chennai, India, 2020.

RIPPER, T.; SOUZA, V. C. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 255 p.

ROIG-FLORES, M.; PIRRITANO, F.; SERNA, P.; FERRARA, L. **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, no. 114, 447–457, 2016.

ROIG-FLORES, M.; MOSCATO, S.; SERNA, P.; FERRARA, L. **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments**. Construction and Building Materials, no. 86, pp. 1-11, 2015.

SAKALE, S. G. G. **Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture—A Review**. Materials Science and Engineering, Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, v. 34, n. 5, p. 1143–1154, 2019.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. **Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials**. Construction and Building Materials, v. 42, p. 217–224, 2013.

TAN, N. P. B.; KEUNG, L. H.; CHOI, W. H.; LAM, W. C.; LEUNG, H. N. Silica-based self-healing microcapsules for self-repair in concrete. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 43090, n. 10, p. 1–12, 2016.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

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

VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (self-healing)**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre, 2017.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2008.

VIEIRA, T. L. **Fissuras em concreto: Estudos de caso em Florianópolis**. 2017. Orientador: Wellington Longuini Repette. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Curso de Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

VILELA, H. T. P., TEIXEIRA FILHO, M. G., CAMPOS NETO, T. F. Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas. 2021. **Revista ALCONPAT**, Rio Verde, jan. 2021. v. 11 n. 1, pp. 1 – 17. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.461>. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?as_ylo=2020&q=aditivo+cristalizante+&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_vis=1. Acesso em: 28 ago. 2021.

WU, M.; HU, X.; ZHANG, Q.; CHENG, W.; XUE, D.; ZHAO, Y. **Application of bacterial spores coated by a green inorganic cementitious material for the self-healing of concrete cracks**. Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control, College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qianwangang Road, Xin'an Street, Huangdao District, Qingdao, Shandong, China, 2020.

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