

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

RAFAEL FUMACO TAMBARA

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM USO DE ADITIVO
CRISTALIZANTE**

**Alegrete
2024**

RAFAEL FUMACO TAMBARA

**AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM USO DE ADITIVO
CRISTALIZANTE**

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Co-orientadora: Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

**Alegrete
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

T154a Tambara, Rafael Fumaco

Autocicatrização de concretos com uso de aditivo
cristalizante / Rafael Fumaco Tambara.

167 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2024.

"Orientação: Fernanda Bianchi Pereira da Costa".

1. Autocicatrização. 2. Aditivo cristalizante. 3. Concreto.
I. Título.

RAFAEL FUMACO TAMBARA

AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM USO DE ADITIVO CRISTALIZANTE

Dissertação apresentada ao Programa Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 18/07/2024

Banca examinadora:

Prof^a. Doutora. Simone Dornelles Venquiaruto
Coorientadora

Prof. Doutor. Rogério Cattelan Antochaves de Lima
UFSM

Prof^a. Doutora. Águida Gomes de Abreu
UNEMAT



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2024, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Aguida Gomes de Abreu, Usuário Externo**, em 19/07/2024, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Usuário Externo**, em 19/07/2024, às 19:10, 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 **1450070** e o código CRC **EFFE063A**.

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos, cujo apoio constante e incentivo têm sido fundamentais para o meu crescimento pessoal e acadêmico. Também dedico aos mestres e doutores que generosamente compartilharam sua sabedoria comigo, tornando possível a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTO

Ao final desta jornada, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Primeiramente, agradeço à minha família pelo amor, apoio e incentivo incondicionais. Vocês foram a base que me sustentou nos momentos mais difíceis e a inspiração para seguir em frente. Aos meus amigos, agradeço pela compreensão, pelas palavras de encorajamento e por estarem ao meu lado em todas as etapas deste percurso. A amizade de vocês foi fundamental para que eu conseguisse superar os desafios encontrados ao longo do caminho.

Aos meus colegas e professores, minha sincera gratidão pelo compartilhamento de conhecimentos, experiências e pela colaboração nos momentos necessários. Vocês contribuíram de maneira significativa para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Um agradecimento especial à minha orientadora, professora Fernanda Bianchi Pereira da Costa, pela paciência, dedicação e orientações valiosas. A minha coorientadora, professora Simone Dornelles Venquiaruto, agradeço pela atenção, pelas sugestões pertinentes e pelo apoio constante. A sabedoria e incentivo de vocês foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Também não poderia deixar de agradecer aos colegas do grupo de pesquisa (GPTeC) e aos técnicos do laboratório de engenharia civil da Unipampa, Marcelo Dias de Oliveira e Raquel dos Santos Machado por todo auxílio nos ensaios realizados em laboratório.

Ao professor André Lubech e seu bolsista Liberto Zuge, expresse minha gratidão pela disponibilidade e assistência no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A ajuda de vocês foi importante para a realização das análises necessárias para esta pesquisa. Também gostaria de agradecer ao Luis Tambara pelo auxílio nos ensaios de caracterização dos materiais realizados na Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Sua colaboração foi imprescindível para o desenvolvimento e sucesso deste trabalho.

Por fim, deixo aqui o meu muito obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação. Este trabalho é resultado de um esforço conjunto e cada um de vocês tem uma parte importante na sua concretização.

Muito obrigado a todos!

Pesquisar é acordar para o mundo.

– (Marcelo Lamy)

RESUMO

Este trabalho investigou a influência da incorporação de um aditivo cristalizante nacional no fenômeno da autocicatrização de concretos estruturais produzidos com cimento Portland (CP V ARI – RS) e submetidos a pré-carregamentos por compressão axial em diferentes idades (7 e 28 dias). Para cada idade de carregamento foram rompidas até o limite três amostras de cada traço e a partir do valor médio de ruptura foi determinado o percentual de carga que seriam aplicados em parte dos concretos (0%, 50% e 80% do $f_{ck,méd}$). Visando estimular a autocicatrização, as amostras permaneceram em cura submersa desde a sua produção até as suas respectivas idades de ensaio, sendo retiradas da cura apenas para a etapa de pré-carregamento e posteriormente retornando para a mesma. As amostras pré-carregadas aos 7 dias foram ensaiadas aos 14, 28, 56 e 91 dias, enquanto que as amostras pré-carregadas aos 28 dias foram ensaiadas aos 35, 56 e 91 dias. Os ensaios de controle selecionados foram de Resistência à Compressão Axial, Absorção de Água por Capilaridade (Método de Kelham) e Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica. Além disso, algumas amostras foram analisadas por meio de imagens de Microscopia Óptica para monitorar a formação dos produtos de autocicatrização ao longo do tempo. Os resultados obtidos permitem concluir que: (i) através do ensaio de resistência à compressão axial constatou-se que os concretos com aditivo cristalizante (CA) sem aplicação de carregamento apresentaram um melhor desempenho mecânico entre as misturas investigadas; (ii) a avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica com a variação do tempo mostrou um aumento da velocidade ultrassônica nos concretos com incorporação de CA e pré-carregados nas idades de 7 e 28 dias, independentemente do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%), indicando a reparação das microfissuras; (iii) quanto a absorção de água por capilaridade, os concretos que não foram submetidos a pré-carregamento exibiram padrões semelhantes de redução na absorção média, independentemente da presença do aditivo cristalizante. No entanto, destaca-se que o concreto com adição de CA demonstrou uma resistência superior à absorção de água em comparação com o concreto de referência, especialmente sob condições de pré-carregamento; (iv) para análise de imagem por microscopia óptica os concretos referência não apresentaram cicatrização superficial relevante, enquanto que os concretos com adição de CA apresentaram preenchimento parcial das fissuras, por meio da precipitação do carbonato de cálcio. Em suma, os ensaios realizados nesta pesquisa corroboram os benefícios da adição de aditivo cristalizante aos concretos, especialmente no que diz respeito à capacidade de autocicatrização.

Palavras-chave: Autocicatrização. Aditivo Cristalizante. Concreto.

ABSTRACT

This study investigated the influence of the incorporation of a crystalline admixture (CA) on self-healing in structural concretes made with Portland cement (CP-V ARI-RS) and subjected to pre-loading by axial compression at different ages (7 and 28 days). For each loading age, three samples of each mix were tested for compressive strength, and the average rupture value was used to determine the percentage of load that would be applied to the concrete (0%, 50%, and 80% of the average f_{ck}). To stimulate self-healing, the samples were submerged in water from when they were produced until their respective test ages. The samples were only removed from curing during the pre-loading stage. Samples preloaded at 7 days were tested at 14, 28, 56, and 91 days, while samples preloaded at 28 days were tested at 35, 56, and 91 days. The control tests selected were axial compressive strength, water absorption by capillarity (Kelham method), and ultrasonic wave propagation velocity. In addition, some samples were analyzed using optical microscopy images to monitor the formation of self-healing products over time. The results obtained allow us to conclude that (i) the axial compressive strength test showed that concrete with CA and without loading had the best mechanical performance of the mixtures investigated; (ii) the evaluation of ultrasonic wave propagation velocity with time variation showed an increase in ultrasonic velocity in concretes incorporating CA and preloaded at 7 and 28 days, regardless of the percentage of loading applied (0%, 50% and 80%), indicating the repair of microcracks; (iii) concretes that were not preloaded showed similar patterns of reduction in average values of water absorption capillarity, regardless of the presence of the crystalline admixture. However, it is noteworthy that the concrete with added CA showed superior resistance to water absorption compared to the reference concrete, especially under pre-loading conditions; (iv) for optical microscopy image analysis, the reference concretes showed no significant surface healing, while the concretes with added CA showed partial filling of the cracks through the precipitation of calcium carbonate. In short, the tests carried out in this research corroborate the benefits of adding a crystalline admixture to concrete, especially its ability to self-heal.

Keywords: Self-Healing. Crystallizing Additive. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo dos comitês técnicos dedicados à autocicatrização	21
Figura 2 – Fissuração devido ao assentamento plástico	27
Figura 3 – Fissuração devido a recalque diferencial	29
Figura 4 – Desempenho e custo com manutenção durante a vida útil de estruturas sem (a) e com (b) material autocicatrizante	36
Figura 5 – Classificação dos fenômenos de autocicatrização de fissuras conforme o Diagrama de Venn	37
Figura 6 – Possíveis causas da cicatrização autógena de fissuras	38
Figura 7 – Processo de precipitação do carbonato de cálcio na presença de água e CO_2 dissolvido	39
Figura 8 – Precipitação de carbonato de cálcio próximo a abertura da fissura e em diferentes locais	40
Figura 9 – Possíveis geometrias internas de fissuras (a) fissura uniforme (b) fissura piramidal (c) fissura convexa (d) fissura côncava	48
Figura 10 – Processo de formação de cristais no interior das fissuras	50
Figura 11 – Fluxograma 1 do programa experimental	68
Figura 12 – Fluxograma 2 do programa experimental – detalhamento das idades dos ensaios de controle	69
Figura 13 – Difrátograma do cimento e aditivo cristalizante	74
Figura 14 – Curva de distribuição granulométrica do cimento e aditivo cristalizante	75
Figura 15 – Espectro de infravermelho do cimento Portland e aditivo cristalizante	78
Figura 16 – Fases de hidratação de uma amostra de referência	79
Figura 17 – Curvas de calorimetria das pastas de cimento Portland e aditivo cristalizante: (a) fluxo de calor e (b) calor acumulado	80
Figura 18 – Curva de distribuição granulométrica dos agregados	82
Figura 19 – Corpos de prova nos moldes e retificação	86
Figura 20 – Corpos de prova condicionados em cura submersa	86
Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão para realização do pré-carregamento nos CP's	87
Figura 22 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de resistência à compressão axial e idades de controle	89
Figura 23 – Posicionamento dos transdutores	89
Figura 24 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica e idades de controle	90
Figura 25 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de absorvidade e idades de controle	91
Figura 26 – Esquema do ensaio de absorvidade de Kelham	92
Figura 27 – Preparação das amostras para o ensaio de absorvidade	93
Figura 28 – Execução do ensaio de absorvidade	94
Figura 29 – Microscópio óptico ELIKLIV model:EDM43	95
Figura 30 – Demarcação das zonas de fissura para análise de microscopia óptica	95
Figura 31 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de microscopia óptica e idades de controle	96
Figura 32 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial para amostras pré-carregadas aos 7 dias	97

Figura 33 – Efeito isolado da variável "tipo de concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias	101
Figura 34 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias	102
Figura 35 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias	103
Figura 36 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial para amostras pré-carregadas aos 28 dias	105
Figura 37 – Efeito isolado da variável "Tipo de concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias	108
Figura 38 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias	109
Figura 39 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias	110
Figura 40 – Resultados médios de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias	112
Figura 41 – Resultados médios de velocidade de propagação da onda ultrassônica para amostras pré-carregadas aos 7 dias	115
Figura 42 – Efeito isolado da variável "tipo de concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias	118
Figura 43 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias	119
Figura 44 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias	120
Figura 45 – Resultados médios de velocidade de propagação da onda ultrassônica para amostras pré-carregadas aos 28 dias	121
Figura 46 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 28 dias	124
Figura 47 – Resultados médios de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias	125
Figura 48 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos sem pré-carregamento (0%)	128
Figura 49 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 7 dias com 50% de carregamento	129
Figura 50 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 7 dias com 80% de carregamento	130
Figura 51 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 28 dias com 50% de carregamento	131
Figura 52 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 28 dias com 80% de carregamento	132
Figura 53 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar para amostras pré-carregadas aos 7 dias	133
Figura 54 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar para amostras pré-carregadas aos 28 dias	136
Figura 55 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias	139
Figura 56 – Comparação entre o aspecto da fissura aos 14 dias (idade de abertura da fissura) e após 91 dias de cicatrização, para corpos de prova referência e CA	143

Figura 57 – Comparação das fissuras binarizadas após 91 dias de cicatrização, para corpos de prova referência e CA 144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores intervenientes no fenômeno de autociatrização	42
Tabela 2 – Requisitos de fissuração em relação às classes de agressividade ambiental relacionadas a durabilidade	47
Tabela 3 – Trabalhos com aditivos cristalizantes para avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade	59
Tabela 4 – Variáveis utilizadas na pesquisa	71
Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos materiais	73
Tabela 6 – Granulometria do aglomerante e aditivo cristalizante	75
Tabela 7 – Composição química do aglomerante e aditivo cristalizante	76
Tabela 8 – Ensaio químicos, físicos e mecânicos do cimento CP V ARI - RS	76
Tabela 9 – Caracterização física do agregado miúdo	82
Tabela 10 – Caracterização física do agregado graúdo	82
Tabela 11 – Dosagem dos traços de concreto	83
Tabela 12 – Detalhamento dos traços e quantidade de materiais para produção dos concreto	84
Tabela 13 – Quantitativo de corpos de prova por traço para os ensaios de controle	85
Tabela 14 – Variação da resistência à compressão axial de amostras com CA pré-carregadas aos 7 dias em comparação ao concreto referência	98
Tabela 15 – Análise da variância (ANOVA) global da resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 7 dias	99
Tabela 16 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias	100
Tabela 17 – Variação da resistência à compressão axial de amostras com CA pré-carregadas aos 28 dias em comparação ao concreto referência	106
Tabela 18 – Análise da variância (ANOVA) global para a resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 28 dias	106
Tabela 19 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias	107
Tabela 20 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para a resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias	113
Tabela 21 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias	113
Tabela 22 – Análise da variância (ANOVA) global para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 7 dias	116
Tabela 23 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias	117
Tabela 24 – Análise da variância (ANOVA) global para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 28 dias	122
Tabela 25 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias	123
Tabela 26 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias	125
Tabela 27 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias	126
Tabela 28 – Resultados da taxa de absorção média ($g/cm^2h^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) dos concretos pré-carregados aos 7 dias	134
Tabela 29 – Análise da variância (ANOVA) global para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 7 dias	135

Tabela 30 – Análise da variância (ANOVA) a pares para absorção de água entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias	135
Tabela 31 – Resultados da tava de absorção média ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) dos concretos pré-carregados aos 28 dias	137
Tabela 32 – Análise da variância (ANOVA) global para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 28 dias	138
Tabela 33 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias	138
Tabela 34 – Resultados da tava de absorção média ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias	140
Tabela 35 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias	140
Tabela 36 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC – Aditivo cristalizante
- CSA – Aditivo expansivo
- PRAH – Aditivo redutor de permeabilidade para condições de pressão hidrostática
- ACI – American Concrete Institute
- CAA – Classe de agressividade ambiental
- CA – Aditivo cristalizante
- CP I – Cimento Portland Comum
- CP II - E – Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno
- CP II - F – Cimento Portland composto com material carbonático
- CP III - RS – Cimento Portland de alto forno - Resistente a sulfato
- CP IV – Cimento Portland pozolânico
- CP IV - RS – Cimento Portland pozolânico - Resistente a sulfato
- CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
- CP V ARI - RS – Cimento Portland de alta resistência inicial - Resistente a sulfato
- CP's – Corpos de provas
- DRX – Difração de raio-x
- FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
- FRX – Fluorescência de raio-x
- GPTeC – Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Construção
- ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica
- JCI – Japan Concrete Institute
- LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção
- LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
- NBR – Norma Regulamentadora Brasileira
- PC – Pré-carregamento
- PDF – Powder Diffraction Files
- REF – Referência

A/C – Relação água/cimento

RS – Rio Grande do Sul

RILEM – The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

UEL – Universidade Estadual de Londrina

UEM – Universidade Estadual de Maringá

UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

UN – Unidades

UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UR – Umidade Relativa

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2CO_3	–	Ácido carbônico
H_2O	–	Água
C_3S	–	Alita
C_4AF	–	Aluminato tetracálcio
C_3A	–	Aluminato tricálcico
KBr	–	Brometo de potássio
$CaCO_3$	–	Carbonato de cálcio
cm	–	Centímetro
cm^2	–	Centímetro quadrado
cm^2/g	–	Centímetro quadrado por grama
CO_2	–	Dióxido de carbono/Gás carbônico
SiO_2	–	Dióxido de silício
TiO_2	–	Dióxido de titânio
g	–	Gramma
g/cm^2	–	Gramma por centímetro quadrado
g/cm^3	–	Gramma por centímetro cúbico
g/m^3	–	Gramma por metro cúbico
$^{\circ}C$	–	Graus célsius
$Ca(OH)_2$	–	Hidróxido de cálcio
Ca^{2+}	–	Íons cálcio
CO_3^{2-}	–	Íons carbonato
H_2^+	–	Íons hidrogênio
Mg	–	Magnésio
m	–	Metro
m/s	–	Metros por segundo
m^2	–	Metro quadrado
m^3	–	Metro cúbico
mA	–	Miliamper

mm	–	Milímetro
mg	–	Miligrama
μm	–	Micrômetro
MPa	–	MegaPascal
MPa/s	–	MegaPascal por segundo
Al_2O_3	–	Óxido de alumínio
CaO	–	Óxido de cálcio
Fe_2O_3	–	Óxido de ferro
MgO	–	Óxido de magnésio
MnO	–	Óxido de manganês
K_2O	–	Óxido de potássio
Na_2O	–	Óxido de sódio
F_2O_5	–	Pentóxido de fósforo
pH	–	Potencial hidrogeniônico
kg	–	Quilograma
kg/dm^3	–	Quilograma por decímetro cúbico
kg/m^3	–	Quilograma por metro cúbico
kN	–	QuiloNewton
kV	–	Quilovolts
f_{cm}	–	Resistência média do concreto
f_{cm7}	–	Resistência média do concreto aos 7 dias
f_{cm28}	–	Resistência média do concreto aos 28 dias
$C - S - H$	–	Silicato de cálcio hidratado
C_2S	–	Silicato dicálcico (belita)
C_3S	–	Silicato de tricálcico
Na	–	Sódio
$CaSO_4$	–	Sulfato de cálcio
SO_3	–	Trióxido de enxofre
$C_4A_3\$$	–	Ye-elemita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
1.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	FISSURAÇÃO E DURABILIDADE	26
2.1.1	Mecanismos de fissuração	26
2.1.2	Mecanismos de transporte de água e umidade no concreto	31
2.2	FENÔMENO DE AUTOCICATRIZAÇÃO (<i>SELF-HEALING</i>)	34
2.2.1	Mecanismos de autocicatrização	36
2.2.1.1	Cicatrização autógena	37
2.2.1.2	Cicatrização autônoma	40
2.2.2	Fatores intervenientes na autocicatrização de materiais cimentícios	41
2.2.2.1	Influência da relação água/cimento	42
2.2.2.2	Influência do tipo de cimento	43
2.2.2.3	Influência do tipo de cura em diferentes ambientes de exposição	43
2.2.2.4	Influência da idade de pré-carregamento	45
2.2.2.5	Influência da abertura de fissura	46
2.2.3	Aditivos cristalizantes	49
2.2.4	Estudo de casos – autocicatrização com aditivos cristalizantes	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1	ETAPA 1 – PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	70
3.1.1	Variáveis da pesquisa	70
3.1.2	Seleção e caracterização dos materiais	72
3.1.2.1	Cimento e aditivo cristalizante	73
3.1.2.2	Agregados	81
3.2	ETAPA 2 – MOLDAGEM, CURA E PRÉ-CARREGAMENTO	83
3.2.1	Produção do concreto	83
3.2.2	Mistura dos materiais	84
3.2.3	Ensaio de consistência	84
3.2.4	Massa específica	84
3.2.5	Moldagem dos corpos de prova	84
3.2.6	Cura	86
3.2.7	Indução de fissuras	87
3.3	ETAPA 3 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS	88
3.3.1	Resistência à compressão axial	88
3.3.2	Velocidade de propagação da onda ultrassônica	89
3.3.3	Ensaio de absorção capilar pelo Método de Kelham	90
3.3.4	Microscopia óptica	94
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	97
4.1	Resistência à compressão axial	97

4.2	Velocidade de propagação da onda ultrassônica	114
4.3	Ensaio de absorção capilar pelo Método de Kelham	126
4.4	Microscopia óptica	141
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
5.1	APRENDIZADOS	147
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	147
	 REFERÊNCIAS	 148
	 ANEXO A – DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .	 160
	 ANEXO B – DADOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA	 161
	 ANEXO C – DADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA CONCRE- TOS PRÉ-CARREGADOS AOS 7 DIAS	 162

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material bastante suscetível ao surgimento de problemas estruturais e a falta de tratamento dessas questões resulta na deterioração da estrutura (ZIEGLER, 2020). Apesar de ser um material altamente resistente à compressão, possui uma resistência relativamente baixa à tração (CARMONA; CARMONA FILHO, 2013). Contudo, devido ao seu bom desempenho mecânico, é amplamente utilizado na indústria da construção civil, sendo um dos materiais mais utilizados no mundo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto, apesar de resistente, pode apresentar fissuras quando submetidos a esforços excessivos, variações de temperatura, substâncias corrosivas, infiltrações e outros elementos adversos, sendo que, quanto maiores forem as aberturas dessas fissuras, maior será o risco de comprometimento da sua durabilidade, se tornando essencial a realização do tratamento e reparo (TAKAGI, 2013). Quando a fissura apresenta uma abertura significativa (em geral superiores a 0,3 ou 0,4mm), ela pode se transformar em uma rota preferencial para a entrada de substâncias agressivas, resultando na redução do cobrimento efetivo, corrosão de armaduras e diminuição da vida útil do concreto. De acordo com a norma brasileira NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2014), na qual trata os limites de abertura de fissuras de acordo com a classe de agressividade ambiental (CAA) dos concretos, quando o concreto está exposto a um ambiente agressivo de classe IV (ambiente industrial), o limite máximo de abertura de fissuras é de 0,2mm. Por outro lado, quando se está em um ambiente de classe I (ambiente rural e/ou submerso), esse limite máximo é aumentado para 0,4mm (SILVA FILHO; HELENE, 2011). Contudo, nem todas as fissuras representam um risco para a segurança ou durabilidade da edificação, mas podem causar impacto psicológico nos seus ocupantes (THOMAZ, 2020). Pesquisadores como Wu, Johannesson e Geiker (2012) afirmam que adotar medidas para selar essas fissuras é uma das opções viáveis, tanto para evitar o desconforto dos usuários quanto para proteger a integridade da estrutura. No entanto, os autores concordam que quando se trata de obras de grande porte, como rodovias, túneis e pontes, a implementação de inspeção e manutenção se torna mais difícil, devido à quantidade considerável de mão de obra e recursos necessários para realização do mesmo devido às condições existentes, tornando o custo muito elevado.

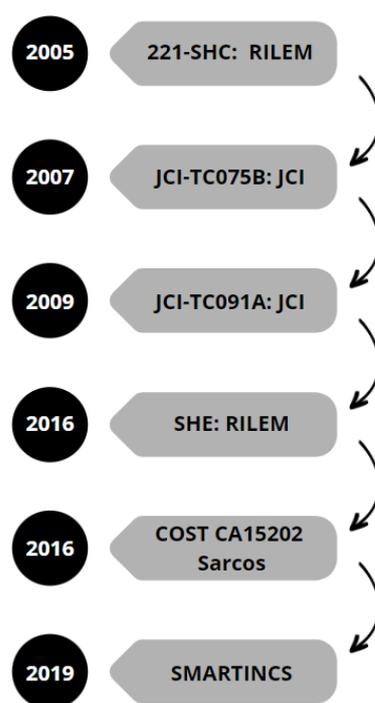
Existem diversas opções de materiais e tecnologias inovadoras atualmente que podem ajudar na reparação de fissuras. Nesta situação, o aproveitamento deliberado das capacidades de autorreparação do concreto oferece uma vantagem significativa em termos de aspectos financeiros, visto que o próprio material possui propriedades que podem contribuir para o fechamento das fissuras, alternativa a qual vem sendo amplamente estudada nos últimos anos e tem apresentado resultados satisfatórios. Esse processo é chamado de autocicatrização ou *self-healing* (PETRY, 2021).

A autocicatrização autógena, ou *self-healing*, é caracterizada como um processo natural, intrínseco às propriedades e à composição dos materiais cimentícios, causada principalmente

pela hidratação do cimento e pela precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), demonstrando-se extremamente benéfico no procedimento de reparação de fissuras (ROIG-FLORES et al., 2016). De acordo com Ghosh (2009), a autocicatrização pode ser descrita como a habilidade de um material se curar dos danos de maneira automática e autônoma, ou seja, sem a necessidade de qualquer intervenção externa.

O interesse no estudo do fenômeno da autocicatrização em matrizes cimentícias tem crescido com o surgimento de comitês técnicos dedicados a esse tema. A Figura 1 apresenta uma compilação dos comitês criados ao longo do tempo.

Figura 1 – Linha do tempo dos comitês técnicos dedicados à autocicatrização



Fonte: Adaptado de Petry (2021)

A primeira publicação relacionada a estudos sobre a autocicatrização aconteceu em 1994 por Carolyn Dry, no qual analisou a autocicatrização de fissuras e poros em materiais de matriz cimentícia, utilizando fibras para reduzir as dimensões das fissuras induzidas (WEBER, 2022). Em 2005, foi criado o comitê técnico 221-SHC: *Self-healing phenomena in cement-based materials*, da *The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM), com o objetivo de revisar e estudar os conhecimentos adquiridos até então, chegando em seu fim no ano de 2013 (DE ROOIJ et al., 2013).

No ano de 2007, o Japan Concrete Institute (JCI) criou o Comitê técnico JCI-TC075B: *Autogenous Healing in Cementitious Materials*. O objetivo desse comitê era promover a conscientização sobre o desempenho da autocicatrização em materiais à base de cimento, sendo esse o responsável pela elaboração e publicação do primeiro relatório (PETRY, 2021).

Em 2009, o comitê técnico JCI-TC091A: *Technical Committee on Self-healing / Repairing Technology in Cement-based Materials* foi criado, substituindo o atual comitê da época JCI-TC075B. O objetivo desse novo comitê foi estabelecer tarefas para os grupos de pesquisa e membros participantes como: avaliação do desempenho de métodos de avaliação da autocicatrização, a análise dos mecanismos do processo de autocicatrização e a determinação das características de cicatrização que podem ser avaliadas por meio de ensaios não destrutivos (PETRY, 2021).

Já em 2016 foram criados dois novos grupos técnicos de estudo sobre a autocicatrização: o comitê técnico SHE: *Self-healing concrete – Its efficiency and evolution*, da RILEM e o COST CA15202 SARCOS: *Self-healing as preventive repair of concrete structures*. O primeiro teve como finalidade suceder o citado anteriormente RILEM TC 221-SHC. Já o segundo teve como objetivo a implementação de soluções para prevenir reparos e soluções para prolongar a vida útil de estruturas de concreto (SBARDELOTTO, 2022).

No final do ano de 2019 foi criado o grupo SMARTINCS: *Self-Healing - Multi-functional, Advanced Repair Technologies In Cementitious Systems*. Essa rede de instituições europeias, que continua ativa até os dias atuais, concedeu financiamento a novos cientistas a fim de implementar novas estratégias de prevenção da deterioração inicial de estruturas por meio da autocicatrização (PETRY, 2021; SBARDELOTTO, 2022).

No contexto brasileiro, a tecnologia de concretos autocicatrizantes foi introduzida e desenvolvida apenas em 2011 pelo laboratório de pesquisa do Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Desde então, essa tecnologia tem sido empregada em projetos específicos, visando a obtenção de maior durabilidade nas obras realizadas (TAKAGI, 2013). Dentre os projetos brasileiros que adotaram a utilização de concretos autocicatrizantes, destacam-se a laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som, localizado em Copacabana, Rio de Janeiro, e a Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio, situado no centro da cidade do Rio de Janeiro (TAKAGI, 2013). Além disso, essa tecnologia foi aplicada nas lajes de fundo de algumas estações da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro. Um exemplo mais recente encontra-se em Porto Alegre, no Edifício Pontal, onde o concreto autocicatrizante foi utilizado na laje de subpressão, localizada abaixo do nível do Lago Guaíba (ZIEGLER, 2020).

O interesse pelo tema estimulou o surgimento de pesquisas científicas relacionadas ao estudo da autocicatrização em diversas universidades do Brasil. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) apresenta diversos trabalhos abordando essa temática, entre eles: "Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências" elaborado por Petry (2021); "Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes" elaborado por Ziegler (2020); "Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos" elaborado por Cappellesso (2018); "Influência Da Microfissuração Causada Nas Primeiras Idades Na Durabilidade De Concretos Ao Longo Do Tempo (Self-Healing)" elaborado por Venquiaruto (2017); "Influência do carregamento precoce na retração

por secagem do concreto" elaborado por Silva (2016). A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) possui trabalhos como: "Autocicatrização do concreto com diferentes tipos de cimentos em interação com catalisador cristalino" elaborado por Pedroso (2019). A Universidade Estadual de Londrina (UEL) possui trabalhos como: "Autocicatrização de materiais cimentícios com escória de alto-forno e ativador alcalino" elaborado por Gonçalves Junior (2022). A Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) possui trabalhos como: "Influência de diferentes linhagens bacterianas e nutrientes na autocicatrização de matrizes a base de cimento com e sem ar incorporado" elaborado por Lenz (2022). A Universidade Estadual de Maringá (UEM) possui trabalhos como: "Avaliação da autocicatrização autógena de fissuras em materiais cimentícios com adição de escória de alto forno" elaborado por Sbardelotto (2022). Além dessas, a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) possui trabalhos nessa temática como: "Potencial de autocicatrização dos materiais cimentícios promovida pela biomineralização de carbonato de cálcio por diferentes linhagens bacterianas em uma matriz com ar incorporado" elaborado por Mello (2022) e "Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto" elaborado por Pacheco (2020).

A relevância dos concretos com capacidade de autorregeneração torna-se evidente, não apenas pela redução de custos com reparos, mas também pela melhoria do desempenho estrutural e aumento da vida útil, especialmente em ambientes agressivos. Assim, a importância deste estudo encontra sua justificativa, levando em consideração que os resultados alcançados terão um papel crucial no avanço de tecnologias que visam proporcionar vantagens significativas em relação à durabilidade e sustentabilidade das edificações.

1.1 JUSTIFICATIVA

Ao projetar-se estruturas de concreto armado, já é esperada a ocorrência de algumas fissuras devido a influências como umidade, variação de temperatura e outros fatores (CAPPELLESSO, 2018). Segundo Neville (2016), a maioria dos fatores prejudiciais à durabilidade do concreto é resultado do transporte de fluidos através de sua microestrutura incluindo água, íons agressivos, dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio. O autor ainda afirma que a fissuração pode comprometer a durabilidade do concreto, facilitando esse transporte. No entanto, trata-se de uma propriedade intrínseca e difícil de ser totalmente controlada. Além disso o autor destaca que o surgimento de fissuras no material cimentício pode acontecer em um curto espaço de tempo após a moldagem ou até mesmo após anos de idade.

Com o agravamento da deterioração das estruturas ao longo dos últimos anos devido à falta de atenção prévia e às falhas nos processos de planejamento e execução das obras, a melhoria dos materiais empregados ganhou uma importância ainda maior. Assim, a procura por tecnologias avançadas que contribuam para a prevenção de fissuras e o aumento da durabilidade dos materiais tornou-se quase uma exigência (CAPPELLESSO, 2018).

Segundo Oliveira (2019), a adoção de tecnologias de autocicatrização abrange três conceitos fundamentais: custo, sustentabilidade e inovação. A extensão da vida útil da estrutura,

especialmente em ambientes altamente agressivos, resulta em menores intervenções e reduções de investimentos financeiros diretos e indiretos devido a falhas precoces no material cimentício, além de reduzir a necessidade de matéria-prima, resultando em uma diminuição no consumo de energia.

Em função do exposto, a autocicatrização de materiais cimentícios vem sendo foco de diversas pesquisas no meio científico em diversos países nos últimos anos (RAUF et al., 2020; JONKERS, 2021; GOJEVIĆ et al., 2021; ZHANG et al., 2021; QIAN et al., 2021; FALLON et al., 2022; GOMES et al., 2023; HERMAWAN et al., 2023; LI et al., 2023; WANG et al., 2023; MAHMOODI; SADEGHIAN, 2023). Apesar das vantagens proporcionadas pela capacidade de autorregeneração do concreto sem a necessidade de intervenção externa, a produção de material autocicatrizante ainda resulta em altos custos. De acordo com van Breugel (2012), é importante ressaltar que, embora os custos iniciais de um concreto com materiais cicatrizantes sejam mais elevados, ao longo do tempo, a ausência de reparos em estruturas construídas com esses materiais pode levar a menores investimentos quando comparados às estruturas de concretos tradicionais.

É possível intensificar a capacidade de auto reparo dos materiais cimentícios com a utilização de aditivos cristalizantes, os quais são introduzidos na matriz cimentícia durante o estágio inicial de cura (estado fresco). Segundo Guzlena e Sakale (2019), os aditivos cristalizantes possuem vantagens em relação a outros materiais autocicatrizantes, como a dispensa da necessidade de serem encapsulados antes da adição à mistura de concreto. Para Oliveira (2019), existem várias razões que levam à escolha dos aditivos cristalizantes como estimuladores da autocicatrização, tais como a disponibilidade desses produtos no mercado, bem como a facilidade e simplicidade de sua aplicação e incorporação na mistura cimentícia. Esses aditivos também possuem a capacidade de promover reações de hidratação em fissuras formadas mesmo em idades posteriores, pois quando retardadas, as reações podem ser ativadas novamente sempre que o cristalizante entrar em contato com a água ou estiver exposto a um aumento considerável de umidade, o que leva a potencialização do fenômeno de autocicatrização, visto que sempre que houver fissuras devido a entrada de água, reações secundárias de hidratação serão desencadeadas, contribuindo para a reparação do material (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014).

Dessa forma, visando ampliar o entendimento sobre o fenômeno de autocicatrização, este estudo abordará a autocicatrização autógena de fissuras em concretos com a incorporação de aditivos cristalizantes, submetidos a danos em diferentes idades. O aditivo será incorporado ao concreto durante a sua produção, através de uma dosagem recomendada pelo fabricante.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos estão apresentados nos tópicos 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo é analisar a contribuição de um aditivo cristalizante nacional no processo de aut cicatrização de fissuras em concretos convencionais (35 MPa) submetidos a danos por compressão (microfissuras).

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho se divide nos objetivos específicos a seguir, os quais têm como finalidade oferecer análises individuais e complementares realizadas em concretos com e sem aditivos cristalizantes, a fim de atingir o objetivo geral proposto neste trabalho:

- Avaliar a influência de diferentes níveis de pré-carregamento nas propriedades de resistência à compressão axial e absorção de água;
- Avaliar a influência de diferentes idades de pré-carregamento nas propriedades de resistência à compressão axial e absorção de água;
- Avaliar por meio do ensaio de propagação de onda ultrassônica a recuperação dos danos (microfissuras) que foram impostos aos concretos;
- Avaliar o fechamento de microfissuras de algumas amostras dos concretos produzidos, através de análise de imagens de microscopia óptica;
- Comparar os resultados das propriedades avaliadas a fim de investigar o potencial do uso do aditivo cristalizante na aut cicatrização dos concretos.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As restrições deste estudo incluem:

- a) Ambiente de laboratório sem climatização de temperatura e umidade;
- b) O pré-carregamento por compressão não assegura a padronização das espessuras das fissuras na matriz cimentícia. As fissuras resultantes da compressão axial podem exibir espessuras variáveis, podendo até ultrapassar a medida recomendada de 0,4mm para a ação do cristalizante. Além disso, não é possível afirmar como as microfissuras se distribuem internamente na matriz.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão discutidos alguns conceitos essenciais sobre microfissuração do concreto e o mecanismo de autocicatrização em materiais cimentícios. Também serão abordados os fatores que influenciam neste fenômeno, como a relação água/cimento, os diferentes tipos de cura, a idade de pré-carregamento, o ambiente de exposição dos concretos, entre outros. Também será dissertado sobre os aditivos cristalizantes e a sua forma de atuação no concreto. Por fim, será apresentado um compilado de alguns estudos científicos sobre o tema de autocicatrização e do uso de aditivos cristalizantes em matrizes cimentícias. A base teórica fornecerá o conhecimento necessário e contribuirá para o norteamento da pesquisa.

2.1 FISSURAÇÃO E DURABILIDADE

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a capacidade de durabilidade do concreto é influenciada pela maneira como o material interage com o ambiente no qual está inserido. Considera-se que o concreto é durável quando suas propriedades e características iniciais são preservadas após entrar em contato com o ambiente para o qual foi projetado. Portanto, a durabilidade do concreto refere-se ao tempo em que a estrutura é capaz de desempenhar seu papel conforme projetado, também conhecido como vida útil.

Conforme Weber (2022), embora os materiais cimentícios, como o concreto, apresentem uma boa capacidade de resistir a esforços, principalmente quando combinados com aço, ainda é possível que apresentem problemas patológicos ao longo do tempo. O autor ainda destaca que, qualquer manifestação patológica tem o potencial de diminuir a vida útil de uma estrutura por meio da redução do seu desempenho. Para Moreira (2016), a fissuração é a manifestação patológica mais comum dentre as que podem ocorrer em compósitos cimentícios, sendo ainda, originária por diversas possíveis causas, como a expansão térmica, carregamentos excessivos ou até mesmo em decorrência da retração hidráulica devido ao processo de hidratação do compósito.

Conforme abordado por Esteves (2019), os estudos literários demonstram que a ocorrência de fissuras em materiais cimentícios exercem uma influência significativa na infiltração e transporte de fluidos no concreto, o que o torna mais suscetível aos processos de deterioração da estrutura, principalmente devido a carbonatação e a penetração de cloretos. Esses fenômenos são responsáveis por iniciar a corrosão do aço presente nas estruturas de concreto armado, sendo um dos principais motivos que levam as estruturas ao colapso.

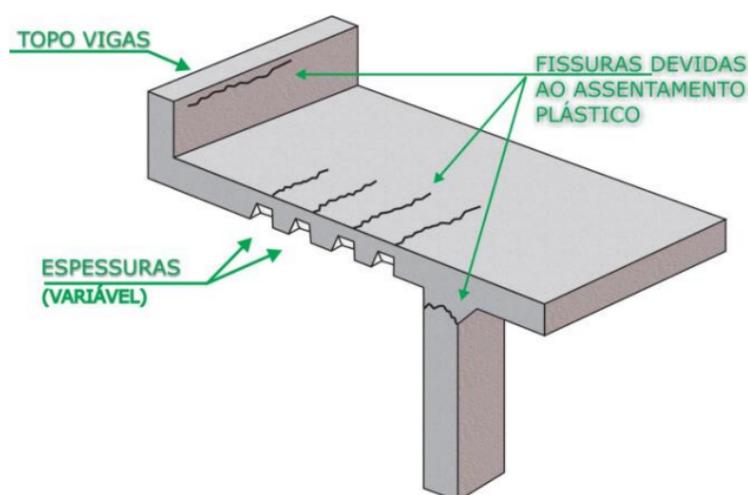
2.1.1 Mecanismos de fissuração

A ocorrência de fissuração no concreto se dá em dois momentos distintos, primeiramente as que se originam no estado fresco, e posteriormente as que se formam durante o estado endurecido. Algumas delas se originam antes do endurecimento, como as fissuras por retração

plástica, assentamento plástico, e as devidas movimentações das estruturas de suporte. Além disso, existem fissuras originadas no estado endurecido por meio dos fenômenos físicos (assentamento e cura), químico (corrosão e reação álcali agregado), térmicos (variações térmicas, ciclos de gelo e degelo) e estruturais (sobrecargas e deformações) (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MOREIRA, 2016). Na sequência será apresentado cada um dos mecanismos de fissuração.

- **Fissuração por assentamento plástico do concreto:** Logo após o lançamento, os materiais presentes no concreto apresentam movimentação devido à influência da gravidade e às diferenças de densidade. Nesse processo, as partículas sólidas, que ainda estão relativamente soltas na mistura fluida, têm a tendência de se deslocar em direção ao fundo das formas (segregação), enquanto a água e o ar incorporado se dirigem para a superfície (exsudação). Sendo assim, caso essas partículas tenham uma movimentação livre, o resultado será uma redução de volume do concreto, porém, se houver a presença de algum obstáculo que impeçam a livre movimentação das partículas, ou seja, impedem a homogeneidade do assentamento, como os agregados ou armaduras de aço, poderá ocorrer a descontinuidade no elemento e como consequência, a ocorrência de fissuras (BIANCHIN, 2018). Existem ainda outras formas comuns de fissuração devido ao assentamento plástico, como em elementos com espessura variável, onde as fissuras tendem a se concentrar em zonas mais finas, ou aquelas que se formam na parte superior de vigas ou pilares (Figura 2) (DAL MOLIN, 1988).

Figura 2 – Fissuração devido ao assentamento plástico



Fonte: Adaptado de Dal Molin (1988)

Segundo Neville (2016), as fissuras por assentamento ou retração plástica são principalmente causadas por erros durante a execução e podem ser evitadas com alguns cuidados, como a utilização de misturas com menor teor de água, a execução de um adensamento adequado e maior controle na velocidade de execução do concreto.

- **Fissuração por movimentação das estruturas de suporte:** Essas fissuras são causadas pelo deslocamento das fôrmas e escoramentos, o que pode levar a uma deformação significativa na peça. Isso resulta em alterações em sua geometria, que acabam por diminuir sua resistência, levando ao desenvolvimento de um padrão característico de fissuras que indica uma deficiência na capacidade de suporte. Além disso, pode ocorrer a deformação das fôrmas devido ao seu posicionamento inadequado, à existência de juntas mal vedadas ou fendas, ou à absorção excessiva de água pelo concreto. Essas circunstâncias podem resultar na formação de juntas de concretagem não planejadas, o que, geralmente, acaba levando à ocorrência de fissuras (SOUZA; RIPPER, 1998).
- **Fissuração por corrosão:** São originadas pelo aumento do volume da armadura durante os processos de corrosão, que resultam na formação de óxido de ferro. Os danos ao concreto incluem, além da fissuração, um eventual lascamento do concreto de cobertura. Sendo assim, ao longo de sua vida útil, um elemento de concreto armado pode estar sujeito a sofrer danos estruturais devido à perda não apenas da aderência entre o aço e o concreto, como também da área de seção transversal da barra. Em alguns casos, esses danos podem ser tão graves que acabam levando a estrutura ao colapso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).
- **Fissuração devido a recalques diferenciais:** Os recalques diferenciais geralmente surgem devido a várias imprecisões na interação entre o solo e a estrutura, que podem ocorrer em diferentes estágios, como o projeto, execução e até mesmo durante a sua utilização. A fissuração, neste caso, ocorre principalmente devido à magnitude do recalque e à capacidade da estrutura em absorvê-lo (SOUZA; RIPPER, 1998).

Na Figura 3 pode-se observar a ocorrência de uma fissuração em uma viga de concreto armado em virtude do recalque de um de seus apoios. É fundamental destacar que para evitar este tipo de manifestação patológica é necessário, em primeiro lugar, de um entendimento adequado do solo, bem como das tensões e deformações às quais a estrutura estará sujeita, visto que a recuperação ou reforço de estruturas danificadas em função da ocorrência de recalques nas fundações é um processo altamente custoso (SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 3 – Fissuração devido a recalque diferencial



Fonte: Souza e Ripper (1998)

- **Fissuração devido à reação álcali-agregado:** A reação álcali-agregado tem início com a interação dos hidróxidos alcalinos presentes na água dos poros com os materiais silicosos dos agregados. É importante ressaltar que nesse processo de reação a água desempenha um papel fundamental. Assim, como resultado, um gel higroscópico é formado nos poros dos agregados, devido a presença da sílica ativa, ou na superfície das partículas. Esse gel apresenta características de expansão, uma vez que absorve água e tende a aumentar de volume. Essa expansão ocorre devido ao fato do gel estar confinado pela pasta de cimento hidratada. Conseqüentemente, podem surgir pressões internas que, ao longo do tempo, podem levar à expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento hidratada. É importante destacar que a reação álcali-agregado é um processo de longa duração, cujos efeitos podem se tornar aparentes somente anos depois (NEVILLE, 2016). É possível também ocorrerem fissuras de reação álcali-agregado devido a tensões de tração no concreto, por meio da expansão de algum elemento presente no seu interior, de modo equivalente às fissuras de corrosão. Entretanto, essa condição se torna ainda mais grave, uma vez que os agregados estão dispersos por todo o volume do elemento, ao contrário das armaduras que estão localizadas em pontos específicos (BIANCHIN, 2018).
- **Fissuração devido ao ataque químico:** Em termos gerais, o ataque químico no concreto ocorre através da decomposição dos produtos de hidratação e da criação de novos compostos, os quais, se solúveis, como o sulfato de cálcio ($CaSO_4$), magnésio (Mg) e sódio (Na) presentes em alguns solos e também no ambiente marinho, podem ser dissolvidos e, se insolúveis, podem provocar a desagregação do material. Esses sulfatos acabam reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e com o aluminato tricálcico (C_3A) hidratado do concreto, resultando na formação de minerais que podem levar a expansão do concreto, provocando assim, fissuração do material (NEVILLE, 2016; BIANCHIN, 2018).
- **Fissuração devido à penetração de cloretos:** A corrosão das armaduras é uma das prin-

principais causas da deterioração de estruturas de concreto armado, tem ligação direta com a possibilidade de colapso das estruturas. Sendo assim, o ataque por cloretos tem como ponto de ação principal a corrosão da armadura, e normalmente ocorre pelo ingresso de íons cloreto no concreto, incorporados à mistura por meio de agregados contaminados por água do mar ou água salobra, e também por aditivos que contêm cloretos. Independentemente da origem, os cloretos penetram no concreto pelo transporte de água que contém os cloretos, bem como pela difusão dos íons na água e por absorção. Caso houver ingresso repetido ou prolongado, ao longo do tempo pode ocorrer uma elevada concentração de íons cloreto na superfície da armadura (NEVILLE, 2016).

Segundo pesquisadores como Helene (1993), Moura (2000), Mehta e Monteiro (2008), Venquiaruto (2017), a penetração de agentes agressivos, como os cloretos, ocorre através dos poros e microfissuras do concreto, sendo diretamente influenciada pela sua permeabilidade. Assim, a relação água/cimento tem influência direta na entrada e percolação de cloretos na estrutura.

- **Fissuração devida às variações térmicas ou ao teor de umidade:** As fissuras relacionadas a variação de temperatura ou teor de umidade estão ligadas a fenômenos naturais e a interação entre a estrutura com o meio, tanto a temperatura quanto a umidade podem gerar variações do volume do concreto. Com isso, qualquer redução que houver no volume do elemento estrutural e o mesmo for impedido de se deslocar ou deformar, acaba ocasionando a fissuração do material (BIANCHIN, 2018).

Segundo Thomaz (1989), as movimentações diferenciadas são uma das principais causas para a ocorrência desse tipo de fissura, e são resultantes da combinação de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, de oscilações de temperatura com grande amplitude, e da exposição a condições ambientais variadas. Por outro lado, a fadiga do material devido a ciclos sucessivos de molhagem e secagem e choques térmicos, também estão entre as principais causas da ocorrência desse tipo de fissuração.

Silva (1996) em sua pesquisa mostra que o aparecimento de fissuras devido a retração térmica é muito comum em lajes de grande comprimento restritas por vigas, marquises, pavimentos de concreto e muros. Além disso, a autora ainda aponta que o efeito térmico também pode se dar devido a presença de condutores de calor localizados próximos dos elementos estruturais, como por exemplo chaminés ou tubulações de água quente na qual não se encontrem isoladas.

- **Fissuração por ciclos de gelo-degelo:** Esse fenômeno é muito comum em ambientes atingidos por baixas temperaturas, principalmente durante o período de inverno. O estágio de endurecimento do concreto está diretamente relacionado com os impactos causados por esses fenômenos em seu desempenho, sendo que, se o congelamento acontece antes do endurecimento, tem-se como consequência a interrupção do processo de hidratação do cimento, o qual é retomado após a fase de descongelamento, não impactando

significativamente na sua resistência. Já se o congelamento ocorrer após a fase de endurecimento, há perdas significativas em sua resistência, pois toda água armazenada nos poros é congelada e expandida, assim, ao ocorrer o descongelamento, há uma expansão nos poros que resulta em um aumento progressivo à medida que a quantidade de ciclos aumenta. Isso, por sua vez, leva à deterioração do concreto devido as fissuras causadas pela pressão de dilatação (LAPA, 2008).

- **Fissuração por sobrecarga:** A aplicação de sobrecargas pode resultar no surgimento de fissuras em elementos de concreto armado, como pilares, vigas e paredes, sem que seja necessariamente causada a ruptura do elemento ou uma instabilidade estrutural. No entanto, a ocorrência de fissuras em um elemento estrutural específico acaba que por sua vez, redistribuindo as tensões ao longo do elemento fissurado e até mesmo em elementos próximos. Como resultado, a solicitação externa tende a ser absorvida de maneira mais globalizada pela estrutura, seja ela completa ou apenas uma parte dela (THOMAZ, 1989).

Conforme Lapa (2008), fatores como a aplicação de cargas excessivas além do projeto, impactos não previstos e a repetição de solicitações ao longo do tempo podem contribuir para o aparecimento das fissuras. As fissuras em idades iniciais, nesse caso, estão associadas frequentemente às cargas acidentais decorrentes das atividades de execução da obra, como o transporte e a estocagem de materiais sobre a estrutura, sequência executiva e operação de máquinas pesadas. Por outro lado, as fissuras de longo prazo são decorrentes do uso contínuo ou de eventos excepcionais, podendo ser desencadeadas por mudanças na ocupação das edificações ou por ocorrência de acidentes (BIANCHIN, 2018).

2.1.2 Mecanismos de transporte de água e umidade no concreto

Segundo Helene (1993) os principais mecanismos de transporte de água que podem ocorrer no concreto são: permeabilidade (água sob pressão), absorção capilar, difusão de vapor d'água e a entrada de água pelas fissuras. No concreto, esses mecanismos são governados por um gradiente, que pode ser uma diferença de potencial hidráulico quando causada pela presença de água sob pressão, ou uma diferença de concentração quando atribuída à difusão (NEPOMUCENO, 2005). Dependendo do ambiente de exposição do concreto, sejam eles: temperatura, umidade, entre outros fatores, os mecanismos podem atuar de forma conjunta, ou gradativamente, com o passar do tempo (PEREIRA, 2001). A seguir, serão detalhados os principais mecanismos de transporte presentes no concreto.

- **Permeabilidade:** Conforme descrito por Neville (2016), a permeabilidade é definida como a habilidade com a qual um líquido ou gás atravessa um meio poroso devido às diferenças de pressões. Quanto maior for seu diâmetro e mais interligados estiverem os poros, maior e mais rápida será a quantidade de água que ingressa e, conseqüentemente, maior será o valor da permeabilidade. Isto normalmente acontece com relações

de água/cimento relativamente altas, geralmente acima de 0,6 (FERREIRA, 2003; BIANCHIN, 2018).

Diversos fatores essenciais regem a formação da estrutura de poros no concreto, impactando diretamente a capacidade de fluidez e permeabilidade do material sob diferentes gradientes de pressão. Entre esses fatores estão o tipo de cimento utilizado, a relação água/cimento, o nível de hidratação do cimento, a quantidade e o tipo de aditivos minerais presentes, bem como a presença de microfissuras ou fissuras (RASHEEDUZZAFAR, 1992).

Conforme Uchikawa (1986 apud LOPES, 1999), a permeabilidade de um material aumenta significativamente à medida que a relação água/cimento aumenta, favorecendo a entrada de água e agentes agressivos. No entanto, à medida que a hidratação do cimento evolui, a permeabilidade sofre uma queda acentuada. Segundo Neville (2016) isso ocorre porque a hidratação promove a formação de uma estrutura de gel de silicato de cálcio hidratado e preenche os poros, reduzindo a conectividade e, conseqüentemente, a passagem de fluidos, sendo este fenômeno mais pronunciado em concretos com menores relações água/cimento. Portanto, segundo o autor, a relação água/cimento exerce um papel crucial na permeabilidade inicial, enquanto a evolução da hidratação desempenha um papel importante na diminuição da permeabilidade ao longo do tempo. Essa situação pode surgir em estruturas que estão submersas ou parcialmente submersas.

- **Absorção capilar:** A absorção capilar é um fenômeno no qual líquidos, em especial a água, penetram no concreto devido à tensão superficial presente nos poros capilares. Esse processo é influenciado por diferentes fatores como: viscosidade, densidade e tensão superficial no caso dos líquidos, bem como a estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares), energia superficial e teor de umidade dos sólidos, no caso do concreto (LOPES, 1999).

De acordo com Ferreira (1999), a capacidade do concreto de absorver água resultará em uma sucção de água para o interior dos poros, caso haja disponibilidade suficiente de água. Contudo, caso os poros sejam muito pequenos, esse fenômeno pode apresentar como consequência um aumento na altura de ascensão, gerando o efeito denominado como ascensão capilar.

Conforme mencionado por Helene (1993), a absorção capilar tem a capacidade de ocorrer de maneira extremamente rápida. Além disso, a absorção capilar não ocorre em concretos saturados. Tendo em vista que concretos mantidos permanentemente em estado saturado, não correm risco de penetração de água agressiva por capilaridade. O autor ainda destaca que, a comunicação entre os poros capilares é mais significativa do que em comparação ao seu diâmetro. Segundo estudos realizados pelo autor, concretos com uma relação água/cimento menor apresentam poros de tamanhos menores e com menor interligação,

o que acaba ocasionando em uma menor absorção de água, e conseqüentemente, menores alturas de ascensão.

Bauer (1995 apud LOPES, 1999) destaca que quanto menores forem os diâmetros dos poros, maiores serão as pressões capilares e a altura de ascensão capilar, já no caso de poros maiores, resultarão em alturas menores, porém volumes de absorção maiores. Porém, esse comportamento muitas vezes acaba se tornando diferente na prática, como relatado no estudo mencionado anteriormente por Helene (1993).

De acordo com Pereira (2001), a absorção capilar é um fenômeno predominante em estruturas com superfícies de concreto aparente, bem como em elementos que estão em contato direto com solos úmidos ou sujeitos a ciclos periódicos de umedecimento e secagem.

- **Difusão de vapor d'água:** A difusão de vapor d'água é outro fenômeno relacionado com a perda da durabilidade das estruturas de concreto e os processos de carbonatação e corrosão de armaduras. A difusão pode ser descrita como o processo pelo qual um fluido se desloca em resposta à presença de um gradiente de temperatura e/ou umidade, ou a um diferencial de potencial químico. Embora o fluxo de massa por difusão envolva geralmente uma quantidade menor de água, é essencial abordar esse fenômeno com cuidado, uma vez que materiais porosos são mais suscetíveis à penetração de gases do que de líquidos (NEVILLE, 2016; VENQUIARUTO, 2017; BIANCHIN, 2018).

Nepomuceno (2005) afirma que os processos de deterioração estão diretamente relacionados a um teor mínimo de umidade, o qual pode ser prontamente suprido pela exposição dos poros capilares do concreto à umidade atmosférica. Essa umidade atmosférica é capaz de penetrar nos poros do material e desencadear reações químicas que promovem a deterioração do concreto ao longo do tempo.

Conforme apontado por Meng (1994), poros com dimensões inferiores a 0,1 micrômetros possuem uma estrutura que dificulta a passagem de umidade tanto por capilaridade quanto por permeabilidade. No entanto, esses poros não estão isentos de outros processos de deterioração. Eles podem ser suscetíveis ao processo de difusão gasosa, no qual gases presentes na atmosfera conseguem penetrar nesses poros minúsculos e causar danos ao material ao longo prazo.

No entanto, essa situação é considerada menos preocupante em relação à capilaridade. Nos poros, a difusão de vapor ocorre com um fluxo relativamente baixo, caracterizando um processo mais lento se comparado a outros mecanismos de transporte de umidade. Além disso, é importante mencionar que poros de dimensões muito reduzidas tendem a se fechar rapidamente devido aos processos de carbonatação e hidratação do cimento. Esses processos químicos promovem a formação de produtos sólidos que podem obstruir os poros mais estreitos ao longo do tempo, diminuindo ainda mais a capacidade de difusão de vapor e reduzindo o risco de entrada de umidade significativa (BIANCHIN, 2018).

- **Entrada de água através das fissuras:** De acordo com a literatura, há um consenso entre muitos autores de que o fluxo de água tende a aumentar à medida que a abertura, profundidade ou extensão das fissuras se tornam maiores. Esses parâmetros influenciam diretamente a capacidade das fissuras permitir a entrada e o transporte de água, criando caminhos preferenciais para a infiltração (NEVILLE, 2016). Assim, tem sido dedicado um considerável esforço para avaliar como as características geométricas das fissuras, como profundidade, abertura e extensão, podem influenciar a infiltração de água no concreto (BIANCHIN, 2018).

De acordo com estudos conduzidos por autores como Park et al. (2012), foi constatado que a permeabilidade do concreto aumenta significativamente quando a largura da fissura excede 0,2mm. Isto deixa clara a existência de uma relação direta entre a largura da fissura e o aumento da permeabilidade.

Quando se trata de concretos em condições submersas, estudos feitos por Bruhwiler e Saouma (1995) demonstraram que a pressão hidrostática dentro da fissura é influenciada pela sua abertura, e observou-se que os valores dessa pressão diminuem à medida que a fissura se aprofunda. Essas descobertas indicam que a abertura da fissura desempenha um papel significativo na geração da pressão hidrostática, enquanto a profundidade da fissura afeta a magnitude dessa pressão. Reinhardt, Sosoro e Zhu (1998), por sua vez, evidenciam que fissuras com abertura de até 0,04mm apresentam um comportamento semelhante ao de concretos não fissurados. No entanto, quando a abertura das fissuras é superior a esse valor, observa-se um aumento significativo na permeabilidade do material à água sob pressão.

Kanematsu et al. (2009) observaram que a percolação de água nas fissuras ocorre imediatamente após sua exposição à água. O que, segundo eles, dependendo da profundidade da fissura, impactaria diretamente na durabilidade do material visto que a armadura estaria em contato com a água em pouco tempo após o início de uma situação de chuva, por exemplo.

- **Mecanismos combinados:** No concreto, os mecanismos de transporte de fluidos geralmente ocorrem de forma simultânea ou sequencial (VENQUIARUTO, 2017). Conforme ressaltado por Calçada (2004) a difusão pura ou a permeabilidade pura são observadas apenas em concretos saturados, enquanto em concretos secos ou parcialmente saturados, o fenômeno predominante é a sucção capilar.

2.2 FENÔMENO DE AUTOCICATRIZAÇÃO (*SELF-HEALING*)

Conforme descrito no tópico 2.1, o concreto tem uma desvantagem, que é a sua tendência à formação de fissuras devido à sua resistência à tração ser limitada. Embora o reforço de aço no concreto ajude a limitar a largura dessas fissuras, ele não é projetado para evitar

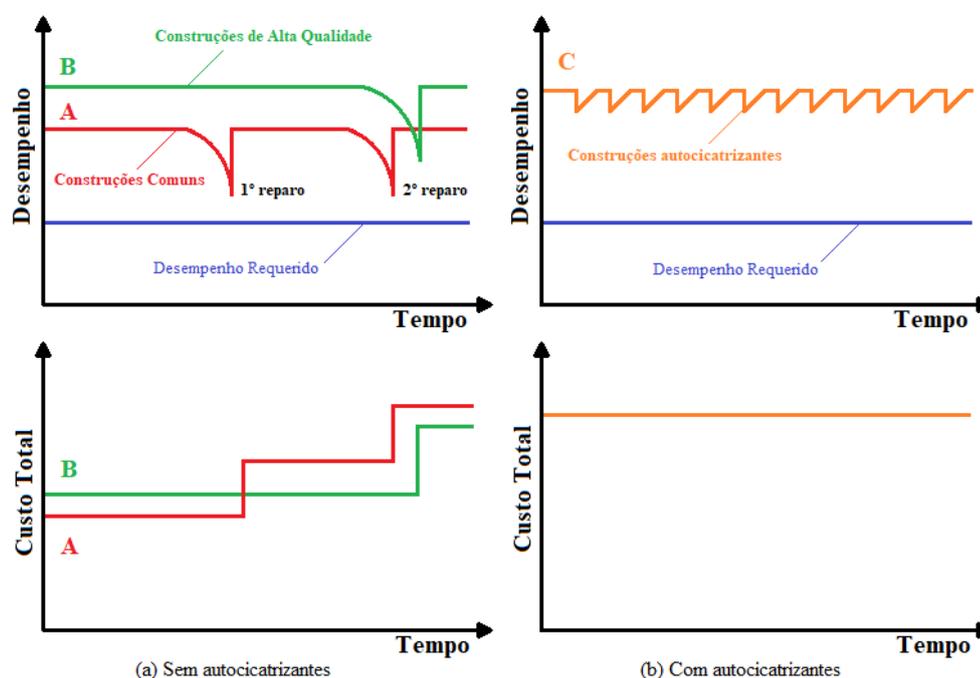
completamente sua formação, o que acaba comprometendo seriamente a segurança das estruturas, permitindo que a entrada de gases, líquidos e outros agentes agressivos cheguem até as armaduras (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Nas últimas décadas, houve uma intensa investigação sobre o conceito de capacidade de autocicatrização em estruturas de concreto, especialmente devido à sua promissora capacidade de tornar obras de infraestrutura mais duráveis e sustentáveis (TANG; KARDANI; CUI, 2015). Para Tan et al. (2015), medidas que incentivassem o processo de cura são implementadas com o propósito de prolongar significativamente a vida útil dessas estruturas. Sendo assim, o fenômeno autocicatrização é o termo utilizado para descrever a habilidade de um material em se regenerar, recuperar ou reparar danos de maneira automática e autônoma, sem depender de intervenção externa. Isso ocorre por meio de mecanismos intrínsecos ao material ou através de elementos e materiais incorporados ao concreto com o propósito específico de promover a autocicatrização. Sendo assim, a autocicatrização é uma combinação de mecanismos químicos e físicos que podem ocorrer devido a diversos elementos, entre eles estão: a formação de carbonato de cálcio, a obstrução das fissuras por impurezas ou partículas soltas de concreto, a hidratação tardia de grãos de cimento não reagidos e até mesmo pela expansão do C-S-H (WU; JOHANNESSON; GEIKER, 2012; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; ESTEVES, 2019).

Segundo De Belie et al. (2018), embora não representem riscos de colapso estrutural, é quase inevitável o surgimento de fissuras com aberturas inferiores à $300\mu\text{m}$ no concreto, o que pode acabar interferindo diretamente na sua funcionalidade, acelerando a sua deterioração, reduzindo sua vida útil e comprometendo sua sustentabilidade.

Para Wang et al. (2014) o processo autocicatrizante representa uma solução bastante promissora a fim de reduzir os custos elevados com manutenção e reparação das infraestruturas de concreto assim como melhorar seu desempenho. Isso fica mais claro nos gráficos apresentados por De Rooij et al. (2013), onde o autor representou os desempenhos e custos com manutenção de estruturas tradicionais, estruturas de alta qualidade e estruturas com material autocicatrizante ao longo do tempo (Figura 4).

Na Figura 4a, a linha A descreve uma degradação gradual de uma estrutura comum ao longo do tempo até que atinja o momento do primeiro reparo, a partir do qual iniciam-se reparos progressivos com intervalos de tempo cada vez menores. Na linha B, considerando uma estrutura de alta qualidade, observa-se um período de tempo maior até atingir o momento do primeiro reparo, o que mostra uma maior durabilidade. Nesse contexto, para o autor se torna compensador o maior investimento inicial a fim de garantir uma maior qualidade, visto que a autocicatrização é capaz de levar a um cenário no qual nenhum custo de manutenção e reparo precisa ser levado em consideração, pois o material tem a capacidade de se autorreparar (Figura 4b), permitindo que ele recupere seu desempenho de forma igual ou próxima ao seu estado inicial, tendo seu custo com reparos praticamente inexistentes.

Figura 4 – Desempenho e custo com manutenção durante a vida útil de estruturas sem (a) e com (b) material autocicatrizante



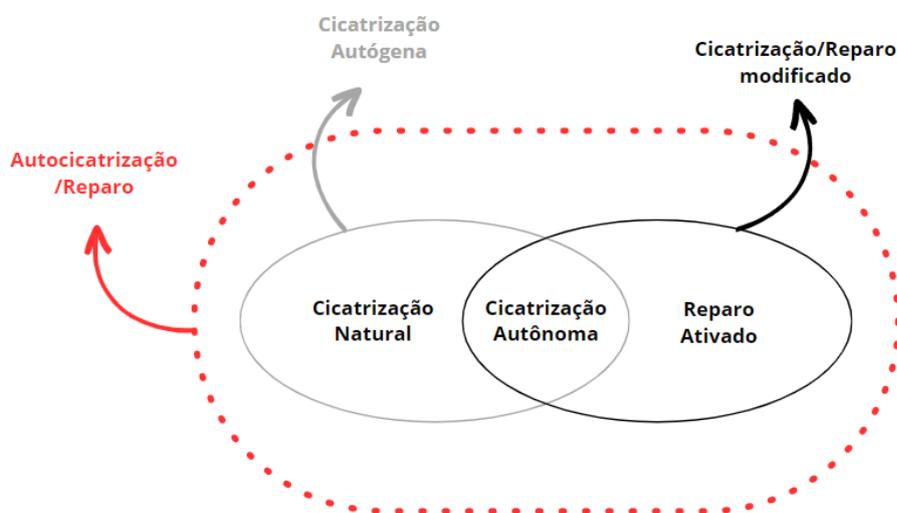
Fonte: Adaptado de De Rooij et al. (2013)

2.2.1 Mecanismos de autocicatrização

Devido a autocicatrização de fissuras ser um assunto relativamente novo e a falta de padronização quanto a terminologia empregada pelos pesquisadores, é compreensível que existam algumas divergências conceituais referentes às definições dos mecanismos de autocicatrização na literatura técnica (OLIVEIRA, 2019). Diante disso, Igarashi, Kunieda e Nishiwaki (2009) classificaram o fenômeno de autocicatrização como: cicatrização natural, cicatrização autônoma e reparação ativa. Os autores, em conjunto com o comitê técnico JCI-TCO75B: *Autogenous Healing in Cementitious Materials*, estabeleceram conceitos mais detalhados, resultando na criação do diagrama de Venn, apresentando os mecanismos e fenômenos relacionados à autocicatrização, conforme ilustrado na Figura 5.

A cicatrização natural (autônoma) ocorre quando as fissuras presentes no material de concreto são naturalmente fechadas, desde que haja um ambiente com presença de umidade, sem que haja qualquer influência externa. A cicatrização autônoma é o processo pelo qual ocorre a reparação de forma autônoma, utilizando-se de materiais distintos daqueles encontrados na composição principal das matrizes de cimento, mas sim por meio da incorporação de materiais específicos com o propósito de potencializar a autocicatrização (DE ROOIJ et al., 2013). Nesse caso, são adicionados alguns materiais ao concreto, como polímeros superabsorventes, fibras, microcápsulas, aditivos cristalizantes e bactérias (CAPPELLESSO, 2018). Por sua vez, o processo de reparo ativado consiste em um mecanismo em que as fissuras presen-

Figura 5 – Classificação dos fenômenos de autocicatrização de fissuras conforme o Diagrama de Venn



Fonte: Adaptado de Igarashi, Kunieda e Nishiwaki (2009)

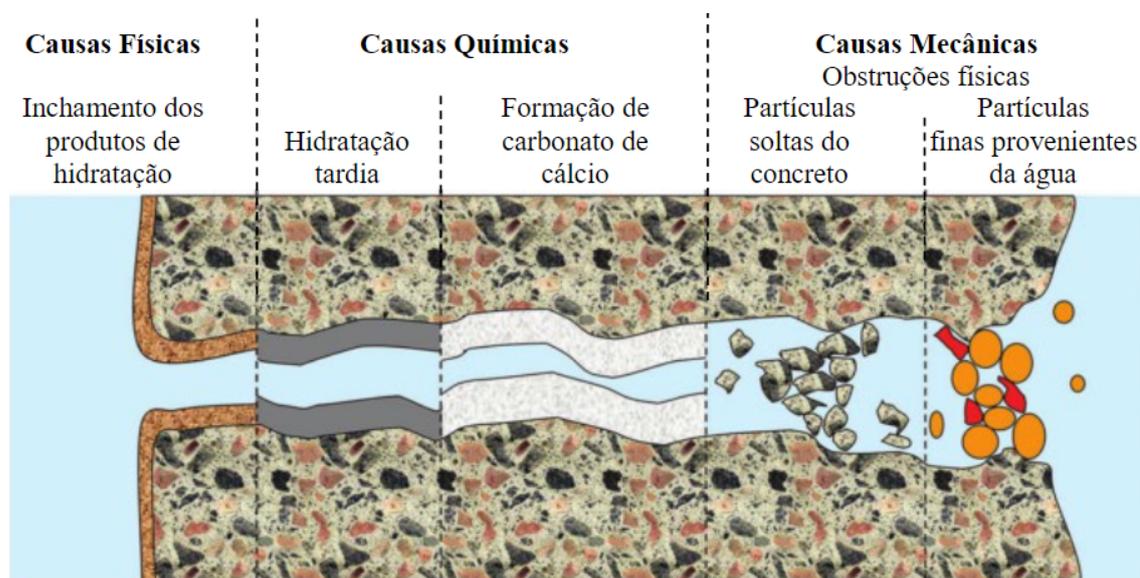
tes no concreto são restauradas por meio da utilização de dispositivos incorporados à matriz com a finalidade de reparar suas fissuras de forma autônoma. Nesse caso, a autocicatrização do concreto pode ser realizada pela introdução de agentes biológicos (bactérias e/ou fungos) no concreto, na qual são ativadas quando em contato com a umidade (REDDY; RAMESH; KUMAR, 2020). Portanto, a cicatrização autógena abrange tanto a cicatrização natural quanto a cicatrização autônoma, sendo que todo o processo de reparação das fissuras no concreto requer a presença de um ambiente com umidade (PETRY, 2021). Entretanto, o comitê técnico 221-SHC:RILEM propõe uma classificação mais simplificada em relação aos fenômenos de cicatrização, dividindo-os em dois grupos principais: cicatrização autógena e cicatrização autônoma (DE ROOIJ et al., 2013). Essa classificação simplificada será detalhada nos itens 2.2.1.1 e 2.2.1.2.

2.2.1.1 Cicatrização autógena

A cicatrização autógena é o processo que resulta no fechamento completo ou parcial das fissuras, podendo ainda apresentar uma restauração da capacidade de carga da estrutura, por meio dos elementos constituintes originais da mistura, sendo fundamental a presença de água (OLIVEIRA, 2019). Em mecanismos autógenos, geralmente a abertura das fissuras fica limitada quanto à cicatrização em cerca de 100-150µm (DE BELIE et al., 2018).

Segundo Zhang et al. (2020) os mecanismos de autocicatrização autógena presentes em materiais à base de cimento podem ser resultado de processos físicos, químicos ou mecânicos. As possíveis causas para a autocicatrização autógena dos materiais estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Possíveis causas da cicatrização autógena de fissuras



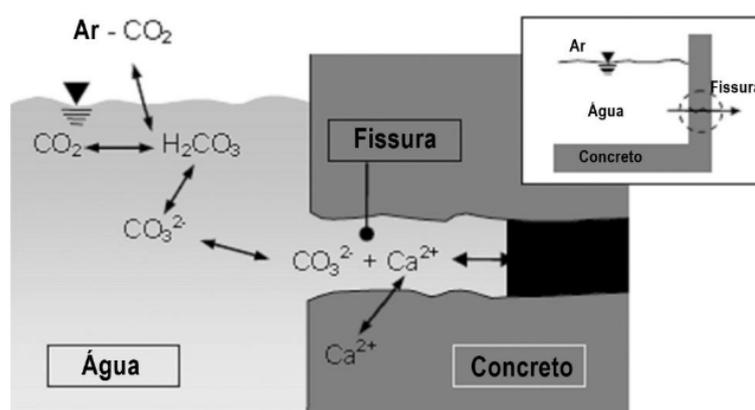
Fonte: De Rooij et al. (2013) adaptado de Li et al. (2018)

De acordo com a Figura 6, a causa física é proveniente do aumento de volume da pasta de cimento hidratada próximas as faces das fissuras, isso ocorre quando a água é absorvida pela pasta, resultando numa redução na entrada de fluídos, quando ocorre a secagem do concreto, a fissura pode acabar aumentando novamente. Na causa química, de acordo com Van Tittelboom e De Belie (2013), a autocicatrização autógena ocorre por meio de dois mecanismos após a ocorrência da fissuração. O primeiro mecanismo envolve a hidratação contínua de componentes anidros com a entrada de umidade, esses produtos de hidratação ocupam cerca do dobro do espaço do grão de cimento original. No entanto, a hidratação contínua não é capaz de realizar uma reparação completa da fissura, exceto em casos de fissuras pequenas (até 0,1mm), onde, combinadas com outros fatores, pode-se obter a autocicatrização. O segundo mecanismo envolve a dissolução dos hidróxidos de cálcio nas regiões próximas às fissuras, seguida pela formação de carbonatos de cálcio por reação com o dióxido de carbono presente na atmosfera. Já para a causa mecânica, existem dois mecanismos que contribuem para a autocicatrização, o acúmulo de partículas presentes na água em regiões fissuradas e de fragmentos devido a fraturas da matriz ou presentes na própria água que percola pelas fissuras (DE ROOIJ et al., 2013).

Segundo relatado por Wu, Johannesson e Geiker (2012) em seu trabalho, os principais produtos formado dentro das fissuras pode estar relacionado principalmente com: a formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), a hidratação tardia dos grãos de anidro do cimento, ou ainda pela expansão da matriz cimentícia dentro da fissura através da expansão do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). No entanto, para quaisquer um dos mecanismos, a presença da água é fundamental para que ocorra o processo de autocicatrização (CAPPELLESSO, 2018).

A precipitação do carbonato de cálcio é o mecanismo de maior contribuição na autocicatrização autóloga de fissuras em materiais cimentícios em idades mais avançadas. Além disso, a precipitação do carbonato de cálcio depende da temperatura, do pH e da concentração dos reagentes (DE ROOIJ et al., 2013). Sua ocorrência pode ser melhor visualizada através da Figura 7.

Figura 7 – Processo de precipitação do carbonato de cálcio na presença de água e CO_2 dissolvido



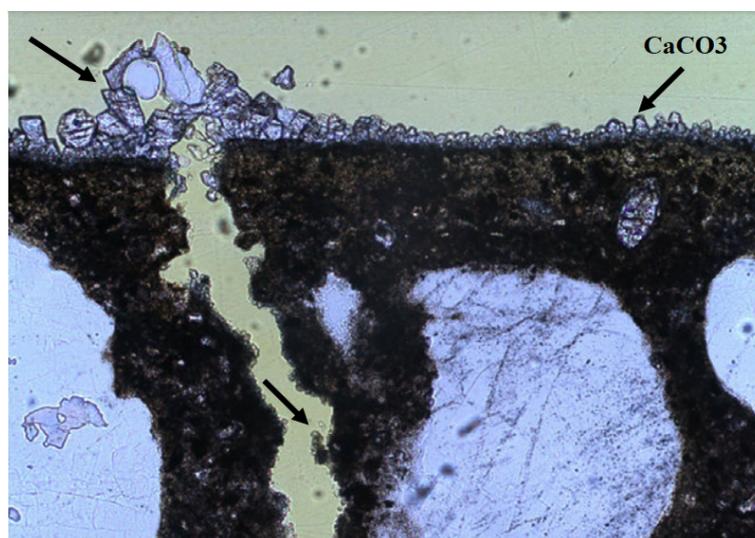
Fonte: Edvardsen (1999) adaptado e traduzido por Lenz (2022)

De acordo com a Figura 7, o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera se dissolve na água (H_2O) formando o ácido carbônico (H_2CO_3) que se separa formando íons hidrogênio (H^+) e íons carbonato (CO_3^{2-}). Os íons carbonato se propagam nas fissuras, encontrando o íon cálcio (Ca^{2+}) do concreto e originando a precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (HUANG et al., 2016). Com isso, a presença de íons cálcio e carbonato na superfície das fissuras é mais concentrada do que em seu interior. Isso leva a uma maior ocorrência de precipitação de carbonato de cálcio na superfície das fissuras em comparação com outras áreas, como mostrado na Figura 8 (SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

A hidratação contínua por sua vez, é o principal mecanismo de autocicatrização em concretos jovens devido ao fato de apresentar um alto teor de partículas de cimento não hidratadas (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016). A hidratação contínua ocorre devido aos grãos anidros presentes na matriz, reagirem ao entrarem em contato com a água que entra pela fissura formada, o que resulta em novos produtos de hidratação ao longo da extensão da fissura (SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

Já a produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), considerado o principal mecanismo de autocicatrização autóloga, é resultante da hidratação do cimento, o qual é conhecido por conferir resistência à pasta de cimento hidratada (ZHONG; YAO, 2008; WU; JOHANNES-SON; GEIKER, 2012; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; VENQUIARUTO, 2017). A produção de C-S-H acontece quando o silicato de tricálcio (C_3S – alita) e silicato dicálcico

Figura 8 – Precipitação de carbonato de cálcio próximo a abertura da fissura e em diferentes locais



Fonte: Adaptado de Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2012)

(C_2S - belita) reagem com a água, formando desta maneira o C-S-H e hidróxido de cálcio (CH - portlandita). É importante notar que o silicato tricálcico possui uma reatividade mais rápida devido à maior quantidade de cálcio disponível para reação. Por essa razão, o C_3S desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da resistência inicial do concreto. Por outro lado, o C_2S apresenta uma reatividade mais lenta, sendo responsável pelo ganho de resistência em idades mais avançadas (LI; YANG, 2007). Sendo assim, torna-se evidente que a idade do concreto no momento da fissura tem um impacto direto na capacidade de ocorrência da cicatrização autógena (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

2.2.1.2 Cicatrização autônoma

A autocicatrização autônoma é caracterizada como um processo de autocura em que componentes de materiais, conhecidos como adições projetadas, são utilizados para promover a recuperação do material, empregando elementos de materiais não convencionais no concreto (REINHARDT et al., 2013).

A cicatrização autônoma refere-se a uma cicatrização involuntária da fissura, formada por materiais que são artificialmente produzidos e inseridos na matriz cimentícia durante sua produção, tais como microcápsulas com bactérias ou polímeros, fibras com agentes adesivos ou aditivos redutores de permeabilidade (TAKAGI, 2013; DE ROOIJ et al., 2013; ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; SILVA, 2016; MOREIRA, 2016; HUANG et al., 2016; VAN BELLEGHEMA; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2018; VAN BELLEGHEM et al., 2018; CAPPELLESSO, 2018; GUZLENA; SAKALE, 2019; SBARDELOTTO, 2022). A cicatrização ocorre por meio do rompimento dessas cápsulas contendo os agentes cicatrizantes

no momento da fissuração, que por sua vez, ao serem liberados reagem com a água, ar e calor (TANG; KARDANI; CUI, 2015).

Ao contrário do mecanismo autógeno, onde o fechamento das fissuras por autocicatrização é limitado a aproximadamente 100-150 μ m, nos mecanismos autônomos a autocicatrização é capaz de reparar fissuras de até 300 μ m e, em certos casos, até mesmo fissuras superiores a 1mm, conforme mencionado por De Belie et al. (2018) em seu estudo.

Segundo Petry (2021), o fenômeno ainda pode ser classificado em dois tipos distintos, dependendo de como ele se inicia. O primeiro é a cicatrização ativa, que ocorre quando há alguma intervenção para estimular a autocicatrização. Um exemplo disso é a utilização de temperatura controlada, que pode acelerar o processo de cicatrização. Já a cicatrização passiva ocorre naturalmente, sem interferência direta do ser humano. Nesse caso, a cicatrização é desencadeada por mecanismos intrínsecos do concreto, sem a necessidade de intervenções externas. Alguns exemplos desse tipo de cicatrização incluem o uso de materiais encapsulados ou sistemas vasculares que promovem a regeneração dos tecidos danificados.

Embora as pesquisas sobre autocicatrização autônoma estejam recebendo mais atenção, a autocicatrização autógena é atualmente mais relevante para aplicações práticas. Isso se deve ao fato de que, ao realizar modificações na matriz cimentícia, é possível potencializar a autocicatrização já presente no concreto. Além disso, essas medidas podem ser implementadas com maior facilidade (CAPPELLESSO, 2018).

2.2.2 Fatores intervenientes na autocicatrização de materiais cimentícios

A capacidade do concreto de recuperar sua resistência e estanqueidade após sofrer danos que resultam em fissuras é influenciada por diversos fatores, entre eles destacam-se composição do concreto, relação a/c, tipo de cimento, teor de agregado. Além disso, o grau do dano e a idade do concreto quando ocorreu a primeira fissura, as condições de umidade relativa para a autocicatrização do concreto, o período e o tipo de cura, entre outros (ZHONG; YAO, 2008).

Para que o concreto possa se autocicatrizado, é fundamental que existam grãos de cimento não hidratados disponíveis. Esses grãos têm a capacidade de se reidratar e preencher as fissuras com os hidratos formados. Além disso, a presença de água é um requisito fundamental para viabilizar a reação de hidratação dos cimentos remanescentes (LI; YANG, 2007; YANG et al., 2009).

Para De Rooij et al. (2013), a autocicatrização em matrizes cimentícias é influenciada por diversos fatores, que abrangem desde a composição do concreto e a presença de água, até as características das fissuras, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores intervenientes no fenômeno de autociatização

Concreto	Água	Fissura
Tipo de cimento	Pressão	Abertura
Tipo de adição	Gradiente de pressão	Profundidade
Tipo de agregado	Dureza	Geometria
Idade	pH	Fissura ramificada
	Temperatura	Aglomerados de fissuras

Fonte: Adaptado de De Rooij et al. (2013)

Diante do exposto alguns desses fatores serão descritos a seguir para melhor compreensão do estudo desenvolvido.

2.2.2.1 Influência da relação água/cimento

A relação água/cimento tem uma ligação direta com as características do concreto, especialmente em relação à resistência mecânica, porosidade e durabilidade. Além disso, ela também influencia a disponibilidade de grãos de cimento não hidratados e o grau de hidratação das matrizes cimentícia (PETRY, 2021).

De acordo com Neville (2016), a relação mínima água/cimento necessária para a hidratação completa da matriz cimentícia quando curada em água é de aproximadamente 0,36. No entanto, quando a cura é realizada sem contato com água externa, a relação água/cimento deve ser maior que 0,36 para que ocorra a hidratação completa da matriz. O autor afirma que relações menores, resultam na falta de espaço para acomodação dos produtos de hidratação.

Para Mehta e Monteiro (2014), quando as relações água/cimento são reduzidas, a resistência dos concretos aumenta, resultando em abertura das fissuras de forma frágil, ou seja, sem apresentar deformações plásticas significativas. Nessas situações, há uma maior probabilidade de que grãos de cimento não hidratados permaneçam na matriz cimentícia devido à baixa disponibilidade de água para sua completa hidratação. Portanto, esses materiais tendem a contribuir para a capacidade de autociatização da matriz quando entram em contato com a água, por meio da hidratação tardia e da formação de fissuras (OLIVEIRA, 2019).

Por outro lado, em matrizes cimentícias com relações água/cimento mais elevadas, a hidratação contínua e tardia é prejudicada devido à maior disponibilidade de água na mistura. Isso, por sua vez, favorece a hidratação de todo ou da maior parte do aglomerante não hidratado (ZIEGLER, 2020).

Sendo assim, é fundamental que haja grãos de cimento não hidratados disponíveis para que ocorra a autociatização autógena do concreto. Esses grãos têm a capacidade de se hidratar e preencher as fissuras com os produtos resultantes. Além disso, a presença de água é uma condição básica para permitir a reação de hidratação dos grãos de cimento restantes (LI; YANG, 2007; YANG et al., 2009).

2.2.2.2 Influência do tipo de cimento

No estudo realizado por Ter Heide e Schlangen (2007) foi comparada a autocicatrização de concretos produzidos com cimento Portland de endurecimento rápido e cimento Portland com escória de alto forno de endurecimento lento. O concreto com cimento de endurecimento rápido demonstrou na idade de 1 dia uma resistência significativamente maior em comparação ao concreto com cimento de escória de alto forno. Após o processo de autocicatrização, na idade de 15 dias, ambos os concretos apresentaram recuperação da resistência à flexão, porém, o concreto com cimento Portland de endurecimento rápido exibiu um ganho notável de resistência, provavelmente devido à sua maior quantidade de grãos anidros de cimento. Sendo assim, segundo os autores, o resultado pode estar associado ao fato do concreto produzido com este tipo de cimento apresentar maior quantidade de grãos anidros e, conseqüentemente, maior potencial para autocicatrização das fissuras.

Hung e Su (2016) estudaram sobre a avaliação da autocura de compósitos cimentícios com adições minerais, nas idades de 7, 28 e 90 dias. Os resultados obtidos demonstraram que as misturas com maiores volumes de cinzas volantes apresentaram um potencial mais elevado de autocura a médio prazo quando submetidas à cura submersa em água. Segundo os autores, os principais componentes presentes na precipitação foram $CaCO_3$ e $C - S - H$. De forma específica, a proporção de $C - S - H$ no produto de autocura aumentou em conjunto com a quantidade de cinzas volantes e a duração da exposição à água, conforme observado pelos autores.

2.2.2.3 Influência do tipo de cura em diferentes ambientes de exposição

A autocicatrização autógena dos concretos fissurados é grandemente influenciada pelas condições ambientais em que estão expostos. Esse fenômeno depende essencialmente da presença de água, que desempenha um papel crucial ao iniciar as reações físico-químicas responsáveis pelo processo de cristalização e fechamento das fissuras (TER HEIDE; SCHLANGEN, 2007; ZIEGLER, 2020).

Sendo assim, Abdel-Jawad e Haddad (1992) conduziram um estudo sobre o impacto do pré-carregamento por compressão axial (60%, 75%, 90% e 100% da carga de ruptura) nas idades de 8, 16, 24 e 72 horas, em concretos com relação a/c de 0,50 e 0,70. Para as análises das propriedades de autocicatrização foram consideradas duas condições de cura (imersão em água e cura seca, em laboratório) e a autocicatrização das fissuras foi verificada através dos ensaios de velocidade de onda ultrassônica. Os autores constataram que os níveis de carregamento de até 90% da carga de ruptura, aplicados após a idade de 8 horas, não apresentaram influência na resistência à compressão dos concretos. Além disso, observaram que a cura por imersão em água foi essencial para o restabelecimento da resistência em corpos de prova submetidos às condições de cicatrização. Após o período de cura, ao realizarem novos testes nos concretos, constataram que a cicatrização dos mesmos não resultou no restabelecimento total da resistência

à compressão.

Ter Heide e Schlangen (2007) estudaram o efeito da autocicatrização de fissuras em concretos com cimento de endurecimento rápido e lento, utilizando cura em ambiente com UR variando entre 60% e 95% e também em cura submersa em água durante um período de 25 dias. Como resultado, apenas os corpos de prova armazenados em cura submersa em água apresentaram recuperação total de suas capacidades resistentes, enquanto que os armazenados em ambientes com UR de 60% e 95% apresentaram quase nenhum aumento de resistência.

Yang et al. (2009) realizaram uma análise da autocicatrização em compósitos cimentícios reforçados com fibras, nos quais as amostras foram submersas em água a 20°C durante 24 horas, seguidas por um processo de secagem. A secagem foi realizada durante um período com duas temperaturas: a primeira a $21 \pm 1^\circ\text{C}$, simulando dias chuvosos e nublados, e a segunda em estufa a 55°C, simulando dias chuvosos e ensolarados com altas temperaturas. Nesse estudo, os autores observaram uma redução no fenômeno de autocicatrização nos ciclos de secagem que foram submetidos a temperaturas elevadas.

Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013) investigaram a recuperação de concretos com aditivos cristalizantes em diferentes ambientes de exposição. Concluíram que a realização de ciclos de 12 horas, com 12 horas de molhagem seguidas por 12 horas de secagem, proporcionou uma avaliação mais favorável. Os autores descreveram uma ordem de eficácia dos ambientes da seguinte forma: o primeiro ciclo de molhagem/secagem foi o mais eficaz, seguido pela imersão em água sem troca regular, em terceiro lugar a imersão em água com trocas regulares, e por último, a exposição ao ar.

Ferrara, Krelani e Carsana (2014) realizaram estudos para analisar a cura de concretos expostos a diferentes condições ambientais. Essas condições incluíram exposição ao ar com uma umidade relativa (UR) de 20% e 95%, ciclos controlados com variações de temperatura e umidade relativa de 95%, além de concretos submersos em água. Os resultados confirmaram que as fissuras reparadas em ambientes de submersão na água foram mais efetivamente autocicatrizadas. No entanto, os autores também observaram que a presença de aditivos cristalizantes no concreto teve um grande impacto na contribuição para a autocicatrização de fissuras com até 0,2mm, mesmo em condições desfavoráveis para a ocorrência desse fenômeno.

Roig-Flores et al. (2015) avaliaram o efeito de autocicatrização de concretos com adição cristalina em diferentes tipos de exposição ambiental: submerso em água; contato com água; câmara úmida (20°C e $95\% \pm 5\%$ de UR) e exposição a temperatura ambiente (17°C e 40% de UR). As amostras cilíndricas foram pré-fissuradas na idade de 2 dias, e o tempo analisado para obtenção da cicatrização foi de 42 dias. Foram realizados testes de permeabilidade e análise óptica para verificação da cicatrização. Como resultado, os autores concluíram que as amostras imersas em água e em contato com a água foram as que obtiveram as taxas de cicatrização mais elevadas, sendo a melhor cicatrização observadas para as amostras imersas em água. Os autores concluíram que a presença de água é extremamente necessária para a ocorrência do processo de autocicatrização.

No ano de 2016, Roig-Flores et al. (2016) estudaram a auto cura em concretos com adição cristalina (4% do peso de cimento) para análise das propriedades de autocicatrização. Os autores realizaram testes de auto cura por meio do ensaio de permeabilidade a água das amostras microfissuradas. Foram analisados concretos de resistência normal e de alto desempenho em três condições de cura: imersão em água em duas temperaturas distintas (15°C e 30°C) e cura através de ciclos de molhagem e secagem. As amostras foram pré-fissuradas na idade de 2 dias, e o tempo para obtenção da cicatrização foi de 42 dias. Os resultados dos testes de permeabilidade à água revelaram uma capacidade de cicatrização quase perfeita para as amostras curadas em água a 30°C, superando as amostras curadas em água a 15°C. Para as amostras expostas ao processo de cura que envolvia ciclos de molhagem e secagem, a capacidade de cicatrização foi considerada insuficiente pelos autores.

De acordo com o estudo realizado por Guzlena e Sakale (2019), a autocicatrização utilizando aditivos cristalizantes resulta em uma reparação de fissuras mais rápida e de melhor qualidade quando as amostras são curadas por imersão em água.

No estudo conduzido por Cuenca e Serna (2021), foi realizada uma avaliação da capacidade de autocicatrização autógena em concretos reforçados com fibra em quatro diferentes ambientes de exposição: câmara úmida (mantida a uma temperatura constante de 20°C e 100% de UR), imersão em água (à temperatura de 25°C), imersão em água do mar artificial e cura térmica (com dois dias de imersão em água a 90°C seguidos por 28 dias em câmara úmida a 20°C e 100% de UR). Os concretos utilizados foram produzidos com uma relação água/cimento de 0,2. Fissuras foram geradas nos corpos de prova após dois dias de cura e foram avaliadas microfissuras na faixa de 10 a 20 micrômetros e macrofissuras de até 0,4mm. Os resultados mostraram que as taxas mais elevadas de autocicatrização foram observadas nas seguintes condições, em ordem decrescente: cura úmida, imersão em água do mar, imersão em água e cura térmica.

Com base nas informações apresentadas, nota-se que a autocicatrização é iniciada principalmente pela presença da água. No entanto, o fenômeno é intensificado pela alternância entre as condições de cura, ou seja, pelos ciclos de molhagem e secagem do concreto (ZIEGLER, 2020).

2.2.2.4 Influência da idade de pré-carregamento

A idade de pré-carregamento ou idade de abertura de fissura tem influência na capacidade de autocicatrização, uma vez que em idades mais precoces, os materiais cimentícios possuem um maior potencial de autocicatrização devido à uma maior quantidade de cimento não hidratado na matriz (YANG; YANG; LI, 2012). Por outro lado, em idades mais avançadas, ocorre uma maior hidratação na matriz cimentícia, resultando em menor quantidade de material disponível para contribuir com a autocicatrização das fissuras. Além disso, concretos com idades mais avançadas tendem a ter uma quantidade menor de vazios capilares devido ao progresso das reações de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Contudo, é essencial ressaltar

que o excedente de aglomerante anidro disponível não é determinado apenas pela idade em que as fissuras são abertas, mas também pela quantidade de água disponível para a hidratação. A relação água/cimento desempenha um papel significativo na quantidade de aglomerante anidro restante na matriz cimentícia (CAPPELLESSO, 2018).

Ter Heide e Schlangen (2007) observaram de forma evidente que há uma diminuição na recuperação da resistência em concretos pré-fissurados em idades mais avançadas, em comparação com os pré-fissurados em idades mais precoces.

Como mencionado no item 2.2.2.3, os resultados obtidos por Abdel-Jawad e Haddad (1992) demonstraram que carregamentos de até 90% da carga de ruptura, com idade superior a 8 horas, não afetaram o desenvolvimento da resistência dos concretos, independentemente das relações a/c utilizadas para a sua produção. No entanto, para os carregamentos aplicados na idade de 8 horas, os autores observaram uma perda de resistência à compressão na faixa de 5 a 12%, enquanto que para os concretos carregados em 100% de sua capacidade, a perda de resistência foi mínima quando o carregamento ocorreu na idade de 24 horas. Além disso, Abdel-Jawad e Haddad (1992) observaram uma maior recuperação de resistência para os concretos com uma relação a/c de 0,70.

No entanto, carregando as amostras para 100% de suas capacidade, resultou em efeito significativo no desenvolvimento de força subsequente. Uma perda de resistência de cerca de 50 por cento foi obtida em alguns casos, dependendo em diferentes fatores. Esses fatores são os seguintes: idade do concreto em tempo de carregamento, resistência do concreto, condições de cura e idade no momento da abertura.

Banthia, Biparva e Mindess (2005) concluíram em sua pesquisa que a aplicação de cargas em concretos em estágios iniciais, como 1 e 3 dias (quando o concreto ainda não desenvolveu resistência significativa), tende a aumentar a permeabilidade. De acordo com os autores, a aplicação precoce de carga, pode aumentar consideravelmente a permeabilidade das estruturas em serviço e afetar sua durabilidade. Entretanto, permanecem sem resposta as questões sobre qual nível de estresse é considerado aceitável e a partir de qual idade pode ser aplicado em concretos.

Pesquisas realizadas por Hung e Su (2016) demonstraram que compósitos cimentícios em estágios iniciais têm o potencial de alcançar uma autocura eficaz quando submetidos a um processo de microfissuração. Em contrapartida, alguns autores como Gagné e Argouges (2011) concluíram que a idade das amostras (argamassas) no momento da fissuração (28 dias e 6 meses) teve um papel secundário no processo de autocura (self-healing) das microfissuras.

2.2.2.5 Influência da abertura de fissura

O controle da abertura de uma fissura no concreto é um dos parâmetros para a eficiência da autocicatrização autógena (ZIEGLER, 2020). De acordo com Ter Heide e Schlangen (2007), quanto menor for a espessura da fissura, maiores serão as probabilidades de ocorrência da autocicatrização. No entanto, a influência dos diferentes fatores relacionados à capacidade

de autocicatrização de uma matriz cimentícia, juntamente com as várias configurações possíveis de fissuras, torna difícil estabelecer um consenso sobre a largura máxima que pode ser efetivamente cicatrizada (DE ROOIJ et al., 2013).

Segundo Neville (2016), a menor abertura visível a olho nu de uma fissura é aproximadamente 0,13mm. Essas fissuras são naturalmente preenchidas pelo próprio concreto devido à lixiviação do hidróxido de cálcio da matriz cimentícia e à sua precipitação quando entra em contato com o carbono presente na atmosfera.

Com o objetivo de garantir a durabilidade das estruturas de concreto em relação à sua fissuração, a NBR 6118 ABNT (2014) estabelece alguns requisitos mínimos para a abertura máxima característica da fissura, que devem ser considerados durante a fase de projeto, levando em conta a classe de agressividade do ambiente de exposição e o tipo de concreto utilizado, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Requisitos de fissuração em relação às classes de agressividade ambiental relacionadas a durabilidade

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto Simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto Armado	CAA I	ELS-W wk ≤ 0,4mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W wk ≤ 0,3mm	
	CAA IV	ELS-W wk ≤ 0,2mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W wk ≤ 0,2mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D	Combinação frequente

NOTAS:

ELS-F: Estado limite de formação de fissuras

ELS-W: Estado limite de abertura de fissuras

ELS-D: Estado limite de descompressão

Fonte: ABNT (2014)

Algumas pesquisas a respeito de como a espessura da abertura de fissuras influencia na autocicatrização de materiais cimentícios já foram realizadas. Li e Yang (2007) constataram em seus estudos que a autocura ocorre de forma mais efetiva em materiais cimentícios quando as microfissuras possuem largura inferior a 150µm. De acordo com os autores, o desempenho mais satisfatório de autocura é alcançado quando as aberturas das microfissuras são menores que 50µm.

No estudo realizado por Van Tittelboom e De Belie (2013), as autoras destacam que a abertura máxima da fissura que pode ser fechada por meio da autocicatrização autógena em materiais cimentícios varia de acordo com diferentes autores, situando-se entre 0,005mm e

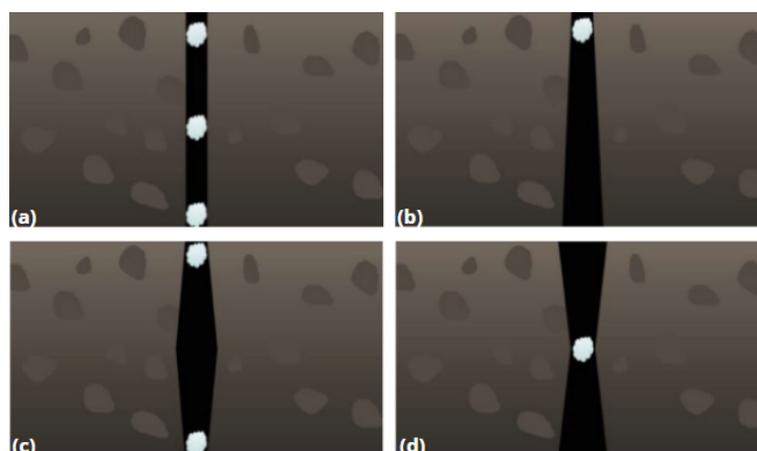
0,3mm. Contudo, de forma geral, o fenômeno mostra-se mais eficaz em fissuras de menor abertura.

Palin, Wiktor e Jonkers (2015) concluíram em seu estudo, que fissuras com espessura de até 0,408mm, quando curadas submersas, apresentam total autocicatrização quando se utiliza cimento composto por escória de alto forno. Por outro lado, para cimentos puros, as fissuras são fechadas apenas para espessuras de até 0,168mm.

Cuenca, Tejedor e Ferrara (2018) avaliaram a capacidade de autocicatrização autógena em concretos reforçados com fibras e contendo aditivos cristalizantes, em relação a três grupos de fissuras: grandes ($>0,30\text{mm}$), médias ($0,30$ a $0,15\text{mm}$) e pequenas ($<0,15\text{mm}$). O estudo foi realizado por meio de repetidos ciclos de fissuração e três diferentes condições de cura. Como resultado, os autores confirmaram que a autocicatrização autógena com aditivos cristalizantes é mais significativa em fissuras, com até $0,15\text{mm}$ de abertura.

A abertura das fissuras desempenha um papel importante na eficiência das taxas de autocicatrização, porém, na maioria dos estudos, essa medida é avaliada somente na superfície das amostras, o que é um aspecto importante a ser considerado (ZIEGLER, 2020). Sendo assim, Roig-Flores et al. (2015) verificou que a geometria interna de uma fissura pode ser responsável pela maior eficiência da autocicatrização, uma vez que em trechos com fissuras mais estreitas tendem a desenvolver produtos de autocicatrização mais rápidos do que pontos com aberturas maiores. Na Figura 9, os autores apresentam algumas das possíveis geometrias internas de uma fissura no concreto, mostrando que os pontos mais estreitos tendem a desencadear o início da autocicatrização, o que pode acabar não correspondendo com o observado nas superfícies das fissuras.

Figura 9 – Possíveis geometrias internas de fissuras (a) fissura uniforme (b) fissura piramidal (c) fissura convexa (d) fissura côncava



Fonte: Roig-Flores et al. (2015)

2.2.3 Aditivos cristalizantes

O Instituto de Concreto Americano (ACI, 2010) classifica os aditivos cristalizantes (CAs) como Aditivos Redutores de Permeabilidade para condições de Pressão Hidrostática (PRAH).

No mercado da construção civil, diversos materiais denominados aditivos cristalizantes são disponibilizados, cujas composições químicas são mantidas em segredo por seus fabricantes (ZIEGLER, 2020). Segundo Pazderka e Hájková (2016), Ferrara, Krelani e Moretti (2016), Zizkova et al. (2018), Guzlena e Sakale (2019), a composição química dos CAs é formada por cimento Portland, fillers, pozolanas, escórias, areias, pó silicosos e "produtos químicos ativos". Essa tecnologia já vem sendo utilizada nas últimas duas décadas na indústria da construção, porém o número de pesquisas relacionadas ao assunto ainda é limitada (AZARSA; GUPTA; BIPARVA, 2018).

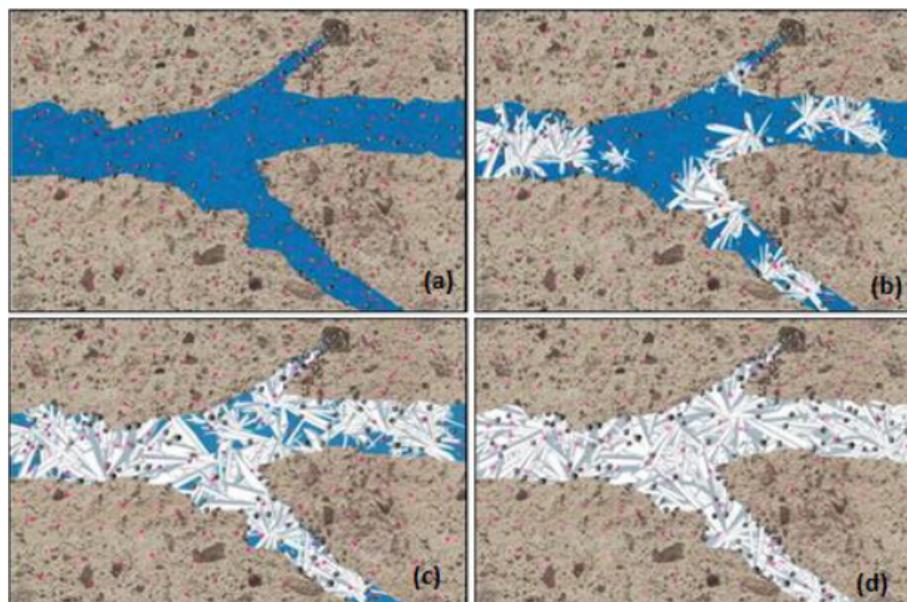
De acordo com Ourives, Bilesky e Yokoyoma (2009), o processo de cristalização ocorre por meio da reação dos compostos químicos ativos com a umidade presente no concreto fresco, bem como no interior dos poros e fissuras em conjunto com os produtos resultantes da hidratação do cimento, tais como hidróxido de cálcio, alumínio, óxidos metálicos e sais. Essa reação resulta na formação de uma estrutura cristalina insolúvel, que preenche os poros e capilares do concreto, conferindo uma vedação permanente contra a penetração de água e agentes agressivos presentes na atmosfera. Contudo, essa estrutura cristalina permite a passagem de vapor d'água, evitando assim o acúmulo de pressão dentro do concreto.

A Figura 10 mostra o mecanismo de ação do aditivo cristalizante representado por Alpes (2019), onde na situação (a) o autor representa o poro ou fissura contendo umidade. Na imagem (b) são observados os produtos de hidratação do cimento e dos compostos químicos ativos do aditivo cristalizante. Na sequência, situação (c), está representado o início da formação de cristais a partir da reação dos compostos químicos ativos com a umidade e os produtos de hidratação. Por fim, na situação (d) é representada a evolução da formação dos cristais e o selamento total da fissura ou poro pelo processo de cristalização.

O processo de cristalização permanece em estado inativo na ausência de água. Dessa maneira, quando novas fissuras surgem durante a utilização da estrutura, ocorre uma retomada da formação de cristais no interior dessas fissuras, impedindo a criação de novos caminhos para a passagem de água. Essa capacidade de selar fissuras é conhecida como autocicatrização e desempenha um papel crucial na eficiência da impermeabilização por cristalização, uma vez que proporciona um processo contínuo de redução da permeabilidade ao longo da vida útil da estrutura (ALPES, 2019).

Para Takagi (2013), os cristalizantes têm se mostrado extremamente úteis para reparos em concretos localizados em áreas de difícil acesso, onde a manutenção é mais restrita como lajes de subpressão, tomadas d'água de barragens, túneis, pontes e até mesmo nas instalações de resíduos nucleares. No mercado da construção civil, os CAs já são bastante comercializado, porém suas composições químicas são mantidas em segredos pelos fabricantes. Os CAs podem

Figura 10 – Processo de formação de cristais no interior das fissuras



Fonte: Alpes (2019)

ser incorporados durante o processo de fabricação do concreto, ou até mesmo como pinturas de impregnação em estruturas já acabadas (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014).

2.2.4 Estudo de casos – autocicatrização com aditivos cristalizantes

Nesta seção é realizado um levantamento de diversos estudos científicos que exploraram a autocicatrização de materiais cimentícios com o uso de aditivos cristalizantes, bem como os resultados obtidos pelos respectivos pesquisadores.

Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2012) estudaram o potencial de autorreparação de materiais à base de cimento com aditivo expansivo (CSA) e aditivo cristalizante (CA). Foram usados corpos de prova (CPs) de argamassa com cimento Portland comum CEM I 42,5N. Os CPs foram pré-fissurados aos 28 dias de idade buscando causar uma fissura superficial com largura entre 100 e 400 μ m. Após, os espécimes foram levados para cura submersa em água para criar um processo de autocura. Seguindo as recomendações dos fabricantes, as dosagens de CA e CSAs utilizados foram de 1,5% e 10%, respectivamente. Como resultado, o autor verificou que os usos de CSA e CA como aditivos são benéficos com relação ao fenômeno de fechamento de fissuras superficiais, tendo a capacidade de selar totalmente as fissuras superficiais de 250 a 400 μ m de abertura em 28 dias.

Takagi (2013) constatou por meio de revisões bibliográficas que as fissuras no concreto desempenham um papel crucial no processo de ativação do aditivo cristalizante. Essas fissuras permitem a entrada de água e a exposição de novas superfícies onde há presença de escórias não ativadas e cimentos sub-hidratados. Sendo assim, o catalisador cristalino, quando em con-

tato com a água presente nas fissuras, favorece a formação de produtos hidratados nas faces das fissuras. Esse processo é impulsionado pelo aumento da alcalinidade da água, promovendo a hidratação do concreto nas regiões danificadas, contribuindo para a reparação das fissuras. Com base nessas informações, o autor conduziu sua pesquisa na qual apresentava como objetivo analisar o efeito do catalisador cristalino em concretos com diferentes tipos de cimentos (CP III - RS, CP II-E e CP V ARI), escória de alto forno (55%, 34% e 0% em relação ao peso de cimento), adição de catalisador cristalino (2,5% do peso de cimento) e fibras de vidro. A pré-fissuração foi realizada com 90% da carga de ruptura, em amostras cilíndricas 100x200mm, por meio do ensaio de compressão axial, a fim de ocasionar fissuras internas. Após, os concretos foram curados submersos em água com o objetivo de impulsionar a autocicatrização. Por fim, nas idades de 28, 56 e 84 dias, após a cura, os concretos foram ensaiados quanto às propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e velocidade de propagação de ultrassom) e estanqueidade (absorção por capilaridade e difusão de íons de cloreto). Os resultados obtidos permitiram que o autor concluísse que concretos produzidos com os cimentos CP III - RS, CP V ARI e CP II-E, nessa ordem, apresentaram melhores resultados tanto na recuperação das propriedades mecânicas quanto na estanqueidade. Assim como as misturas contendo os cimentos CP III - RS e CP II-E apresentaram uma autocicatrização mais lenta nas primeiras idades nos corpos de prova que continham escória de alto forno, quando comparados com o CP V.

Ferrara, Krelani e Carsana (2014) avaliaram a autocura autógena de concretos comuns, com e sem aditivos cristalizantes, em concretos. Foram conduzidos ensaios de flexão em 3 pontos para avaliar os efeitos dos fenômenos de autocura na recuperação da rigidez e capacidade de carga. Esses ensaios foram realizados em duas etapas: até a abertura controlada da fissura, e até a ruptura. Foram considerados nesse estudo, diferentes condições de exposição, incluindo imersão em água, exposição ao ar e ciclos de temperatura acelerados. Adicionalmente, foram realizados testes de velocidade de pulso ultrassônico e observações microestruturais. Essas análises permitiram obter informações sobre a propagação da onda ultrassônica no material e examinar a estrutura interna do concreto. Com base nos resultados obtidos, tanto em ambientes sob imersão em água quanto em exposição ao ar, a presença de aditivos cristalizantes foi altamente eficaz para efeito de autocura e na recuperação da rigidez e capacidade de carga. Nesse caso a presença de aditivo cristalizante acelerou o processo de cura da fissura e a recuperação relacionada as propriedades mecânicas. Já no caso de ambientes com ciclos de temperatura acelerado, foi possível encontrar resultados semelhantes aos de condições naturais, porém, segundo os autores, devido a dispersão de dados não foi possível uma conclusão definitiva quanto ao processo de autocicatrização.

Roig-Flores et al. (2015) realizaram uma análise dos efeitos autocicatrizantes de uma mistura cristalina em quatro tipos de exposição ambiental comparando com um concreto de referência. A cicatrização foi estudada por meio de testes de permeabilidade em corpos de prova fissurados. O fechamento das fissuras foi observado por meio do microscópio óptico e quantificado por meio de parâmetros geométricos da trinca. As aberturas de fissuras foram fixa-

das com tamanhos inferiores a 300µm, sendo a idade de pré-fissuração de 2 dias. As amostras foram analisadas durante um tempo de cicatrização previsto de 42 dias. Como variáveis de estudo foram empregadas duas dosagens de aditivo cristalizante (CA): 0% para os corpos de prova de controle (referência) e 4% para os corpos de prova com aditivo cristalizante, ambos em relação ao peso do cimento. As amostras foram submetidas a quatro diferentes tipos de exposição à autocura: imersão em água, contato com água, câmara de umidade e exposição ao ar. Como resultado, os autores constataram que o processo de autocura ocorreu tanto na mistura de referência quanto naquelas compostas por aditivos cristalizantes, entretanto, o processo de autocicatrização apresentou um comportamento de cicatrização diferente dependendo da exposição à autocura e da presença de aditivo cristalizante. Também foi constatado que a maior taxa de autocura foi encontrada em amostras com aditivo cristalizante e em ambientes de imersão em água (com aproximadamente 95%), seguidas pelas amostras que tiveram contato direto com a água quando comparadas com as amostras submetidas a exposição ao ar. Por fim, os autores confirmam a necessidade da presença de água para a ocorrência da reação de autocura.

Roig-Flores et al. (2016) analisaram as propriedades de autocura de concretos pré-fissurados em idade iniciais (classes C30/37 e C45/55), produzidos com uma mistura cristalina (4% em relação ao peso de cimento), medindo a permeabilidade de amostras fissuradas e sua largura de fissura. Após a pré-fissuração na idade de 2 dias com largura de fissura entre 0,10–0,40mm, as amostras foram analisadas durante um tempo de cicatrização previsto de 42 dias sob três diferentes tipos de cura: imersão em água a 15°C e 30°C, e por meio de ciclos de umedecimento e secagem. Como técnicas de avaliação, após o período de cura foram analisadas a permeabilidade e a espessura das trincas nos corpos de prova. Como resultado, os autores observaram uma capacidade de cicatrização excelente para espécimes curados com imersão em água a 30°C, seguido pelos espécimes curados sob água a 15°C, no entanto, os resultados não foram satisfatórios para a condição de cura pelo método de umedecimento e secagem. Além disso, os autores enfatizaram a importância de empregar pelo menos dois parâmetros na avaliação da autocura em concretos, a fim de obter uma análise mais precisa.

Cuenca, Tejedor e Ferrara (2018) realizaram uma análise da capacidade de autocicatrização autógena de concretos reforçados com fibras de aço, com e sem aditivos cristalizantes, sujeitos a ciclos repetidos de fissuração e três diferentes condições de exposição durante o processo de cura: imersão em água, exposição ao ar livre e ciclos úmido/seco. Os espécimes foram produzidos com cimento Portland CP II-42,5 e uma dosagem de aditivo cristalizante de 0,8%. Inicialmente, os corpos de prova foram fissurados por meio de um teste de tração indireta até atingirem uma abertura de fissura de 0,25mm e, em seguida, foram submetidos às diferentes condições de exposição por 1, 3 e 6 meses. Ao final de cada período, os corpos de prova foram fissurados novamente e expostos às diferentes condições por mais 1 ou 2 meses, repetindo-se o processo de fissuração e cicatrização ao longo de um ano. O fechamento das fissuras foi analisado utilizando métodos de processamento de imagem. Os resultados mostraram que, para o mesmo período de cicatrização, os corpos de prova imersos em água apresentaram os maio-

res fechamentos das fissuras. Além disso, observou-se que a adição de aditivos cristalizantes favoreceu a capacidade de autocura em longo prazo sob repetidos eventos de fissuração e cicatrização.

Bianchin (2018) estudou a autocicatrização em concretos fissurados nas primeiras idades com a utilização de aditivos cristalizantes, visando comparar o fechamento de fissuras com concretos convencionais (sem aditivo cristalizante). Para isso, foram produzidas amostras com cimento Portland CP IV - 32) e diferentes relações de água/cimento (0,43, 0,50 e 0,66) com e sem o uso de aditivo cristalizante. As amostras foram submetidas a pré-carregamento aos 7 dias e curadas por imersão em água a uma temperatura constante (variação de $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Algumas amostras foram mantidas sem nenhum carregamento para serem usadas como amostras de referência. Após, os concretos foram avaliados aos 28 e 56 dias em relação às propriedades mecânicas (resistência à compressão axial) e de durabilidade (penetração de íons cloretos). Os resultados indicaram que os concretos com relação a/c de 0,43 apresentaram um aumento no desempenho mecânico quando fissurados, não sendo encontrada diferença estatística significativa nos outros traços. Quando os concretos fissurados foram incorporados com aditivos cristalizantes, observou-se um aumento mais significativo na resistência à compressão axial. Porém, em termos de durabilidade, verificou-se um aumento na penetração de íons cloreto, o que segundo o autor tem relação com as cargas aplicadas aos concretos e concluiu que não foram observados resultados expressivos em relação ao uso de aditivos cristalizantes para a durabilidade.

Alpes (2019) avaliou o desempenho do método de impermeabilização por cristalização do concreto, utilizando aditivo cristalizante incorporado em concretos produzidos com materiais disponíveis na região de Goiânia. Nesse estudo foi utilizado o cimento Portland CP II-F-40, aditivo cristalizante (0,8% em relação ao peso de cimento) e uma relação a/c fixa de 0,42. As amostras foram mantidas em cura submersa até os 21 dias. Após, foram realizados ensaios de resistência à compressão, permeabilidade, absorção de água por imersão e método do cachimbo para comparar traços de concreto produzidos com e sem a utilização de aditivo cristalizante. Como resultado, constatou-se que o emprego do aditivo cristalizante teve a capacidade de diminuir a porosidade e a absorção de água do concreto, ao mesmo tempo em que contribuiu para um aumento na resistência à compressão. No entanto, essas alterações foram pouco expressivas para a idade de 28 dias. É esperado que, devido ao caráter contínuo do processo de cristalização, os resultados sejam mais significativos em idades mais avançadas. Por outro lado, observou-se que o uso do aditivo proporcionou uma redução mais eficiente da permeabilidade superficial das amostras.

Oliveira (2019) estudou o potencial do aditivo cristalizante como estimulador da autocicatrização de fissuras em matrizes cimentícias. Para o trabalho o autor utilizou matrizes com baixo potencial de cicatrização para permitir uma análise mais precisa da atuação do aditivo cristalizante (CA), e promoveu com aplicação de carga, fissuras nos concretos com duas classes de aberturas distintas (100 e 200 μm). O trabalho avaliou a influência da dosagem de aditivos cristalizantes (0,5%, 1 e 2% em massa de cimento) e a recuperação das propriedades mecâni-

cas (resistência à tração por compressão diametral) e de durabilidade (permeabilidade de gás nitrogênio) dos concretos submetidos a fissuração. O processo de cura consistiu em imersão em água a uma temperatura de 60°C, com a idade de pré-fissuração de 7 dias. Por meio dos ensaios de tração por compressão diametral e permeabilidade de gás, o autor quantificou a autocicatrização com base em indicadores de recuperação mecânica e selamento das fissuras. Os resultados obtidos confirmaram a recuperação das propriedades avaliadas após o processo de cicatrização, independentemente do nível de dano. Notavelmente, a dosagem de 2% de aditivo cristalizante (CA) demonstrou um excelente desempenho, especialmente quando utilizado em conjunto com fibras de polipropileno (PP), utilizadas para melhor controle de fissuração.

Pedroso (2019) avaliou a autocicatrização com cimentos Portland CP II-F-40, CP III-40-RS e CP V ARI com utilização do aditivo cristalizante (1% sobre a massa de cimento) e fibra álcool polivinílico (PVA) com a dosagem recomendada de 1 a 1,5% sobre o volume de cimento. A quantidade de fibra influenciou significativamente na trabalhabilidade do concreto. Testes foram feitos até chegar a uma dosagem reduzida, onde foi adotado 600 g/m³. O a/c do concreto foi fixado em 0,45, pois são concretos com maior incidência de manifestações patológicas por possível retração plástica e retração térmica. Após a desmoldagem, os corpos de prova permaneceram até 24 horas antes da data dos ensaios específicos. Para indução de fissuras, aos 28 dias, os corpos de prova permanecem em cura úmida. Após, selecionou-se 10 amostras de cada concreto e essas foram submetidas ao rompimento à compressão axial para obtenção da resistência média e aplicou-se 80% resistência encontrada como pré-carga para cada um dos corpos de prova. Por fim, realizou-se os ensaios de resistência à compressão axial, absorção por capilaridade e microscopia óptica. Assim, os ensaios de resistência à compressão axial foram avaliados e apresentaram alteração dos resultados por conta da utilização do aditivo cristalizante, já os ensaios de absorção por capilaridade mostraram uma eficiência na utilização do aditivo cristalizante e, a fibra PVA também apresentou alterações quanto aos resultados de autocicatrização para os três cimentos utilizados nesta pesquisa.

Ziegler (2020) investigaram a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos com a utilização de diferentes aditivos cristalizantes. O estudo envolveu a análise de três aditivos cristalizantes (todos com dosagem fixada de 1% em relação a massa de cimento) com utilização de cimento Portland (CP II-F) além da adição de sílica ativa (5%) e uma relação água/cimento de 0,4. As fissuras foram induzidas aos 3 dias de idade dos corpos de prova, que foram submetidos a 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem para intensificar o processo de autocicatrização. As análises realizadas consistiram no ensaio de difusão de íons cloretos (com o objetivo de analisar o desempenho da autocicatrização nas fissuras), o ensaio de microscopia óptica (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. Foi observado que a utilização de aditivos cristalizantes e sílica ativa nos concretos resultou em uma redução na absorção de água por capilaridade, sem comprometer a resistência à compressão. No entanto, no ensaio de microscopia óptica, não foi possível observar o fechamento das

fissuras em todos os concretos ao longo do tempo. No ensaio de difusão de cloretos, a incorporação dos aditivos cristalizantes proporcionou uma redução na passagem de cloretos pelos concretos fissurados. Após 6 ciclos, foi verificada uma redução de 59,72% na difusão de cloretos. Por outro lado, o concreto com sílica ativa apresentou um aumento de 32,15% na difusão de cloretos em relação ao concreto de referência. Em conclusão, os autores observaram que a utilização de diferentes aditivos cristalizantes proporcionou uma melhoria significativa na capacidade de autocicatrização do concreto. No entanto, o uso de sílica ativa mostrou resultados menos significativos nesse aspecto.

Polesello e Maus (2020) realizaram um estudo para avaliar a influência do aditivo cristalizante no desempenho do concreto, especialmente em relação à estanqueidade das estruturas, com o objetivo de aumentar sua durabilidade e vida útil. O estudo incluiu a análise de concretos produzidos com cimento Portland CP IV-32 RS e um tipo de aditivo cristalizante, em três diferentes percentuais de dosagem (0,5%, 0,8% e 1,0% em relação à massa de cimento). Os concretos foram caracterizados por três relações água/cimento (a/c) - 0,40, 0,50 e 0,60 - e foram submetidos a dois processos de cura, úmida e submersa. O desempenho dos concretos foi avaliado aos 28 dias de idade por meio da análise da resistência à compressão e da permeabilidade determinada pela absorção capilar. Os resultados obtidos revelaram que tanto o tipo de cura quanto a relação a/c e a dosagem do aditivo exerceram uma influência significativa nas propriedades do concreto. Observou-se que a cura submersa proporcionou um melhor desempenho em termos de resistência à compressão do concreto. Além disso, constatou-se que o aumento na dosagem do aditivo resultou em uma maior absorção de água por capilaridade no concreto.

Hollmann (2020) verificou a influência dos aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados. Foram produzidos concretos com três diferentes aditivos cristalizantes, um concreto de referência e um concreto com adição de 5% de sílica ativa para comparação. Os concretos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade para caracterização e para avaliação da autocicatrização foi realizada por meio de ensaios de resistência à penetração de íons cloreto e microscopia ótica. Os corpos de prova foram fissurados na idade de 3 dias e submetidos a ciclos de molhagem/secagem (2 dias de imersão em água potável renovável e 12 dias fora da imersão) até as idades de 28 e 91 dias, data de realização dos ensaios. Como resultado, foi observado que a utilização de aditivos cristalizantes e de sílica ativa não comprometeu a resistência à compressão e ainda favoreceu na redução de absorção de água por capilaridade, sendo que a adição de sílica ativa proporcionou redução de 44% em relação ao concreto de referência. Já no ensaio de penetração de íons de cloreto, a incorporação de aditivos cristalizantes não mostrou melhorias em relação ao concreto de referência. Entretanto, nos concretos contendo sílica ativa foi encontrado os melhores resultados, intensificando sua eficiência quanto maior a idade de ensaio. Nos corpos de prova não fissurados, na idade de 91 dias, foi encontrado uma redução de 63% na carga passante, com aumento de 69% na estimativa de vida útil. Em relação ao ensaio de microscopia óptica, foi observado a formação de produtos lixiviados em alguns corpos de

prova.

Geraldo, Guadagnini e Camarini (2021) estudaram a influência de três teores de cimento Portland CP V ARI (450, 475 e 500 kg/m³) nas propriedades mecânicas (resistência à compressão e à tração) e porosidade (absorção capilar de água, absorção de água e índice de vazios) de concreto autocicatrizante (SHC) com aditivo cristalizante. O teor de aditivo cristalino utilizado foi de 2% em relação ao peso de cimento. Os corpos de prova foram desmoldados na idade de 2 dias e armazenados por 5 dias em câmara úmida (22 °C e UR ≥ 95%). Após, uma indução de fissura foi realizada na idade de 7 dias e os corpos de prova foram levados para cura submersa até a idade de ensaio (28 e 90 dias). Por fim, os resultados obtidos pelos autores revelaram que o SHC apresentou resistência à compressão semelhante ao concreto de referência, que não passou por indução de fissuras, independentemente do teor de cimento utilizado. A absorção de água e o índice de vazios do SHC diminuíram à medida que o teor de cimento aumentou, e uma redução significativa na absorção capilar de água foi observada após 90 dias. A introdução do aditivo cristalizante mostrou-se altamente eficiente na diminuição da porosidade do concreto, especialmente em idades mais avançadas. O SHC produzido com um teor de cimento mais elevado apresentou uma redução ainda maior na porosidade.

San Martin (2021) conduziu uma avaliação da capacidade de autocicatrização de fissuras em um mesmo traço de concreto com a adição de um aditivo cristalizante, tanto em estruturas reais quanto em ensaios de laboratório. O estudo também investigou a influência de quatro diferentes ambientes de exposição (ambiente natural, ciclos de molhagem/secagem, submersão com e sem renovação) na capacidade de autocicatrização do concreto, além de verificar se existe correlação entre algum dos ambientes simulados e o ambiente real de exposição. As amostras foram produzidas com cimento Portland CP IV-32 RS, relação água/cimento fixada em 0,43 e dosagem de aditivo cristalizante de 0,8% em relação ao peso de cimento. Foram realizados ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e análises de imagem por microscopia ótica nas amostras fissuradas, no momento da fissuração e após 6 meses. Na obra, foram identificadas fissuras nas estruturas de concreto armado e, em seguida, realizou-se a leitura dessas fissuras por meio de microscopia ótica no primeiro dia de análise e após 4 meses. No laboratório, as amostras que permaneceram submersas, com ou sem renovação de água, apresentaram os melhores resultados em termos de percentual de fechamento das fissuras (85%), seguidas pelas amostras que passaram por ciclos de molhagem/secagem (61%) e aquelas expostas ao ambiente natural (50%). Na obra, a estrutura localizada no subsolo 2 apresentou um maior número de fissuras e uma melhor taxa de fechamento em comparação ao subsolo 1. As aberturas das fissuras encontradas variaram entre 0,10mm e 0,40mm, e observou-se que as fissuras de menor abertura apresentaram uma taxa de fechamento mais alta. O ensaio de propagação de onda ultrassônica indicou que as amostras expostas aos ciclos de molhagem/secagem apresentaram uma maior taxa de recuperação, sugerindo uma recuperação interna mais significativa. Por fim, foi possível observar o fenômeno de autocicatrização no concreto com adição de aditivos cristalizantes e confirmar a necessidade da presença de água para ativar esse mecanismo. Ao comparar as aná-

lises em laboratório e no ambiente real, verificou-se que os resultados obtidos para o subsolo 2 assemelharam-se aos das amostras submersas, onde a autocicatrização foi mais notável. Já o subsolo 1 apresentou resultados semelhantes aos das amostras expostas ao ambiente natural, com uma autocicatrização menos evidente em ambas as situações.

Vilela, Teixeira Filho e Campos Neto (2021) avaliaram a efetividade da utilização de aditivo cristalizante em diferentes teores (1% e 2%) para prevenir a reação álcali-agregado em argamassas. O experimento empregou cimento Portland CP V ARI, com uma relação água/cimento de 0,47. A avaliação consistiu em testes de expansão de barras de argamassa utilizando o método acelerado para a reação álcali-agregado, juntamente com análises de desempenho mecânico (resistência à compressão axial), absorção de água por capilaridade, porosidade e índice de vazios. Os resultados indicaram que a presença de componentes alcalinos no aditivo resultou em expansões iniciais significativas nos primeiros sete dias. No entanto, no que diz respeito ao desempenho mecânico, absorção de água e vazios, foi observada uma melhoria significativa, aprimorando as propriedades das argamassas.

Wang et al. (2021) investigaram a capacidade de autocicatrização de argamassas com adição de aditivo cristalizante (CA) e cinzas volantes em três condições diferentes: imersão total em água, contato com a água e exposição ao ar. Os corpos de prova foram retirados dos moldes após 24 horas e colocados em uma câmara de cura ($20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{UR} \geq 95\%$) até a data de ensaio. Para realizar os ensaios foi necessário induzir fissuras nos corpos de prova com aberturas entre (100-250 μm). Logo após a indução das fissuras, os corpos de prova foram submetidos às três condições de exposição. Após a cura, os corpos de prova foram testados em diferentes idades, e a capacidade de autocicatrização da argamassa foi avaliada por meio da resistência à compressão, absorção de água e padrão de rachadura na superfície. Os resultados indicaram que a adição de CA pode melhorar a capacidade de autocura dos materiais cimentícios, porém, causa um efeito negativo quando uma quantidade muito grande de cinzas volantes é adicionada ($\geq 20\%$). O corpo de prova imerso em água apresentou a maior capacidade de autocicatrização de fissuras, em comparação com os outros ambientes.

Maines et al. (2022) avaliaram a ação e efetividade da utilização do aditivo cristalizante no fechamento das fissuras ao longo do tempo assim como seu potencial em recuperar as propriedades mecânicas e de permeabilidade que possam ampliar a durabilidade do concreto. Nesse trabalho foram produzidos 28 corpos de prova de concreto utilizando cimento Portland CP IV-32-RS com a inclusão de fibras (2%) e aditivo cristalizante. Esses corpos de prova foram curados em água durante 28 dias. Inicialmente, foi verificada a resistência à compressão do concreto produzido e, em seguida, os demais corpos de prova foram pré-fissurados. Posteriormente, aos 7, 14, 21 e 28 dias após a pré-fissuração, foram realizados ensaios de resistência e porosidade do concreto. Os resultados demonstraram, de forma geral, um aumento na resistência à compressão do concreto em relação à resistência inicial, mesmo com as pré-fissuras. No entanto, foi observada uma redução da resistência aos 21 e 28 dias. Em relação à porosidade, constatou-se um aumento nos primeiros 7 e 14 dias, seguido por uma redução da porosidade

aos 21 e 28 dias.

Stefanovska e Fidanchevski (2023) investigaram a influência de cinzas volantes e aditivos cristalinos na capacidade de autorregeneração de argamassas de cimento. Para o estudo, foram produzidos com cimento Portland comum (CEM I 52,5 N), três tipos de argamassas cimentícias compostas por (i) 16% em massa de cinza volante, (ii) aditivo cristalizante e (iii) 16% em massa de cinza volante e aditivo cristalizante, os quais foram comparados com a argamassa referência. A formação de fissuras foi feita usando ensaio de flexão de 3 pontos. A avaliação da eficiência cicatrizante ao longo do tempo foi determinada pela absorção capilar de água após 28 dias em cura por imersão em água. Os resultados experimentais mostraram que por autocicatrização autógena a argamassa de referência tem uma eficiência de vedação de 40% após 28 dias de tratamento e 70% após 6 meses de tratamento, mas a adição de cinzas volantes e aditivos cristalizantes estimulou a autocicatrização autógena. Os melhores resultados mostraram a argamassa (iii) contendo 16% em massa de cinza volante e aditivo cristalizante.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos trabalhos citados nesse tópico e de suas contribuições para avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto com incorporação de aditivos cristalizantes (CA).

Tabela 3 – Trabalhos com aditivos cristalizantes para avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Sisomphon <i>et al.</i> (2012)	Potencial de autorreparação de materiais à base de cimento com aditivo expansivo (CSA) e aditivo cristalino (CA).	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CEM I 42,5) - Relação a/c: 0,25 - Pré-fissuração aos 28 dias de idade - Aditivo cristalizante (1,5%) - Sulfoaluminato de cálcio (10%) - Cura por imersão em água, renovada em 7 dias 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de permeabilidade de água - Ensaio de microscopia óptica 	<p>O uso de CSA e CA como aditivos são benéficos com relação ao fenômeno de fechamento de fissuras superficiais, tendo a capacidade de selar totalmente as fissuras superficiais de 250 a 400µm de largura em 28 dias.</p> <p>Os índices de permeabilidade à água por fissuração das argamassas com aditivos foram consideravelmente reduzidos em relação ao período de exposição.</p> <p>Nas amostras com os aditivos, houve uma quantidade significativa de precipitação de carbonato de cálcio, principalmente na boca da trinca.</p>
Takagi (2013)	Influência de diferentes tipos de cimentos com percentuais distintos de escória de alto forno visando caracterizar possível potencial de cicatrização autógena de fissuras no concreto.	<ul style="list-style-type: none"> - Concretos com 3 tipos de cimento (CP III - RS, CP II-E e CP V ARI) - Aditivo Cristalizante (2,5%) - Escória de alto forno (55%, 34% e 0%) - Cura por imersão em água 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de penetração de água sob pressão - Ensaio de resistência à compressão axial - Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas - Ensaio de absorção de água por capilaridade - Ensaio de difusão de íons cloretos 	<p>Concretos produzidos com os cimentos CP III - RS, CP V ARI e CP II-E, nessa ordem, apresentaram melhores resultados tanto na recuperação das propriedades mecânicas quanto na estanqueidade.</p> <p>As misturas contendo os cimentos CP III - RS e CP II-E apresentaram uma autocatrização mais lenta nas primeiras idades nos corpos de prova que continham escória de alto forno, quando comparados com o CP V.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Ferrara <i>et al.</i> (2014)	Avaliação da autocura autógena de concretos comuns, com e sem aditivos cristalinos em sua mistura.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland Comum (CP I) - Aditivo cristalizante (1%) - Três ambientes para cura: Imersão em água, exposição ao ar e ciclos de temperatura acelerados - Abertura de fissura entre 100 e 200µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrasônicas - Ensaio de microscopia óptica e microscópio eletrônico de varredura (SEM) 	<p>Tanto em ambientes sob imersão em água quanto em exposição ao ar, a presença de aditivos cristalinos foi altamente eficaz para efeito de autocura e na recuperação da rigidez e capacidade de carga.</p> <p>A presença de aditivo cristalino acelerou o processo de cura da fissura e a recuperação relacionada das propriedades mecânicas.</p> <p>Em ambientes com ciclos de temperatura acelerado, foi possível encontrar resultados semelhantes aos de condições naturais, porém devido a dispersão de dados não é possível obter uma conclusão definitiva quanto ao processo de autocicatrização.</p>
Roig Flores <i>et al.</i> (2015)	Análise dos efeitos autocicatrizantes de uma mistura cristalina em quatro tipos de exposição ambiental comparando com um concreto de referência.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CEM II/A-L - Cimento Portland de calcário) - Quatro ambientes de cura: imersão em água, contato direto com água, câmara úmida e exposição ao ar - Aditivo Cristalizante (4%) - Relação a/c: 0,45 - Abertura de fissuras aos 2 dias de idade 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de permeabilidade de água - Ensaio de microscopia óptica 	<p>Foram analisadas fissuras com abertura de até 300µm.</p> <p>Foi constatado a necessidade da presença de água para a ocorrência da reação de autocura.</p> <p>O processo de autocura ocorreu tanto na mistura de referência quanto naquelas compostas por aditivos cristalinos.</p> <p>A maior taxa de autocura foi encontrada em amostras com aditivo cristalino e em ambientes de imersão em água (com aproximadamente 95%), seguidas pelas amostras que tiveram contato direto com a água quando comparadas com as amostras submetidas a exposição ao ar.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Roig Flores <i>et al.</i> (2016)	Efeitos dos aditivos cristalinos na capacidade de autocura do concreto precoce (primeiras idades).	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP II-AL 42,5R) - Comparação entre concretos classe C45/55 e C30/37 - Relação a/c: 0,45 e 0,60 - Aditivo cristalizante (4%) - Pré-fissuração na idade de 2 dias - Abertura de fissuras entre 0,10-0,40mm - Três ambientes de cura: imersão em água a 15°C e 30°C, e por meio de ciclos de umedecimento e secagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de permeabilidade de água - Ensaio de fechamento de fissuras 	<p>Ótima capacidade de cicatrização para espécimes curados com imersão em água a 30°C, seguido pelos espécimes curados sob água a 15°C.</p> <p>Os resultados não foram satisfatórios para a condição de cura pelo método de umedecimento e secagem.</p> <p>Foi observado a importância de empregar pelo menos dois parâmetros na avaliação da autocura em concretos, a fim de obter uma análise mais precisa.</p>
Cuenca <i>et al.</i> (2018)	Análise da capacidade de autocicatrização autógena de concretos reforçados com fibras de aço, com e sem aditivos cristalinos (CA).	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP II 42,5) - Aditivo Cristalizante (0,8%) - Relação a/c: 0,50 - Três ambientes de cura: imersão em água, exposição ao ar e ciclos de secagem/molhagem - Pré-fissuração aos 28 dias de idade 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão - Ensaio de resistência à flexão - Ensaio de microscopia óptica e microscópio eletrônico de varredura (SEM-EDS) 	<p>Foi observado que os corpos de prova imersos em água apresentaram os maiores fechamentos de fissuras.</p> <p>A adição de aditivos cristalinos favoreceu a capacidade de autocura em longo prazo sob repetidos eventos de fissuração e cicatrização.</p>
Continua na próxima página				

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Bianchin (2018)	Autocicatrização em concretos fissurados nas primeiras idades com a utilização de aditivos cristalizantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP IV - 32) - Diferentes relações a/c: 0,43, 0,50 e 0,66 - Aditivo cristalizante (1%) - Pre-fissuração aos 7 dias de idade - Cura por imersão em água 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão axial - Ensaio de penetração de íons cloretos 	<p>Os concretos com relação a/c de 0,43 apresentaram um aumento no desempenho mecânico quando fissurados, não sendo encontrada diferença estatística significativa nos outros traços.</p> <p>Obteve-se um aumento mais significativo na resistência axial em concretos fissurados com aditivos cristalizantes.</p> <p>Quanto a durabilidade, verificou-se um aumento na penetração de íons cloreto, o que segundo o autor tem relação com as cargas aplicadas aos concretos e concluiu que não foram observados resultados expressivos em relação ao uso de aditivos cristalizantes para a durabilidade.</p>
Alpes (2019)	Desempenho da cristalização de concretos produzidos com materiais disponíveis na região de Goiânia, com incorporação de aditivo cristalizante.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP II F-40) - Aditivo cristalizante (0,8%) - Relação a/c: 0,42 - Cura em imersão em água 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de permeabilidade de água - Ensaio de absorção de água por imersão - Ensaio de absorção de água pelo método do cachimbo - Ensaio de resistência a compressão 	<p>O emprego do aditivo cristalizante reduziu a porosidade e a absorção de água do concreto, ao mesmo tempo em que contribuiu para um aumento na resistência à compressão, porém esse aumento foi pouco expressivas para a idade de 28 dias.</p> <p>Devido ao caráter contínuo do processo de cristalização, é esperado que os resultados sejam mais significativos em idades mais avançadas.</p> <p>O uso do aditivo proporcionou uma redução mais eficiente da permeabilidade superficial das amostras.</p>
Oliveira (2019)	Potencial do aditivo cristalizante como estimulador da autocicatrização de fissuras em matrizes cimentícias.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CPP Classe G2) - Cimento Portland para Poços de Petróleo) - Duas classes de aberturas 100 e 200µm. - Aditivo cristalizante (0,5%, 1,0% e 2,0%) - Cura em imersão em água - Relação a/c: 0,44 - Pré-fissuração na idade de 7 dias 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à tração - Ensaio de permeabilidade de gás nitrogênio - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (SEM) 	<p>Independentemente do nível de dano houve a recuperação das propriedades avaliadas após o processo de cicatrização.</p> <p>Notavelmente, a dosagem de 2% de aditivo cristalizante (CA) demonstrou um excelente desempenho, especialmente quando utilizado em conjunto com fibras de polipropileno (PP), utilizadas para melhor controle de fissuração.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Pedroso (2019)	Avaliação da autocicatrização de fissuras em concreto convencional com diferentes tipos de cimentos e a influência do catalisador cristalizante e da fibra PVA em interação com esses cimentos.	<ul style="list-style-type: none"> - Três tipos de cimentos Portland (CP II-F-40, CP III-40-RS e CP V ARI) - Aditivo cristalizante (1%) - Fibra de álcool polivinílico (PVA): 1 a 1,5% - Relação a/c: 0,45 - Pré-fissuração na idade de 28 dias - Cura em imersão em água 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão axial - Ensaio de absorção por capilaridade - Ensaio de microscopia óptica 	<p>Os ensaios de resistência à compressão axial foram avaliados e apresentaram alteração dos resultados por conta da utilização do catalisador cristalizante</p> <p>Os ensaios de absorção por capilaridade mostraram uma eficiência na utilização do catalisador cristalizante</p> <p>A fibra PVA também apresentou alterações quanto aos resultados de autocicatrização para os três cimentos utilizados nesta pesquisa.</p>
Ziegler (2020)	Avaliação da autocicatrização de concretos com uso de aditivos cristalizantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP II-F) - Três tipos de aditivo cristalizante (1,0%) - Sílica ativa (5%) - Relação a/c: 0,40 - Pré-fissuração na idade de 3 dias - Cura em ciclos de molhagem/secagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de difusão de íons cloretos - Ensaio de microscopia óptica - Ensaio de resistência à compressão axial 	<p>A utilização de aditivos cristalizantes e sílica ativa resultaram em uma redução na absorção de água por capilaridade nos concretos, sem comprometer a resistência à compressão.</p> <p>Em relação ao ensaio de microscopia óptica, não foi possível observar o fechamento das fissuras em todos os concretos ao longo do tempo.</p> <p>No ensaio de difusão de cloretos, a incorporação dos aditivos reduziu a passagem de cloretos nos concretos fissurados. Após 6 ciclos, constatou-se uma diminuição de 59,72% na difusão de cloretos. No entanto, o concreto com sílica ativa apresentou um aumento de 32,15% na difusão de cloretos em comparação ao concreto de referência.</p> <p>A utilização de diferentes aditivos cristalizantes proporcionou uma melhoria significativa na capacidade de autocicatrização do concreto, ao contrário da sílica ativa, que mostrou resultados menos satisfatórios.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Polesello e Maus (2020)	Influência do aditivo cristalizante no concreto, avaliando sua eficiência quanto à estanqueidade das estruturas.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP IV 32 RS) - Aditivo cristalizante (0,5%, 0,80% e 1,0%) - Relação a/c: 0,40, 0,50 e 0,60 - Dois ambientes de cura: câmara úmida e imersão em água 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão axial - Ensaio de absorção de água por capilaridade 	<p>Tanto o tipo de cura quanto a relação a/c e a dosagem do aditivo exerceram uma influência significativa nas propriedades do concreto.</p> <p>Observou-se que a cura submersa proporcionou um melhor desempenho em termos de resistência à compressão do concreto.</p> <p>Constatou-se que o aumento na dosagem do aditivo resultou em uma maior absorção de água por capilaridade no concreto.</p>
Hollmann (2020)	Influência dos aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados.	<ul style="list-style-type: none"> - Três tipos de aditivo cristalizante - Sílica ativa (5%) - Pré-fissuração na idade de 3 dias - Cura sob ciclos de molhagem/secagem (12 dias imersos em água e 12 dias fora) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão - Ensaio de absorção de água por capilaridade - Ensaio de resistência à penetração de íons cloretos - Ensaio de microscopia óptica 	<p>A utilização de aditivos cristalizantes e de sílica ativa não comprometeu a resistência à compressão e ainda favoreceu na redução de absorção de água por capilaridade, sendo que a adição de sílica ativa proporcionou redução de 44% em relação ao concreto de referência.</p> <p>Já no ensaio de penetração de íons de cloreto, a incorporação de aditivos cristalizantes não mostrou melhorias em relação ao concreto de referência. Entretanto, nos concretos contendo sílica ativa foi encontrado os melhores resultados, intensificando sua eficiência quanto maior a idade de ensaio.</p> <p>Nos espécimes não fissurados, na idade de 91 dias, foi encontrado uma redução de 63% na carga passante, com aumento de 69% na estimativa de vida útil.</p> <p>Em relação ao ensaio de microscopia óptica, foi observado a formação de produtos lixiviados em alguns corpos de prova.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Geraldo <i>et al.</i> (2021)	Influência de diferentes teores de cimento nas propriedades mecânicas e porosidade de concreto autocatrizante (SHC) com mistura cristalina.	<ul style="list-style-type: none"> - Três teores de cimento Portland CP V ARI (450, 475 e 500 kg/m³) - Aditivo cristalizante (2%) - Cura em câmara úmida (22°C e UR de 95%) até os 7 dias - Cura submersa até os 28 e 90 dias - Pré-fissuração na idade de 7 dias 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão - Ensaio de absorção de água por capilaridade e índice de vazios 	<p>O SHC apresentou resistência à compressão semelhante ao concreto de referência, que não passou por indução de fissuras, independentemente do teor de cimento utilizado.</p> <p>A absorção de água e o índice de vazios do SHC diminuíram à medida que o teor de cimento aumentou, e uma redução significativa na absorção capilar de água foi observada após 90 dias.</p> <p>A introdução do aditivo cristalino mostrou-se altamente eficiente na diminuição da porosidade do concreto, especialmente em idades mais avançadas.</p> <p>O SHC produzido com um teor de cimento mais elevado apresentou uma redução ainda maior na porosidade.</p>
San Martin (2021)	Avaliação da autocatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland CP IV 32 RS - Aditivo cristalizante (0,8%) - Relação a/c: 0,43 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica - Ensaio de microscopia óptica 	<p>Na obra, após 4 meses, as amostras submersas, com ou sem renovação de água, apresentaram o melhor fechamento das fissuras (85%). Em seguida, as amostras submetidas a ciclos de molhagem/secagem com 61%, enquanto aquelas expostas ao ambiente natural atingiram 50% de fechamento.</p> <p>As fissuras encontradas variaram entre 0,10mm e 0,40mm de espessura, sendo notado que fissuras menores apresentaram uma taxa de fechamento mais alta.</p> <p>O ensaio de propagação de onda ultrassônica indicou que as amostras submetidas a ciclos de molhagem/secagem tiveram uma taxa de recuperação maior.</p> <p>Foi observado o fenômeno de autocatrização no concreto com adição de cristalizantes, confirmando a necessidade de presença de água para ativar esse mecanismo.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Vilela <i>et al.</i> (2021)	Eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante na prevenção da reação álcali-agregado em argamassas.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP V ARI) - Aditivo cristalizante (1,0% e 2,0%) - Relação a/c: 0,47 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão axial - Ensaio de absorção de água por capilaridade, porosidade e índice de vazios 	<p>A presença de componentes alcalinos no aditivo resultou em expansões iniciais significativas nos primeiros 7 dias.</p> <p>No que diz respeito ao desempenho mecânico, absorção de água e vazios, foi observada uma melhoria satisfatória, aprimorando as propriedades das argamassas.</p>
Wang <i>et al.</i> (2021)	Capacidade de autocicatrização de argamassas com adição de mistura cristalina e cinzas volantes em três condições diferentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland comum (CP I 42,5) - Aditivo cristalizante (1,5%) - Três ambientes de cura: imersão total em água, contato com a água e exposição ao ar - Abertura de fissuras entre 100 e 250µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de resistência à compressão - Ensaio de absorção de água por capilaridade - Ensaio de fechamento de fissuras 	<p>A adição da mistura cristalina melhorou a capacidade de autocura dos materiais cimentícios, porém, causou um efeito negativo quando uma quantidade muito grande de cinzas volantes é adicionada (20%).</p> <p>O corpo de prova imerso em água apresentou a maior capacidade de autocicatrização de fissuras, em comparação com os outros ambientes.</p>
Maines <i>et al.</i> (2022)	Ação e efetividade da utilização do aditivo cristalizante no fechamento das fissuras e seu potencial em recuperar as propriedades mecânicas e de permeabilidade ampliando a durabilidade do concreto.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland (CP IV-32-RS) - Fibras (2,0%) - Aditivo cristalizante - Cura em imersão em água - Pré-fissuração na idade de 28 dias 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaios de resistência à compressão e porosidade 	<p>Houve um aumento na resistência à compressão do concreto com aditivo cristalizante em relação à resistência inicial, mesmo com as pré-fissuras.</p> <p>Foi observada uma redução da resistência aos 21 e 28 dias.</p> <p>Em relação à porosidade, constatou-se um aumento nos primeiros 7 e 14 dias, seguido por uma redução da porosidade aos 21 e 28 dias.</p>

Continua na próxima página

Tabela 3 – Continuação da página anterior

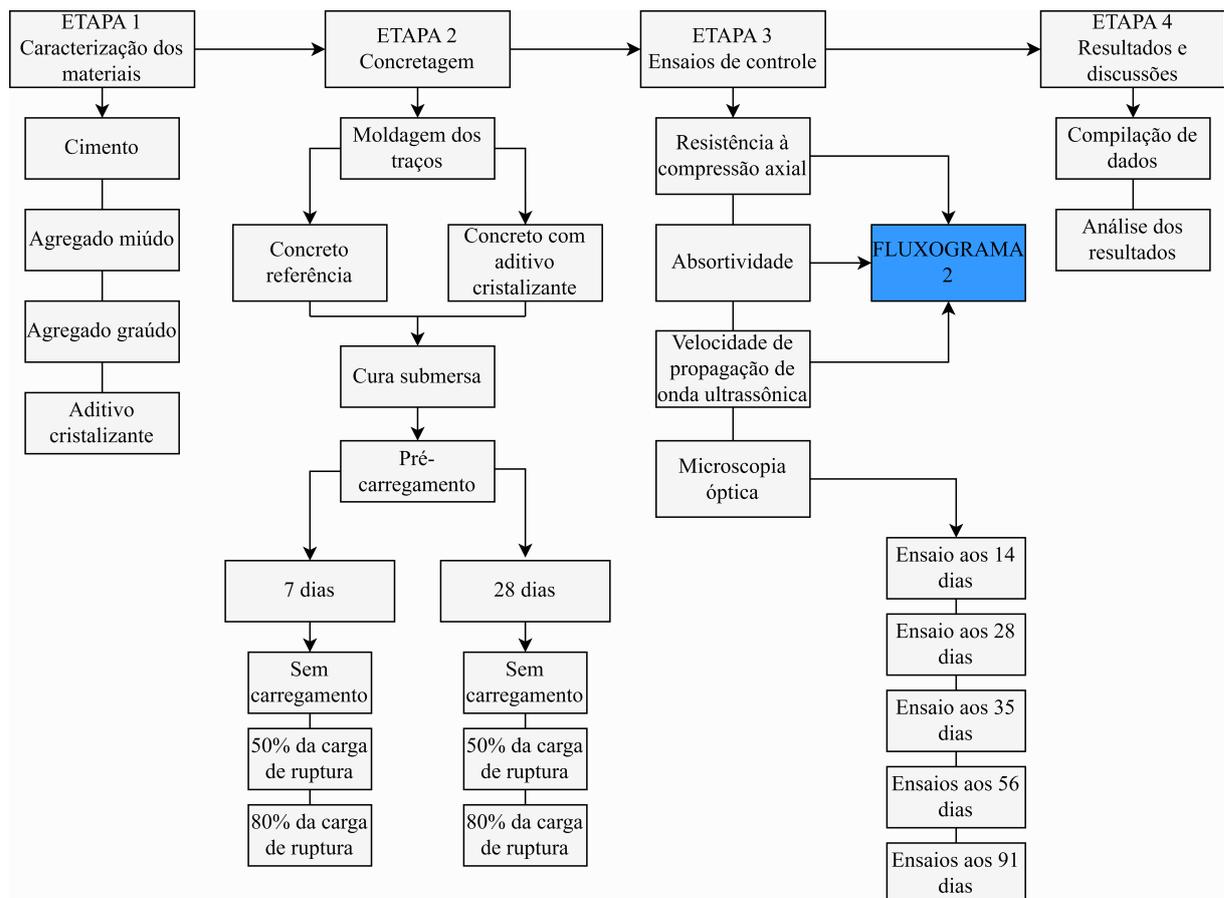
Autores	Investigação	Variáveis	Técnicas de análise	Principais Conclusões
Stefanovska <i>et al.</i> (2023)	Influência de cinzas volantes e aditivos cristalinos na capacidade de autorregeneração de argamassas de cimento.	<ul style="list-style-type: none"> - Cimento Portland comum (CEM I 52,5 N), - Cura por imersão em água - Três tipos de argamassa: (1) cinza volante 16% (2) mistura cristalina (3) cinza volante 16% + mistura cristalina 	- Ensaio de absorção de água por capilaridade	<p>Por autocicatrização autógena a argamassa padrão tem uma eficiência de vedação de 40% após 28 dias de tratamento e 70% após 6 meses de tratamento.</p> <p>Com a adição de cinzas volantes e aditivos cristalinos a autocicatrização autógena foi impulsionada.</p> <p>Os melhores resultados foram obtidos na argamassa (3) contendo 16% de cinza volante e mistura cristalina.</p>

Fonte: Elaboração Própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

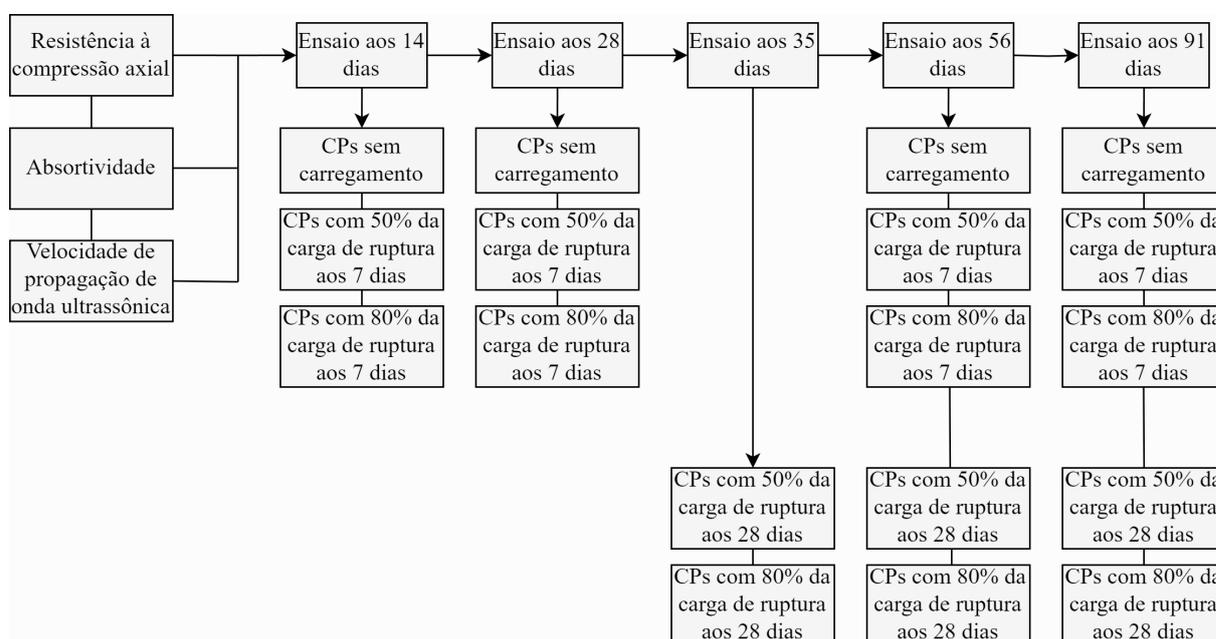
Para esta pesquisa o programa experimental foi composto por quatro etapas distintas, sendo elas desenvolvidas no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC) do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Alegrete/RS, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus Santa Maria/RS, no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC), do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) com o intuito de alcançar os objetivos estabelecidos neste trabalho, permitindo a análise do comportamento do concreto fissurado em relação à sua capacidade de autocicatrização. A organização do experimento está detalhada nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Fluxograma 1 do programa experimental



Fonte: Elaboração Própria

Figura 12 – Fluxograma 2 do programa experimental – detalhamento das idades dos ensaios de controle



Fonte: Elaboração Própria

A Etapa 1 do Programa Experimental corresponde a seleção e caracterização dos materiais utilizados para a produção dos concretos, através da determinação de suas propriedades físicas, mecânicas e químicas (cimento e aditivo cristalizante). A caracterização do aglomerante, do aditivo cristalizante e dos agregados foram realizadas de acordo com suas respectivas normativas.

A Etapa 2 corresponde ao processo de produção do concreto, cura e pré-carregamento dos corpos de prova produzidos. A concretagem foi realizada sob a limitação de temperatura e umidade controlada, sendo conduzidas durante o período de inverno, com uma temperatura média aproximada de 23°C e umidade relativa de $\pm 62\%$. Na produção dos traços, foi utilizado o cimento Portland CPV ARI - RS, com um traço unitário em massa de 1:4,5 (cimento: agregado) e uma relação a/c fixada em 0,42. Foram moldados 100 corpos de prova cilíndricos (diâmetro 10 x 20cm) para o traço Referência (T_{REF}) e 100 corpos de prova cilíndricos (diâmetro 10 x 20cm) para o traço com CA (T_{AC}), sendo os corpos de prova mantidos em cura submersa. Para cada traço produzido, parte dos corpos de prova foram selecionados para não sofrerem danos e servirem como referência (sem carregamento) e parte dos corpos de prova foram microfissurados em distintas idades (7 e 28 dias). Na idade de 7 dias, 54 corpos de prova foram retirados da cura submersa. Três destes corpos de prova foram rompidos até o limite e sobre o valor da resistência média obtida (f_{cm7}) foram calculados os percentuais de carregamento de compressão (carregamento-1: $50\% \times f_{cm7}$ e carregamento-2: $80\% \times f_{cm7}$), que foram aplicados em parte dos corpos de prova nesta idade. Nesta pesquisa 17 corpos de prova foram pré-carregados

aos 7 dias com o percentual de 50% f_{cm7} , 17 corpos de prova foram pré-carregados com o percentual de 80% f_{cm7} e 17 corpos de prova permaneceram sem danos (referência). Após o pré-carregamento, os corpos de prova retornavam para a cura submersa, permanecendo nesta situação até as datas dos ensaios de controle, conforme mostrado na Figura 12. Na idade de 28 dias, eram retirados da cura submersa 45 corpos de prova íntegros. Destas, três eram rompidas até o limite e sobre o valor médio obtido da resistência à compressão axial foram determinados os novos percentuais de carregamentos (carregamento-1: 50% x f_{cm28} e carregamento-2: 80% x f_{cm28}). Quatorze (14) corpos de prova foram pré-carregados aos 28 dias com o percentual de 50% f_{cm28} , 14 corpos de prova foram pré-carregados com o percentual de 80% f_{cm28} e 14 corpos de prova permaneceram íntegros, para servirem como referência. Após a indução de fissuras por compressão aos vinte e oito dias, os corpos de prova retornavam para a cura submersa, permanecendo nesta situação até as datas dos ensaios de controle (Figura 12).

A Etapa 3 corresponde aos ensaios de controle dos concretos, no qual permitiram realizar a comparação de desempenho frente a autocura de amostras de concretos sem carregamento e submetidos a diferentes idades e porcentagens de carregamento, além de permitir analisar as modificações ocorridas na matriz cimentícia do concreto pela utilização do aditivo cristalizante. Os ensaios foram realizados nas idades de 14, 28, 56 e 91 dias (concretos pré-carregados aos 7 dias) e nas idades de 35, 56 e 91 dias (concretos pré-carregados aos 28 dias). Os números de CP's por idade de ensaio está discriminado com maior detalhe no tópico 3.2.5.

Por fim, a Etapa 4 corresponde à compilação dos dados obtidos ao longo do experimento, bem como à realização de uma análise dos resultados alcançados. Nesta etapa, os dados são organizados de forma a permitir uma compreensão profunda dos efeitos e correlações entre os fatores estudados. As informações coletadas são submetidas a procedimentos estatísticos, visando identificar padrões significativos, permitindo a realização de conclusões pertinentes quanto a autocicatrização dos concretos.

3.1 ETAPA 1 – PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O planejamento de um experimento é uma importante etapa do trabalho científico pois é nessa fase que ocorre a definição dos fatores controláveis mais relevantes. Nesta pesquisa, utilizou-se uma metodologia para atender aos objetivos estabelecidos neste estudo, com o intuito de criar uma abordagem experimental para destacar cada fator, os quais serão apresentados nos itens subsequentes.

3.1.1 Variáveis da pesquisa

Com base nos objetivos deste trabalho foram definidas como principais variáveis de resposta: a resistência à compressão axial, a absorção de água por capilaridade e a velocidade de propagação de onda ultra sônica.

A relevância da resistência à compressão axial como um fator de interesse é justificada

pelo seu papel fundamental nos projetos estruturais e no controle de qualidade. Essa característica está diretamente associada à capacidade dos elementos de resistirem a cargas sem sofrerem rupturas. Adicionalmente, é a propriedade mais requisitada em projetos de estruturas de concreto, e sua determinação em laboratório é relativamente simples em comparação com outras propriedades, como módulo de elasticidade, permeabilidade, resistência a intempéries, entre outras. Esses aspectos destacam a importância central da resistência à compressão axial no âmbito da engenharia estrutural e da qualidade de construções em concreto (VIEIRA, 2008).

A escolha de avaliar a durabilidade dos concretos através da análise da absorção de água é fundamentada pelo fato de que, nos materiais porosos, a água desempenha um papel crucial em diversos processos de degradação, atuando como um meio de transporte para agentes agressivos. As moléculas de água possuem dimensões extremamente reduzidas, o que lhes permite penetrar em cavidades e poros muito estreitos. Além disso, a água se destaca por ser um solvente capaz de dissolver uma ampla variedade de substâncias, mais do que qualquer outro líquido conhecido. Essa característica é relevante, pois justifica a presença de íons e gases em algumas águas, os quais desempenham um papel fundamental na decomposição de materiais sólidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos é um parâmetro interessante porque fornece informações sobre a compactidade e/ou detecção de possíveis microfissuras em sua estrutura interna, bem como identificar possíveis pontos com formação de produtos de autocicatrização (LORENZI et al., 2013).

Definidas as variáveis de resposta, foram determinadas as variáveis independentes, ou fatores controláveis. A escolha destas variáveis embasou-se na relevância desses fatores para a variável de resposta. Para esta pesquisa, as variáveis independentes estão apresentadas na Tabela 4, que foram definidas para atender aos objetivos estabelecidos neste estudo, visando avaliar o fenômeno de autocicatrização nos concretos analisados. O estudo aborda dois tipos de concretos, sendo um deles sem a adição de aditivo cristalizante (referência) e o outro com a adição de 1,0% de aditivo em relação a massa de cimento. Além disso, os concretos foram pré-fissurados em duas idades distintas (7 e 28 dias) com três porcentagens diferentes de carregamento (0%, 50% e 80% em relação a carga de ruptura).

Tabela 4 – Variáveis utilizadas na pesquisa

Descrição	Variável
Aditivo cristalizante (teor de aditivo)	0% 1,0% (massa de cimento)
Idade de pré-carregamento dos corpos de prova	7 dias 28 dias
Porcentagem de pré-carregamento	0% 50% 80% (carga de ruptura)

Fonte: Elaboração Própria

A utilização do aditivo cristalizante é justificada por ser o foco principal desta pesquisa. Segundo Oliveira et al. (2020) esses produtos apresentam propriedades hidrofílicas, que quando incorporados ao concreto, permitem uma rápida reação ao entrarem em contato com a água que penetra nos poros ou fissuras do concreto, assim como os subprodutos de hidratação do cimento. Essa reação resulta na formação de cristais insolúveis nos poros e vasos capilares do concreto, o que resulta em um selamento permanente contra a penetração de água e agentes agressivos. Esse processo confere à estrutura uma proteção duradoura contra deterioração, mesmo em condições severas.

As idades para a aplicação do carregamento nos concretos foram definidas como 7 e 28 dias. O pré-carregamento aos sete dias é justificado pela tendência atual de muitas empresas em buscarem uma maior competitividade no mercado. Assim, acabam reduzindo o tempo de execução de estruturas de concreto, optando pela remoção antecipada do escoramento, isso resulta em uma aplicação precoce de carga na estrutura, provocando o surgimento de microfissuras no concreto (SILVA, 2016). Segundo Nehdi e Soliman (2011), durante as idades iniciais, as microfissuras são geralmente ocasionadas por uma interação de três formas de deformação: dilatação térmica, retração autógena e retração por secagem. Assim, a retirada precoce do escoramento pode potencializar as deformações, somando-se aos processos naturais do concreto nas primeiras idades. Podendo assim, agravar a formação de microfissuras, prejudicando o desenvolvimento adequado das propriedades mecânicas do concreto em estágios posteriores e comprometendo a durabilidade da estrutura. Já o carregamento imposto em concretos com idade de 28 dias se justifica uma vez que com o aumento da idade do concreto, as fissuras tendem a apresentar maior abertura. Isso reflete diretamente na possibilidade de autocicatrização das matrizes, que reduz com o passar da idade de geração das fissuras (PETRY, 2021). Além disso, várias pesquisas sobre esse tema têm empregado períodos de pré-carregamento de 7 e 28 dias para investigar o fenômeno da autocicatrização, como evidenciado por estudos como os de Vieira (2008), Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013), Silva (2016), Moreira (2016), Venquiaruto (2017), Cappellesso (2018), Cuenca, Tejedor e Ferrara (2018) e Petry (2021).

Com relação aos percentuais de carregamento, foram estipulados três percentuais em relação à carga máxima: 0%, 50%, e 80%. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de possibilitar uma análise mais aprofundada tanto da influência do pré-carregamento quanto do processo de formação de microfissuras. Acredita-se que a aplicação de diferentes percentuais de carregamento nos concretos permitirá um melhor entendimento da geração de microfissuras nas fases iniciais e de sua influência na entrada de agentes agressivos e absorção de água ao longo do tempo. Essa abordagem é importante para a compreensão dos efeitos mecânicos e durabilidade do concreto sob diferentes condições de carregamento (VENQUIARUTO, 2017).

3.1.2 Seleção e caracterização dos materiais

Nesta seção, são fornecidas informações sobre os materiais utilizados nesta pesquisa e suas respectivas caracterizações, conforme apresentado na Tabela 5, bem como os métodos

adotados para realizar as análises correspondentes.

Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos materiais

Material	Propriedades	Caracterização	Norma Regulamentadora
Cimento Portland	Física, química e mecânicas	FTIR, DRX, FRX e Calorimetria	-
Aditivo Cristalizante	Químicas	FTIR, DRX, FRX e Calorimetria	-
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

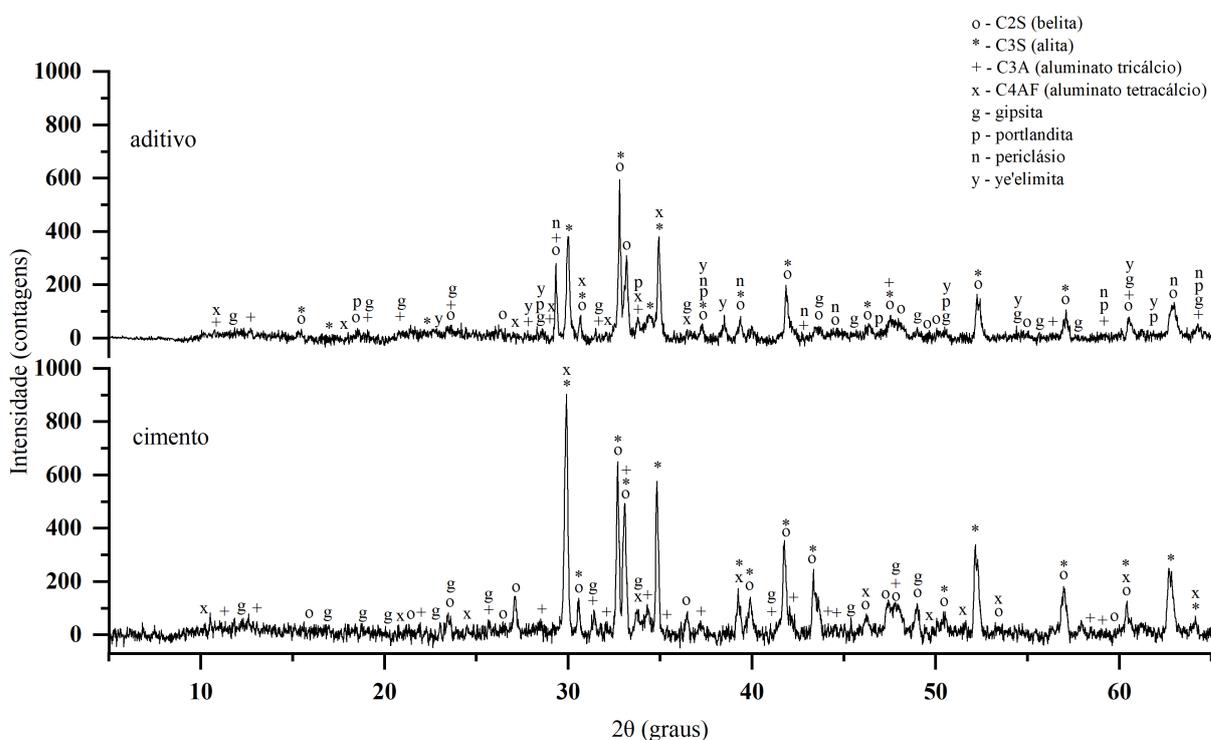
3.1.2.1 Cimento e aditivo cristalizante

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial com Resistência a Sulfato (CP V ARI - RS), selecionado pela alta resistência nas primeiras idades e por ser um cimento mais puro. A escolha desse tipo de cimento, com baixo teor de adições minerais, permitiu uma melhor análise da ação do aditivo cristalizante nos ensaios laboratoriais. Cimentos mais puros são mais adequados para avaliar os efeitos dos aditivos cristalizantes nas propriedades dos concretos, pois não interferem no processo de autocicatrização em conjunto com os aditivos (ARY, 2019). Este tipo de cimento apresenta uma resistência à compressão média aos 7 dias a qual atende a mínima estabelecida pela norma NBR 16697 ABNT (2018a) de 34 MPa aos 7 dias, além de uma massa específica de 3,05kg/dm³.

A difração de Raios x (DRX) foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil – LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Para execução deste ensaio os cimentos foram preparados previamente, sendo enquadrada a granulometria passante na peneira nº 200. A análise de difração de raio X do cimento Portland e do aditivo cristalizante foram realizadas em um difratômetro de bancada Proto AXRD com fonte de radiação Cu-K α ($\lambda = 0,1541$), operando a 30 kV e 20 mA, aplicando estágio de amostra rotativo e filtro de níquel, raio do goniômetro, 143 mm. Experimentos de difração foram registrados com fenda de divergência de 5 mm, ângulo 2θ de 5° a 65°, tamanho de passo de 0,02°, multiplicador de passo de 1 e tempo/passos de 2,5 s. A análise qualitativa das fases cristalinas do cimento e aditivo X, foram conduzidas utilizando o software X'Pert High Score. Neste método, os picos observados nos difratogramas foram comparativamente analisados em termos de suas posições angulares e intensidades relativas difratadas. Essa comparação foi realizada com fichas existentes em um banco de dados identificadas como fichas PDF (*Powder Diffraction Files*).

Na Figura 13, estão ilustrados os difratogramas realizados para o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI - RS) e o aditivo cristalizante (Aditivo X), respectivamente.

Figura 13 – Difratograma do cimento e aditivo cristalizante



Fonte: Elaboração Própria

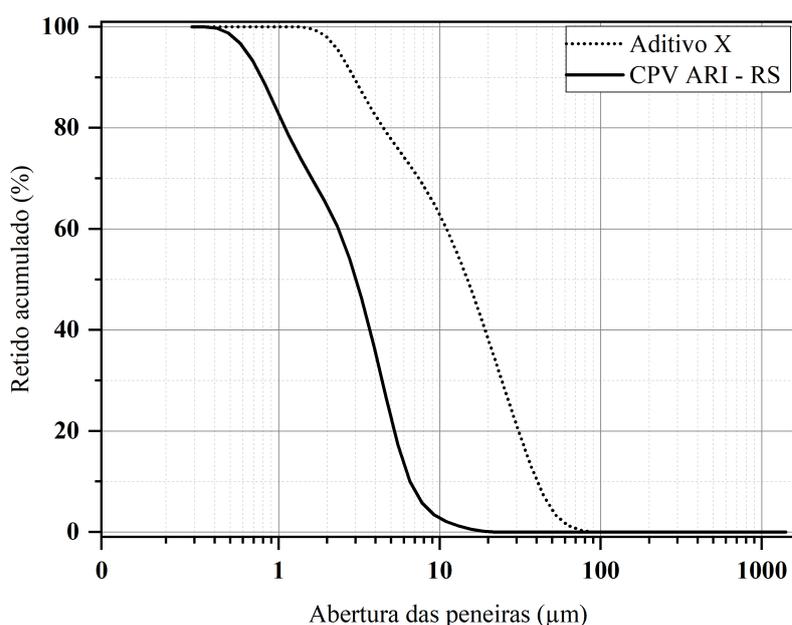
No difratograma de cimento apresentado na Figura 13, identificam-se as fases constituintes do clínquer, evidenciadas pelos picos característicos de alita (C_3S), belita (C_2S) e gipsita. Notavelmente, os picos nas regiões de 30° e 35° são mais salientes no cimento CP V ARI - RS em comparação com o aditivo cristalizante, indicando que o cimento é mais puro além da presença elevada de clínquer na composição, conforme relatado por (CAPPELLESSO, 2018). Ao examinar o espectro de DRX do aditivo cristalizante, além das fases como alita, belita, aluminato tricálcio (C_3A) e aluminato tetracálcio (C_4AF) presentes em misturas cristalinas, observa-se a presença de compostos cristalinos como portlandita, periclásio e ye-elemita ($C_4A_3\$$). Ressalta-se que a ye-elemita (mineral responsável pela formação da etringita) constitui aproximadamente 30% do aditivo cristalino, enquanto o CEM I contribui com cerca de 65-80% de sua composição, segundo especificado pelo fabricante.

A análise granulométrica a laser, foi conduzida utilizando um granulômetro (S3500 Particle Size Analyzer) para determinar a distribuição e o diâmetro médio das partículas presentes no cimento e no aditivo cristalizante. O procedimento foi realizado utilizando material seco, abrangendo uma faixa de medição de $0,1\mu\text{m}$ a $900\mu\text{m}$ e a uma temperatura de 25°C . As curvas granulométricas podem ser observadas na Figura 14, com os respectivos diâmetros (10, 50 e

90%) detalhados na Tabela 6.

Foi empregado um aditivo cristalizante em pó PENETRON ADMIX®, designado na pesquisa como Aditivo X, adquirido por meio da empresa nacional Penetron Brasil. Sua incorporação ao concreto ocorreu durante o processo de produção das misturas. A dosagem do aditivo cristalizante nas misturas cimentícias seguiu as recomendações do fabricante, sendo utilizado 1,0% em relação à massa de cimento.

Figura 14 – Curva de distribuição granulométrica do cimento e aditivo cristalizante



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 6 – Granulometria do aglomerante e aditivo cristalizante

Granulometria (μm)	Cimento	Aditivo cristalizante X
Diâmetro a 90%	6,55	40,63
Diâmetro a 50%	3,03	14,87
Diâmetro a 10%	0,78	2,94
Diâmetro médio	3,45	19,48

Fonte: Elaboração Própria

Conforme evidenciado na Figura 14 e na Tabela 6, observa-se que a granulometria do cimento Portland CP V ARI – RS é mais fina em comparação ao aditivo cristalizante X utilizado. A menor granulometria do cimento implica em uma maior área superficial de contato, favorecendo a ocorrência mais rápida das reações químicas. Isso significa que o cimento proporciona mais locais de contato para as reações químicas, resultando em uma velocidade inicial de reação mais acelerada. As informações sobre a caracterização química do cimento e do aditivo cristalizante realizadas por meio do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), estão

apresentadas na Tabela 7, enquanto os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Composição química do aglomerante e aditivo cristalizante

Óxidos	Cimento (%)	Aditivo cristalizante X (%)
<i>CaO</i>	60,22	64,44
<i>SiO₂</i>	21,00	15,96
<i>Al₂O₃</i>	4,68	3,39
<i>MgO</i>	4,79	5,21
<i>SO₃</i>	3,48	4,36
<i>Fe₂O₃</i>	3,28	2,99
<i>K₂O</i>	0,96	1,17
<i>TiO₂</i>	0,42	0,21
<i>Na₂O</i>	0,41	1,70
<i>P₂O₅</i>	0,20	0,15
<i>MnO</i>	0,10	0,07
<i>Outros</i>	0,46	0,35

Fonte: Elaboração Própria

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos referente ao cimento utilizado neste trabalho.

Tabela 8 – Ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento CP V ARI - RS

Ensaios Químicos			
<i>Ensaios</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultado</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Resíduo Insolúvel - RI	%	0,83	Não aplicável
Perda ao Fogo - PF	%	2,80	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - <i>MgO</i>	%	4,79	Não aplicável
Trióxido de Enxofre - <i>SO₃</i>	%	3,42	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - <i>CO₂</i>	%	2,95	≤ 5,5
Ensaio Mineralógico*			
<i>C₃S</i>			42,41
<i>C₂S</i>			28,20
<i>C₃A</i>			6,85
<i>C₄AF</i>			9,98
<i>CaSO₄</i>			4,20
Ensaios Físicos			
<i>Ensaios</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultado</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	4.719	≥ 3000
Massa Específica	g/cm ³	3,05	Não aplicável
Índice de finura fundo - # 75µm (nr. 200)	%	0,20	< 6,0
Resíduo na peneira # 325	%	2,24	Não aplicável
Água de consistência normal	%	28,8	Não aplicável
Íncio de pega	minutos	124	> 60
Fim de pega	minutos	183	< 600
Expansibilidade à quente	mm	0,00	≤ 5,0
Ensaios Mecânicos			
<i>Ensaios - ABNT NBR 7215/96</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultado</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Resistência à Compressão - 1 dia	MPa	28,8	14,0
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	40,9	24,0
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	46,1	34,0
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	52,8	Não aplicável

Fonte: Cimento Guaíba, 2020

*Cálculos das fases mineralógicas estimadas a partir do método de Bogue

De acordo com os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 8, nota-se que todos os parâmetros estão em conformidade com as normas estabelecidas para o tipo de cimento empregado na pesquisa.

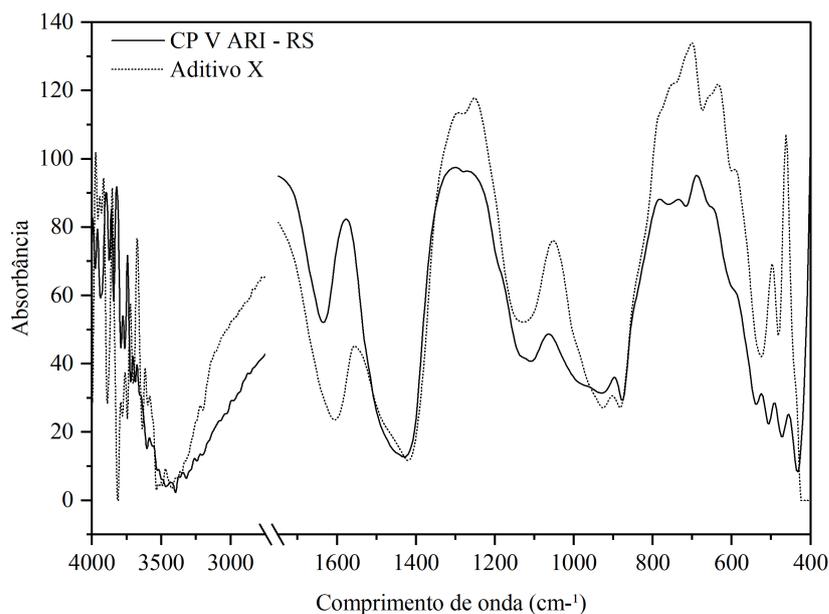
A caracterização do aglomerante e do aditivo cristalino também foi realizada por meio do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), o qual avaliou o espectro de absorção de infravermelho das amostras do cimento e aditivo X utilizados na pesquisa, conforme ilustrado na Figura 15. Para análise de FTIR foram preparados pellets com 1 mg de amostra moída e 300 mg de KBr, posteriormente testados em espectrofotômetro infravermelho com transformada de Fourier Jasco modelo 4200 FT-IR nas frequências de 400 a 4000 cm^{-1} , resolução de 8 cm^{-1} e 32 acumulações.

Por meio da análise dos resultados dos espectros obtidos pelo ensaio de FTIR, apresentados na Figura 15, constatou-se comportamento similar entre o cimento e o aditivo. Para espectro da amostra de cimento foram identificados bandas em 524 cm^{-1} , relacionada a vibrações de íon silicato presente na fase de silicato não hidratado do cimento Portland (STEPKOWSKA et al., 2004). As bandas de 875 cm^{-1} e 1430 cm^{-1} foram atribuídas a vibrações de íon CO_3^{-2} , sendo relacionadas ao CaCO_3 presente no cimento (ARAUJO JR. et al., 2017). A banda em 1106 cm^{-1} foi associada a vibrações de estiramento da ligação $\text{S} - \text{O}$ presente no íon sulfato da gipsita existente no cimento Portland utilizado (STEPKOWSKA et al., 2004). A presença da banda em 929 cm^{-1} foi relacionada a vibrações de estiramento da ligação $\text{Si} - \text{O}$ presente no gel C-S-H, e confirmou a hidratação do cimento (STEPKOWSKA et al., 2004; HIDALGO et al., 2007). Ainda no espectro da amostra de cimento Portland, a banda em torno de 3397 e 3467 cm^{-1} pode ser atribuída a vibrações da ligação $\text{O} - \text{H}$ presente na molécula de água fisicamente combinada, e a banda em 3602 cm^{-1} foi relacionada com movimentos vibracionais da ligação $\text{O} - \text{H}$ presente no $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produto de hidratação de C_3S e C_2S (STEPKOWSKA et al., 2004; ARAUJO JR. et al., 2017).

Para a amostra de aditivo, o espectro mostra fortes vibrações de $\text{Si} - \text{O}$, $\text{Al} - \text{O}$ e carbonatos aparecendo em torno de 883 , 701 e 1419 cm^{-1} , respectivamente (HASSANI et al., 2017). Também foi identificada uma banda pequena e larga em 1635 cm^{-1} devido às vibrações da curvatura no plano do grupo $-\text{OH}$ de baixa concentração - isto é, moléculas de água livres. Além disso, foram observados dois picos discretos em 1292 e 701 cm^{-1} correspondente a ligações de $\text{C} - \text{O}$, $\text{C} - \text{H}$ e CaCO_3 , após a interação entre hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o dióxido de carbono presente no ar (REDDY; THEJA; SASHIDHAR, 2018). Este mecanismo pode ser atribuído ao refinamento do sistema de poros devido à substituição do hidróxido de cálcio grosseiramente cristalino na matriz de cimento pelo gel C-S-H (HASSANI et al., 2017). A intensidade dos 1292 cm^{-1} prevê-se que a banda esteja intimamente associada à proporção e à profundidade de carbonatação. Alguns carbonatos também pode estar presentes, por exemplo, uma única banda de estiramento assimétrico observada 1419 cm^{-1} pode ser atribuído ao MgCO_3 (GOJEVIĆ et al., 2021). A banda larga detectada em 3424 cm^{-1} na espectroscopia FTIR do aditivo foi encontrado ligado a vibrações de alongamento sobrepostas de grupos OH

estruturais e livres de $C-H$, $C-S-H$ e água, respectivamente (REDDY; THEJA; SASHIDHAR, 2018). A banda na faixa $1420-1480\text{ cm}^{-1}$, segundo Kuenzel et al. (2018), é atribuído a CO_3^{2-}/HCO_3^- , confirmando a formação de mais carbonatos no CA. De acordo com os pesquisadores, esses carbonatos têm o potencial de preencher fissuras ou vazios, resultando, assim, em uma estrutura mais compacta e com menor permeabilidade à água.

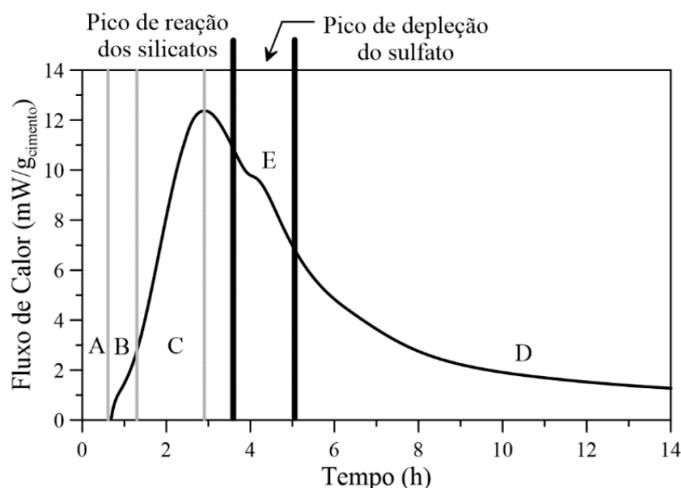
Figura 15 – Espectro de infravermelho do cimento Portland e aditivo cristalizante



Fonte: Elaboração Própria

Para a análise de calorimetria, a qual visa avaliar a compatibilidade entre o cimento e o cristalizante no processo das reações de hidratação, o ensaio foi realizado em pastas com cimento Portland (CP V ARI - RS) e amostras com dosagem de 1% de CA, ambos com uma relação água cimento de 0,45. Na Figura 16 está ilustrada uma curva calorimétrica típica de uma amostra de referência (sem aditivo cristalizante), a qual está dividida em distintas fases de hidratação, conforme relatado por Scrivener, Juilland e Monteiro (2015).

Figura 16 – Fases de hidratação de uma amostra de referência

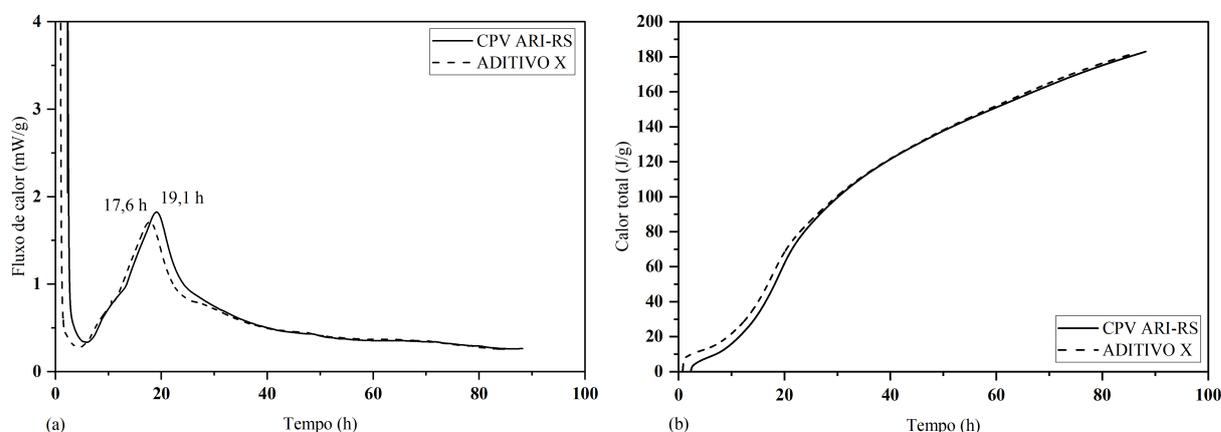


Fonte: Oliveira (2019)

No período de pré-indução (A) normalmente nota-se uma rápida liberação de calor após o primeiro contato da água com o cimento, causado pelo rápido ingresso de íons Ca^{2+} , K^+ , Na^+ e OH^+ em altas concentrações (ROMANO et al., 2016). No período de indução (B) as reações de hidratação ocorrem muito lentamente, não havendo liberação significativa de calor, que se deve à formação de uma camada de gel composta por C-S-H que envolve as partículas de cimento. A duração desse período pode variar de minutos a horas, dependendo das características específicas do cimento, adições ou aditivos utilizados. Quando ocorre a ruptura da camada de gel, a difusão iônica é facilitada, resultando em um aumento na velocidade das reações (THOMAS; JENNINGS, 2006). O principal pico de evolução de calor no período de aceleração (C) está associado a rápida formação do C-S-H e CH resultando em redução gradual da concentração de íons de Ca^{2+} (TAYLOR, 1990). A nucleação e crescimento de agulhas C-S-H ocorre primeiro de forma difusa na superfície do grão. Depois com a densificação do hidrato, a superfície do grão é completamente coberta e o crescimento passa a acontecer na parte interna do grão resultando no período de desaceleração (D) (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015). O ressalto identificado no início do período de desaceleração depois de 4h (E) corresponde ao pico de depleção do sulfato referente a formação de etringita (AFt), devido a renovação da dissolução do C_3A (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015).

As curvas de fluxo de calor e as curvas de calor acumulado obtidas na pesquisa a partir do ensaio de calorimetria isométrica das pastas de CP V ARI - RS e de aditivo cristalizante (Aditivo X) estão apresentadas na Figura 17 (a) e (b).

Figura 17 – Curvas de calorimetria das pastas de cimento Portland e aditivo cristalizante: (a) fluxo de calor e (b) calor acumulado



Fonte: Elaboração Própria

Observa-se que o incremento da dosagem de CA acelera o início da hidratação, chegando a um acréscimo no período de indução de aproximadamente 1,4h em relação ao cimento, o que por consequência faz com que as reações do cristalizante aconteçam mais rapidamente. No período de aceleração, o uso de CA diminuiu o pico máximo de liberação de calor. Portanto, o incremento da dosagem de CA afetou as reações de hidratação, prolongando o período de indução e diminuindo a intensidade de liberação de calor.

Segundo Zhang et al. (2015) outra possibilidade para o atraso no início do processo de pega é que a absorção do CA na superfície das partículas de cimento retarda o início da hidratação, dificultando a troca iônica na interface entre sólido e líquido.

A presença do CA por um lado retardou a hidratação do C_3S devido ao prolongamento do período de indução e por outro acelerou a hidratação do C_3A visto pela antecipação do pico de depleção do sulfato. Segundo Cheung et al. (2011), o pico de exaustão de sulfato das amostras contendo CA pode ser identificado pela queda do pico de fluxo máximo de calor.

O surgimento precoce do pico de depleção de sulfato, antes do pico principal de liberação de calor, observado na amostra contendo CA, pode ser atribuído à interação entre o cimento e o aditivo. À medida que o CA aumenta a área de superfície disponível para a hidratação, a demanda por sulfato de cálcio tende a crescer. De acordo com Hanehara e Yamada (2008), Sandberg e Roberts (2005), os aditivos exercem uma influência físico-química, especialmente na hidratação dos aluminatos, uma vez que o C_3A impacta a quantidade e a superfície específica dos hidratos formados nas idades iniciais.

Ao analisar as curvas de calor acumulado, nota-se que as amostras com CA e de cimento Portland praticamente não apresentaram variações expressivas na quantidade total de calor liberado. Isso sugere que, apesar do aumento na velocidade de reação associado ao CA, o calor total liberado permaneceu bastante próximo ao observado na amostra de cimento Portland, in-

dicando quantidades semelhantes de formação de hidratos a curto prazo. As curvas de calor acumulado destacam a eficácia do CA, considerando que os ensaios calorimétricos não quantificam plenamente o potencial do CA em idades mais avançadas, mas fornecem um indicativo no curto prazo.

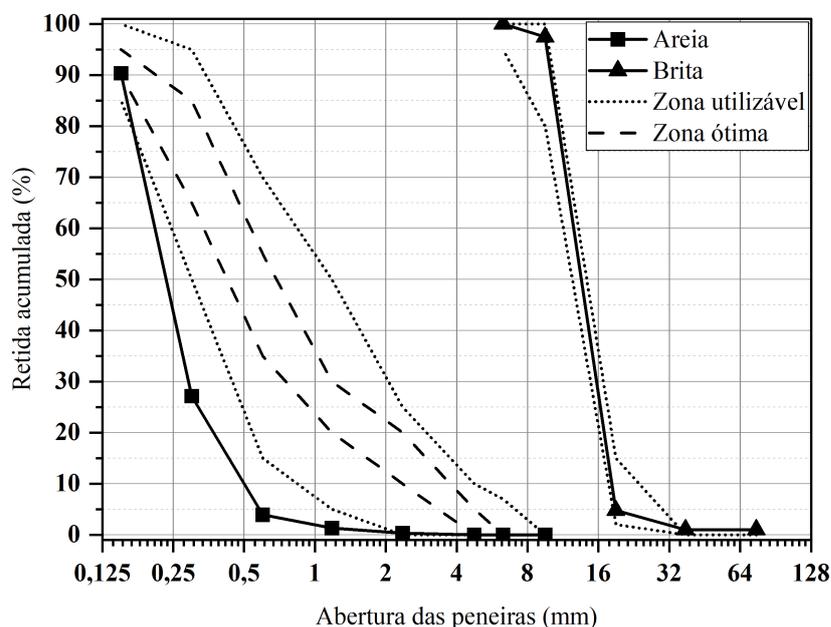
Em princípio, como o CA favorece a formação de hidratos a longo prazo, isto significa que suas reações se processam de forma muito lenta e se prolongam por muito mais tempo (FERRARA; KRELANI; MORETTI, 2016; DE NARDI et al., 2017). Portanto, o mecanismo de hidratação tardia do CA revela-se eficaz na facilitação do processo de cicatrização autógena.

3.1.2.2 Agregados

Como agregado miúdo, empregou-se areia natural classificada como areia fina, proveniente do município de Alegrete/RS, tendo sua dimensão máxima de 0,60mm e módulo de finura de 1,23. A granulometria do agregado miúdo, ficou abaixo do limite normativo inferior estipulado para esse tipo de agregado, como evidenciado na Figura 18, seguindo as diretrizes da NBR NM 248 ABNT (2003). Apesar dessa restrição, optou-se por utilizar o agregado na produção dos concretos devido à dificuldade em encontrar comercialmente um agregado miúdo com granulometria mais grossa na região. O agregado também foi ensaiado para a determinação de as suas massas específicas de acordo com a NBR 16916 ABNT (2021a), conforme mostrado na Tabela 9.

Quanto ao agregado graúdo, o mesmo também foi proveniente do município de Alegrete/RS, sendo este classificada com dimensão máxima característica de 19mm e módulo de finura de 7,02. Conforme ilustrado na Figura 18, a granulometria do agregado graúdo encontrou-se dentro dos limites normativos, atendendo a todos os parâmetros exigidos para seu uso em concretos, seguindo as diretrizes da NBR NM 248 ABNT (2003). O agregado também foi ensaiado para a determinação de suas massas específicas de acordo com a NBR 16917 ABNT (2021b), conforme mostrado na Tabela 10.

Figura 18 – Curva de distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 9 – Caracterização física do agregado miúdo

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

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 10 – 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 (%)	2,08

Fonte: Elaboração Própria

Para atingir a consistência desejada dos concretos foi adicionado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, trata-se de um aditivo orgânico que oferece benefícios como dispersão eficiente, excelente trabalhabilidade, redução da quantidade de água necessária para a mistura e aumento da resistência mecânica. O aditivo possui uma massa específica média de $1,08 \text{ g}/\text{cm}^3$, com uma variação de

$\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, e um pH médio de 3,0, com uma variação de $\pm 1,0$. A dosagem recomendada do aditivo varia de 0,2% a 2,0% em relação ao peso do cimento.

A água utilizada em todas as concretagens provém da rede pública de abastecimento local, sendo empregada tanto na mistura do concreto quanto no processo de cura por submersão.

3.2 ETAPA 2 – MOLDAGEM, CURA E PRÉ-CARREGAMENTO

Neste item são apresentados os procedimentos adotados para produção dos concretos. A execução dos traços foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LE-MAC), localizado no campus Alegrete/RS da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Além disso, também são apresentados neste tópico os ensaios de controle executados para o concreto no estado fresco (ensaios de consistência e massa específica), e os processos de moldagens dos corpos de prova, cura e abertura de fissuras.

3.2.1 Produção do concreto

O traço do concreto foi definido com base na dosagem realizada por Dacheri (2019) em sua pesquisa, por meio do método IPT/IBRACON. A definição do traço foi baseado na utilização convencional para concretos estruturais, de modo a obter valores de resistência à compressão média de 35 a 40 MPa. O traço unitário em massa utilizado foi 1:4,5 (cimento; agregados), com a utilização do cimento Portland (CP V ARI - RS) e um teor de argamassa de 48% para garantir a proporção ideal de argamassa nos materiais empregados. A relação água/cimento foi fixada em 0,42, um parâmetro crucial para a qualidade dos concretos desenvolvidos. Neste contexto, dois traços foram criados: T_{REF} , representando o traço de referência sem aditivo cristalizante, e T_{AC} , incorporando o aditivo cristalizante. Ambos os traços foram preparados seguindo os mesmos procedimentos e utilizando equipamentos padronizados, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. O aditivo superplastificante foi incluído nas composições dos concretos em uma proporção de 0,2% em relação ao peso de cimento, desempenhando um papel essencial na uniformidade da consistência em todos os traços. Nas tabelas 11 e 12 pode-se observar os traços unitários dos concretos para cada tipo de traço, respectivamente.

Tabela 11 – Dosagem dos traços de concreto

Traços	Teor de aditivo cristalizante (%)	Teor de aditivo superplastificante (%)	Teor de argamassa (%)	Consumo real de cimento (kg/m ³)
T_{REF}	0,0	0,2	48	412
T_{AC}	1,0	0,2	48	412

T_{REF} - Traço de referência (sem aditivo cristalizante);

T_{AC} - Traço com aditivo cristalizante.

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 12 – Detalhamento dos traços e quantidade de materiais para produção dos concreto

Identificação dos traços	Traço unitário em massa					
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo cristalizante	Aditivo superplastificante
T _{REF}	1	1,64	2,86	0,42	Não	Sim
T _{AC}	1	1,64	2,86	0,42	Sim	Sim

Fonte: Elaboração Própria

3.2.2 Mistura dos materiais

A produção da mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 180 litros. Antes da produção dos traços, foi separado uma pequena quantidade de materiais para realizar a imprimação da betoneira. Após, para produção dos traços os materiais foram dispostos na betoneira conforme as recomendações da literatura, seguindo uma ordem constante para os dois traços: 100% brita, 1/3 de água (aproximadamente), 100% do cimento, restante da água, aditivo superplastificante e por fim 100% da areia. No caso do traço com aditivo cristalizante em pó, o mesmo foi adicionado após a inserção de todos os materiais na betoneira.

3.2.3 Ensaio de consistência

Após a homogeneização dos materiais na betoneira, a trabalhabilidade do concreto foi determinada através do ensaio de Abatimento do Tronco de Cone, conhecido como Slump Test, conforme especificado pela norma NBR 16889 ABNT (2020). Esse ensaio foi realizado em todos os traços produzidos, assegurando a uniformidade de consistência para as misturas (com um valor fixado em 9 ± 2 cm). Além disso, para minimizar possíveis variações nas medições, o ensaio foi conduzido por um único operador, visando maior confiabilidade nos resultados obtidos.

3.2.4 Massa específica

Após a etapa de mistura e produção dos concretos, a avaliação da massa específica do concreto fresco foi conduzida de acordo com as diretrizes da NBR 9833 ABNT (2008). Esse ensaio foi realizado para cada betonada, executada pelo mesmo operador. Os valores de massa específica do concreto fresco obtidos para os traços produzidos foram em média de 2438 kg/m³. Esses dados são indicativos da densidade e compacidade do concreto fresco em cada caso, fornecendo informações importantes sobre sua qualidade e homogeneidade.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos 100x200mm para todos os ensaios realizados. O adensamento dos corpos de prova foi realizado de forma mecanizada, com o auxílio de

uma mesa vibratória, seguindo a NBR 5738 ABNT (2016). Optou-se por realizar adensamento em mesa vibratória para melhor padronização na moldagem dos corpos de prova. Na Tabela 13 é ilustrado o quantitativo de corpos de prova moldados por traço (T_{REF} e T_{AC}).

Tabela 13 – Quantitativo de corpos de prova por traço para os ensaios de controle

Identificação dos concretos		Número de CP's por ensaio			
		Resistência	Absorção	Ultrassom	Análise óptica
PC-7	0%	12	2*	3	1*
	50%	12	2*	3	
	80%	12	2*	3	
PC-28	0%	9	2*	3	
	50%	9	2*	3	
	80%	9	2*	3	
<i>Total de corpos de prova: 94 + 6 (Determinação da carga de ruptura 7 e 28 dias) = 100</i>					

* : Corpos de prova serrados em "fatias" de 50mm de espessura (3 fatias por CP)

PC-7 : Pré-carregamento aos 7 dias

PC-28 : Pré-carregamento aos 28 dias

Fonte: Elaboração Própria

Conforme mostrado na Tabela 13, para cada traço (T_{REF} e T_{AC}), foram moldados 100 corpos de prova que, após a moldagem, foram identificados e permaneceram em local protegido e sob temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas (Figura 19a), quando então foram desmoldados e submetidos ao processo de cura. No entanto, apenas os CP's utilizados para o ensaio de resistência à compressão axial foram descartados, os CP's utilizados nos demais ensaios, retornavam para cura para serem ensaiados novamente nas próximas idades. Logo, os corpos de prova utilizados no ensaio de absorção, ultrassom e análise óptica foram sempre os mesmos para cada idade de ensaio, visando acompanhar suas evoluções ao longo de 91 dias. Além disso, todos os corpos de prova foram retificados (Figura 19b) na idade de 5 dias após desmoldagem.

Figura 19 – Corpos de prova nos moldes e retificação



(a) Corpos de prova para os moldes

(b) Retificação dos CP's

Fonte: Elaboração Própria

3.2.6 Cura

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em cura submersa com água (Figura 20), onde permaneceram até as datas dos respectivos ensaios.

Figura 20 – Corpos de prova condicionados em cura submersa



Fonte: Elaboração Própria

3.2.7 Indução de fissuras

Para a indução dos danos (microfissuras) os corpos de provas foram pré-fissurados por compressão axial com três diferentes porcentagens de carregamentos (0%, 50% e 80%) em relação a sua carga de ruptura nas idades de 7 e 28 dias. Para determinação da carga de ruptura foram realizados ensaios de compressão (Figura 21) em três corpos de prova, com velocidade de 0,45 MPa/s de forma constante até o seu limite. Na sequência, foram determinados os valores médios de ruptura aos 7 e 28 dias. Sobre esses valores médios de rupturas (f_{cm}) foram calculados os percentuais de carregamento para aplicação dos danos nos concretos (50% do f_{cm} e 80% do f_{cm}).

Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão para realização do pré-carregamento nos CP's



Fonte: Elaboração Própria

A escolha do percentual de carregamento aplicado se justifica por promover danos internos (microfissuras) no corpo de prova sem levá-lo à ruptura total. Essa indução controlada de microfissuras no concreto permitirá uma avaliação pertinente em relação a eficácia dos aditivos cristalizantes na recuperação e/ou manutenção das propriedades avaliadas. A seguir será melhor detalhado o passo a passo para cada idade de pré-carregamento.

- **Pré-carregamento aos 7 dias:** Na idade de 7 dias, 54 corpos de prova foram retirados da cura e submetidos ao pré-carregamento (PC - 7 dias), após retornavam para o processo de cura submersa até a idade de 14 dias, idade em que parte dos CPs (51 CPs) foram submetidos aos ensaios de controle (resistência à compressão axial, velocidade de propagação de onda ultrassônica, absorvidade e análise óptica), retornando novamente para a cura após os ensaios. As amostras (9 CPs) destinadas aos testes de resistência à compressão

axial aos 14 dias eram descartadas após o ensaio. Na idade de 28 dias, os corpos de prova eram novamente retirados da cura para realização dos ensaios, retornando assim que os mesmos eram finalizados, com exceção dos CPs ensaiados à compressão axial, que eram descartados. Esse processo se repetiu também para as idades de 56 e 91 dias.

- **Pré-carregamento aos 28 dias:** Já na idade de 28 dias, mais 45 corpos de prova foram retirados da cura e submetidos ao pré-carregamento (PC - 28 dias), retornando para cura até a idade de 35 dias, onde foram realizados os ensaios de controle (resistência à compressão axial, velocidade de propagação de onda ultrassônica, absorvidade e análise óptica) nos corpos de prova (42 CPs), retornando novamente para a cura após os ensaios. Também com exceção do ensaio de resistência à compressão axial onde as amostras eram descartadas após realização do ensaio. Esse processo se repetia novamente para as idades de 56 e 91 dias.

3.3 ETAPA 3 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

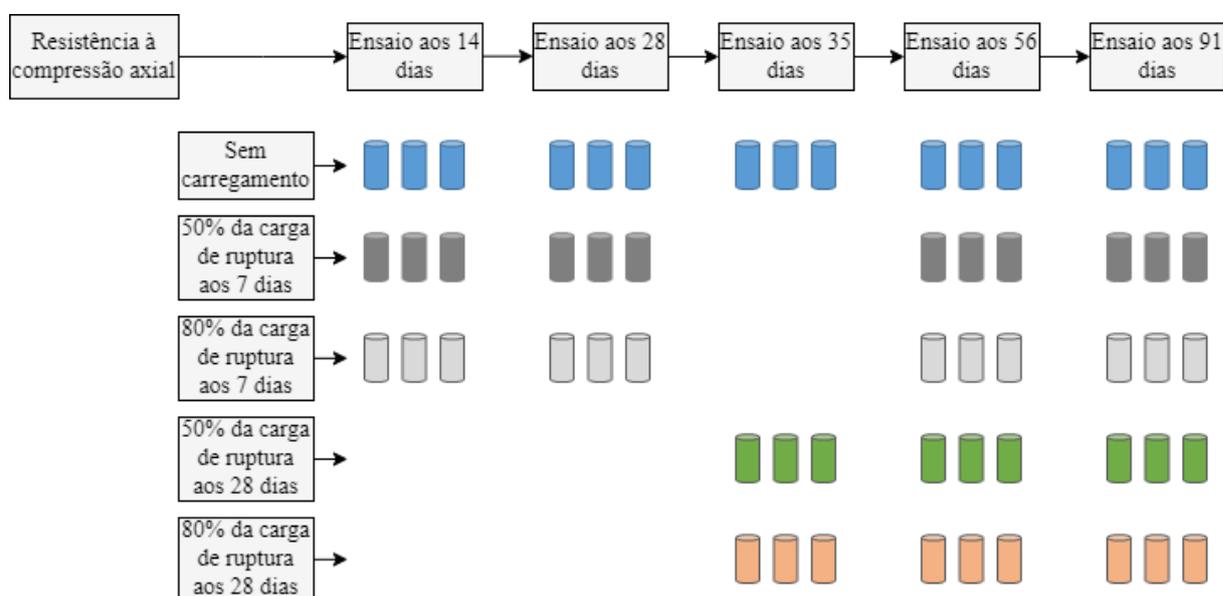
Nos itens 3.3.1 a 3.3.4 são descritos os ensaios de controle executados neste trabalho. Para a caracterização dos concretos foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e absorção capilar pelo método de Kelham. Para o acompanhamento do processo de autocicatrização foram realizados os ensaios de microscopia ótica e o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.

3.3.1 Resistência à compressão axial

Com o intuito de avaliar a caracterização do concreto quanto a sua resistência mecânica, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, nas idades de 14, 28, 56 e 91 dias (concretos sem pré-carregamento e pré-carregados aos 7 dias) e nas idades de 35, 56 e 91 dias (concretos sem pré-carregamento e pré-carregados aos 28 dias), conforme prescrito pela ABNT (2018b).

A realização do ensaio se deu no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC), na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), sendo utilizada uma prensa da marca EMIC de 1500 kN (Figura 21) a uma velocidade de aplicação de 0,45 MPa/s constante durante todo o ensaio. Em cada idade de ensaio foram rompidos 3 corpos de prova cilíndricos 100x200mm conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de resistência à compressão axial e idades de controle



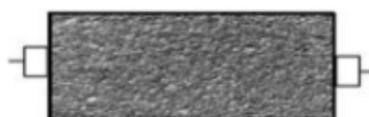
Fonte: Elaboração Própria

3.3.2 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

A determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica é um método não destrutivo amplamente utilizado para avaliar a velocidade de propagação das ondas longitudinais em concretos. Esse ensaio segue as normas estabelecidas pela NBR 8802 ABNT (2019), e tem como objetivo principal comparar a homogeneidade dos concretos, além de detectar possíveis falhas na concretagem.

Para analisar a influência das fissuras, optou-se pela técnica de transmissão direta, na qual os transdutores foram posicionados em bases opostas do corpo de prova cilíndrico conforme ilustrado na Figura 23. Em cada amostra foram efetuadas três leituras de velocidade de propagação da onda ultrassônica. Na análise dos dados, adotou-se a menor velocidade encontrada como parâmetro de referência.

Figura 23 – Posicionamento dos transdutores

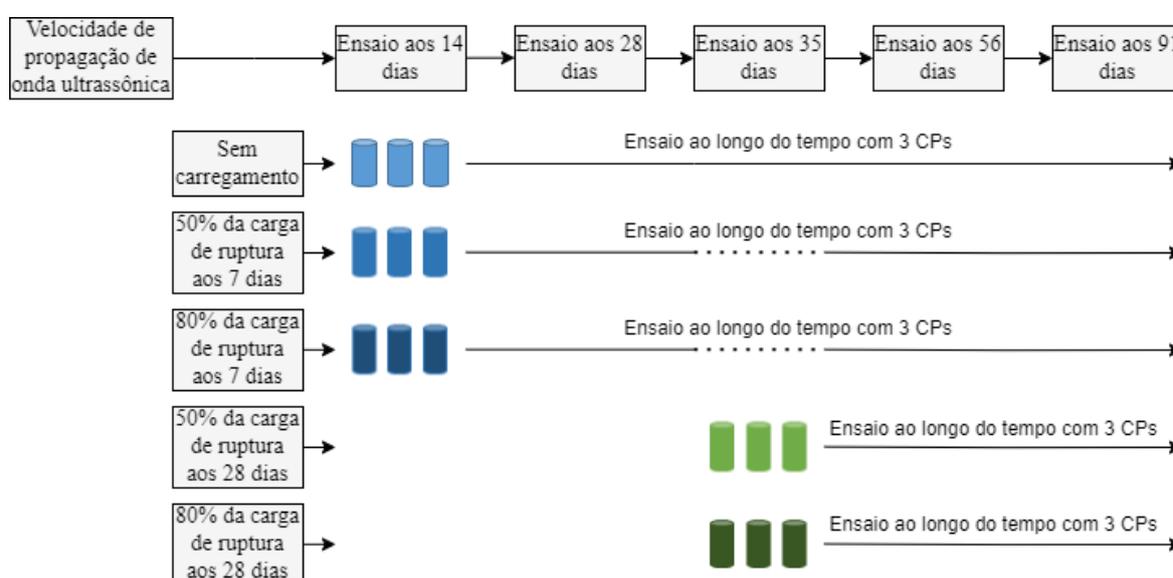


Fonte: Elaboração Própria

Para monitorar o desenvolvimento ao longo do tempo e identificar possíveis formações

de produto de autocicatrização, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas idades de 14, 28, 56 e 91 dias (concretos sem pré-carregamento e pré-carregados aos 7 dias) e nas idades de 35, 56 e 91 dias (concretos pré-carregados aos 28 dias), como apresentado na Figura 24, na qual está ilustrado a quantificação de CP's por traço para cada idade de ensaio. Os corpos de prova eram removidos da cura submersa sempre meia hora antes da realização do ensaio, para que suas superfícies não estivessem molhadas durante o procedimento.

Figura 24 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica e idades de controle



Fonte: Elaboração Própria

3.3.3 Ensaio de absorção capilar pelo Método de Kelham

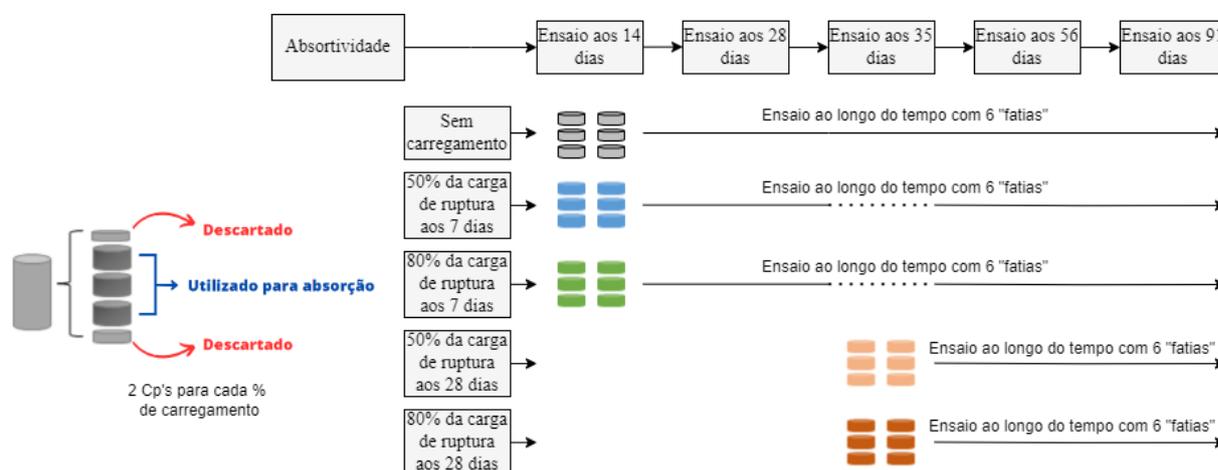
Para o ensaio de absorvidade foi utilizado um método não-normalizado de absorção por sucção capilar proposto por Kelham (1998). O método consiste em monitorar, ao longo do tempo, o aumento de massa aparente de um corpo de prova submerso em água e devidamente condicionado. Como variáveis de respostas deste ensaio, tem-se a taxa de penetração de água (absorvidade) e a resistência capilar.

Os procedimentos empregados na preparação das amostras e na condução do ensaio estão detalhados a seguir:

- Após a aplicação de diferentes porcentagens de pré-carregamento, foram serrados dois corpos de prova em fatias de 50mm de espessura. Para cada condição de pré-carregamento, foram ensaiadas seis fatias, três de cada corpo de prova (sendo as mesmas utilizadas para todas as idades de ensaio). Também, foi padronizado que 25mm de espessura de cada

extremidade do corpo de prova era descartado. A quantificação de CP's por traço para cada idade de ensaio está ilustrado na Figura 25;

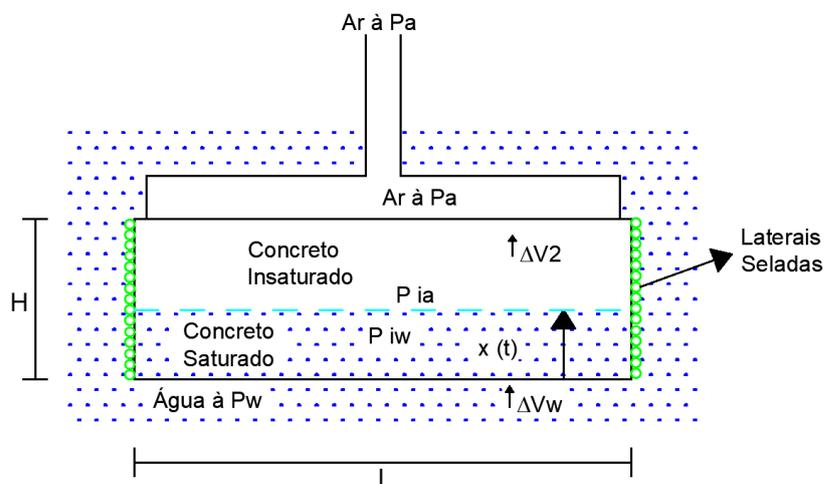
Figura 25 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de absorvidade e idades de controle



Fonte: Elaboração Própria

- Com as amostras serradas, as mesmas foram pesadas para determinação da massa inicial e posteriormente armazenadas em estufa, à temperatura de 50°C, para secagem até que atingissem a constância de massa (diferença de 0,05% entre pesagens sucessivas, efetuadas em intervalos de 24 horas);
- Após constância em massa, as fatias foram retiradas da estufa e resfriadas até a temperatura ambiente;
- Com os corpos de prova resfriados, realizou-se a impermeabilização de suas laterais com selante de poliuretano PU (Figura 27a), com o objetivo de garantir o fluxo unidirecional da água. Para secagem do selante foram mantidos em temperatura ambiente durante um período de 24 horas. Na sequência, fixou-se na face superior com selante de poliuretano PU, uma tampa de PVC com um canudo plástico de 8mm de diâmetro no centro (Figura 27b). Ressalta-se que o objetivo do canudo foi garantir o equilíbrio de pressão entre a região interna da tampa de PVC e a atmosfera (Figura 26);

Figura 26 – Esquema do ensaio de absorvidade de Kelham



Fonte: Adaptado de Moura (2000)

- Com as amostras finalizadas (secagem da colagem e vedação dos corpos de prova), o ensaio foi iniciado. Utilizou-se um sistema composto de uma caixa plástica com água para imersão das amostras, e uma balança hidrostática com uma grade acoplada para manter os corpos de prova sempre imersos durante as pesagens, conforme ilustrado na Figura 28.
- Foram realizadas medidas de ganho de massa nas amostras, em períodos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 e 600 minutos. A partir de então, foram realizadas pesagens em períodos sucessivos de 24 horas até a saturação total do corpo de prova (variação de massa inferior a 0,05% entre as três últimas pesagens). Salienta-se que os intervalos de pesagens, principalmente nas primeiras horas, sofreram pequenas variações de tempo devido a grande quantidade de amostras a serem pesadas simultaneamente, além da dificuldade de equilibrar a balança e a amostra e um curto intervalo de tempo.
- Os valores de massa acumulados, são representados em um gráfico em função da raiz quadrada do tempo. A partir desse gráfico, é possível realizar a interpolação de duas retas: a primeira representa a fase inicial de absorção e a segunda a fase de saturação. O ponto de encontro dessas retas, é denominado ponto de saturação ou "nick point", correspondente ao ponto em que ocorre a passagem da fase de absorção para a fase saturação do corpo de prova.
- Por fim, para cada amostra foi determinado: a taxa de absorção ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$), obtida pela divisão da inclinação da reta, correspondente a divisão da fase de absorção inicial pela área da seção transversal da amostra; e a resistência capilar (h/m^2), obtida pelo quadrado

da divisão do valor do ponto de saturação (localizado no eixo das abcissas), pela espessura média do corpo de prova, em metros.

- Após a conclusão do ensaio, os corpos de prova (CP's) permaneceram submersos, com o objetivo de promover a autocicatrização. Posteriormente, próximo às datas dos ensaios, novamente os CP's eram retirados da cura, passando por um processo de secagem em estufa a 50°C, até alcançarem uma massa constante. Após a secagem, os CP's eram resfriados, submetidos a novos ensaios e, em seguida, retornavam ao processo de cura submersa, até o próximo ciclo.

Figura 27 – Preparação das amostras para o ensaio de absorvidade



(a) Aplicação do poliuretano PU nas laterais do corpo de prova

(b) Fixação das tampas de PVC e canudo plástico

Fonte: Elaboração Própria

Figura 28 – Execução do ensaio de absorvidade



(a) Corpos de prova submersos

(b) Pesagem em balança hidrostática

Fonte: Elaboração Própria

3.3.4 Microscopia óptica

O ensaio de microscopia óptica teve como propósito avaliar a autocicatrização de fissuras ao longo do tempo, utilizando imagens como meio de análise. Para a realização desse estudo, empregou-se o microscópio ótico ELIKLIV model:EDM43 (Figura 29), com ampliação de até 1000x, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Construção (GPTeC), da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

Na idade de 14 dias, foram selecionados 2 corpos de provas ensaiados à compressão, no qual foram levados novamente a ruptura até o surgimento de fissuras entre 0,1 e 0,4mm. Após, os corpos de prova fissurados foram serrados em fatias de 50mm de espessura e avaliados microscopicamente para a seleção das fissuras que seriam utilizados no ensaio de microscopia óptica. Foram escolhidos 3 fatias (sendo as mesmas utilizadas para todas as idades de ensaio) para cada traço utilizado na pesquisa, sendo elas analisadas nas idades de 14, 28, 35, 56 e 91 dias, com o objetivo de acompanhar a evolução e visualização do fechamento das fissuras ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 31. Como o método adotado para geração de fissuras foi induzir o corpo de prova a uma fissuração "forçada", o fator "pré-carregamento" não poderia ser considerado, sendo então divididas apenas em amostra referência e amostra com aditivo cristalizante.

Para que nas diferentes idades da microscopia óptica as imagens fossem geradas do mesmo local, foram demarcadas as zonas de fissuras em cada fatia de amostra, conforme observado na Figura 30.

Figura 29 – Microscópio óptico ELIKLIV model:EDM43



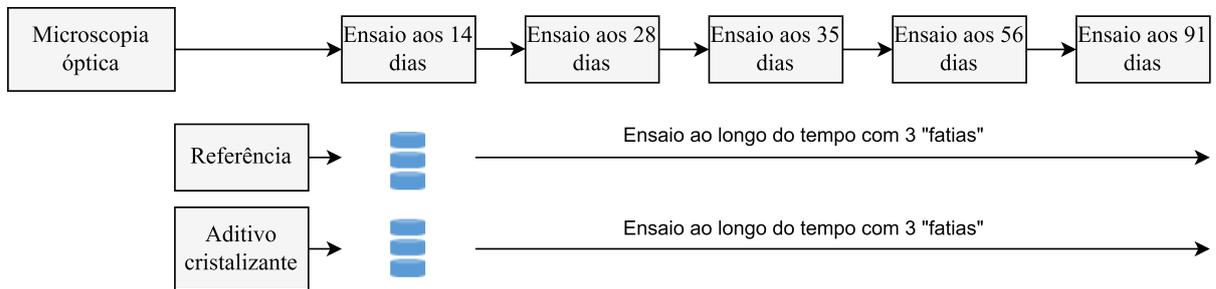
Fonte: Elaboração Própria

Figura 30 – Demarcação das zonas de fissura para análise de microscopia óptica



Fonte: Elaboração Própria

Figura 31 – Quantificação de CP's por traço para ensaio de microscopia óptica e idades de controle



Fonte: Elaboração Própria

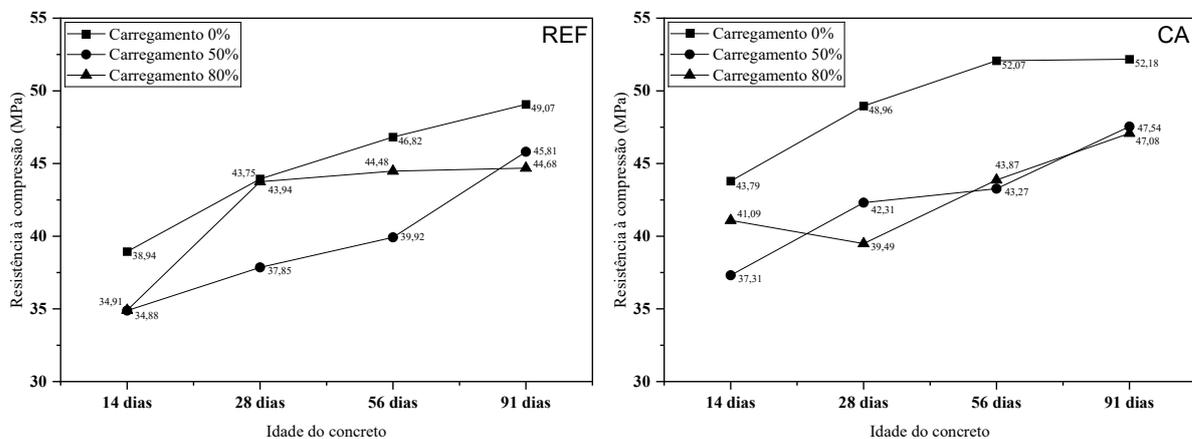
4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados de cada experimento são apresentados juntamente com uma análise e interpretação correspondentes. Essa abordagem visa contribuir para as conclusões da pesquisa, as quais serão apresentadas no último capítulo deste trabalho. É relevante destacar que todos os dados apresentados nas seções subsequentes foram processados de maneira a eliminar dados espúrios. A identificação desses dados ocorreu por meio de uma análise simples dos dados obtidos nos experimentos, resultando na exclusão de dados discrepantes, demasiadamente grandes ou pequenos em comparação com os demais.

4.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial dos concretos foi realizado para todos os concretos estudados, conforme descrito na metodologia deste trabalho (3.3.1). Os resultados médios de resistência à compressão axial para os concretos pré-carregados na idade de 7 dias são apresentados na Figura 32. As médias foram estabelecidas a partir da ruptura de três corpos de prova para cada idade.

Figura 32 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial para amostras pré-carregadas aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Realizando uma análise dos resultados da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados na idade de 7 dias, nota-se padrões distintos entre o concreto sem aditivo cristalizante (referência) e o concreto com aditivo cristalizante (CA). Comparando o concreto REF em todas as condições de carregamento, nota-se uma tendência de manutenção ou aumento da resistência à compressão axial com o passar do tempo, comportamento esperado para compósitos cimentícios. Comparando-se, inicialmente, o comportamento do concreto de referência por idade de ensaio (Figura 32), observa-se uma tendência de redução na resistência à compressão

axial com o aumento do percentual de carregamento (exceto para a idade de 28 dias), indicando uma possível influência negativa da carga aplicada sobre suas propriedades mecânicas. Comparando o concreto contendo o CA em todas as condições de carregamento, também nota-se uma tendência de manutenção ou aumento da resistência à compressão axial com o passar do tempo. Os valores de resistência do traço com CA, em geral, mostraram-se superiores aos do concreto de Referência (sem CA), exceto para o traço com carregamento de 80% nas idades de 28 e 56 dias. Essa tendência sugere que o aditivo cristalizante não apenas contribui para resistências iniciais mais elevadas, mas também confere uma resposta mais favorável às idades posteriores, evidenciando sua influência positiva na durabilidade e desempenho mecânico do concreto a longo prazo. Sendo assim, é apresentado na Tabela 14 a variação dos concretos com aditivo cristalizante em comparação com o referência (sem aditivo cristalino).

Tabela 14 – Variação da resistência à compressão axial de amostras com CA pré-carregadas aos 7 dias em comparação ao concreto referência

Idade	Percentual de carregamento (%)	Resistência média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Varição em relação ao Ref (%)
14	0	43,79	0,59	1,34	+11,07
	50	37,31	0,66	1,76	+6,51
	80	41,09	0,94	2,28	+15,04
28	0	48,96	1,52	3,10	+10,25
	50	42,31	1,32	3,11	+10,54
	80	39,49	4,00	10,12	-10,78
56	0	50,66	0,31	0,61	+7,57
	50	43,27	1,08	2,49	+7,74
	80	43,87	1,51	3,44	-1,39
91	0	52,18	0,64	1,22	+5,96
	50	47,54	1,31	2,75	+3,63
	80	47,08	1,22	2,59	+5,02

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se, inicialmente, um aumento da resistência à compressão axial com a variação da idade do ensaio de controle para os percentuais de carregamento de 0% e 50%, com um aumento mais acentuado para os concretos sem carregamento (0%). Para os concretos com o carregamento de 80% a tendência de comportamento não é nítida, pois os resultados mostram uma oscilação da resistência à compressão axial dos concretos com a variação da idade de controle, com alguns casos de aumento e outros de diminuição. Nota-se também que, apesar do incremento de resistência observado ao longo do tempo nos concretos pré-carregados com CA, nenhum destes concretos atingiu os patamares de resistência dos seus concretos de referência (0%). No entanto, as amostras contendo CA sem carregamento (0%), apresentam um aumento da resistência à compressão em todas as idades estudadas, tendo seu maior aumento encontrado na idade de 28 dias, com um aumento de cerca de 13,79%. Uma possível justificativa para esse incremento na resistência mecânica com o aditivo cristalizante, pode estar relacionada a

sua capacidade de preencher vazios, além de desempenhar o papel de ativador da hidratação do cimento, melhorando assim a microestrutura do material (CAPPELLESSO et al., 2016).

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação a idade do concreto, o percentual de carregamento e ao uso de aditivo cristalino, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global, através do software *Origin-Pro*, com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 15. Valores de probabilidade (p) inferiores a 0,05 em cada comparação entre médias indicam de forma significativa a presença de diferenças estatísticas entre os parâmetros testados. Também, considerando que o foco principal do trabalho está centrado na avaliação do efeito do aditivo cristalizante, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) a pares (Tabela 16) entre os concretos de referência (REF) e aqueles com aditivo cristalizante (CA). Esta análise foi conduzida para cada percentual de carregamento e para cada idade do concreto. Este procedimento estatístico proporciona uma compreensão mais sólida sobre como as variáveis controladas influenciam os resultados do experimento, permitindo conclusões mais precisas acerca das relações entre o percentual de carregamento e a adição de aditivo cristalizante na resistência à compressão axial do concreto para as amostras pré-carregadas aos 7 dias. Já a aplicação da ANOVA a pares permite identificar se existem diferenças estatisticamente significativas nas propriedades dos concretos REF e CA, considerando as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 15 – Análise da variância (ANOVA) global da resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 7 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	157,8	1	157,8	56,047	< .0001	Sim
Percentual de carregamento	411,4	2	205,7	73,042	< .0001	Sim
Idade do concreto	839,7	3	279,9	99,381	< .0001	Sim
Erro	135,1	48	2,8	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F;
p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 16 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias

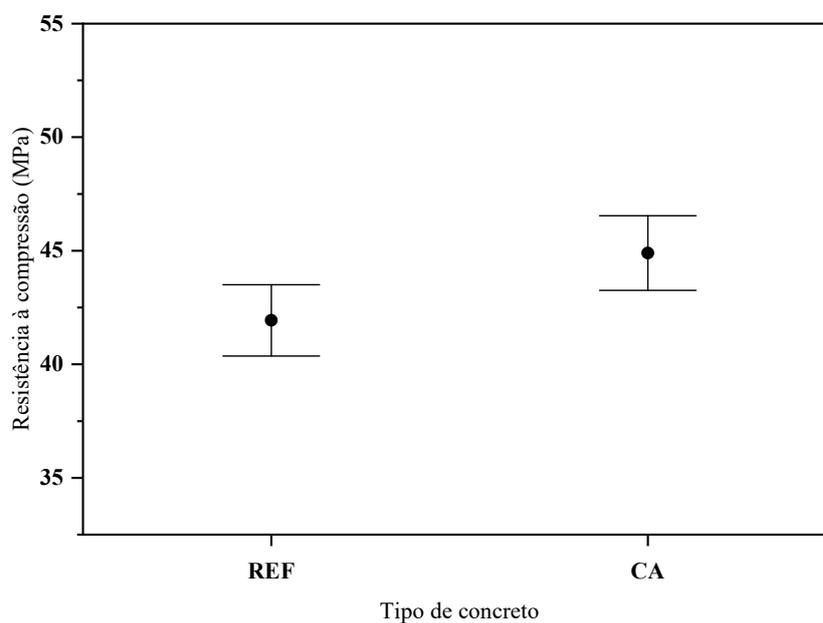
Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	14	0,00902	Sim
	28	0,01420	Sim
	56	0,00167	Sim
	91	0,01451	Sim
50	14	0,04494	Sim
	28	0,03343	Sim
	56	0,03093	Sim
	91	0,15022	Não
80	14	0,00232	Sim
	28	0,22678	Não
	56	0,73206	Não
	91	0,07264	Não

Fonte: Elaboração Própria

Entre as variáveis independentes analisadas na Tabela 15, a ANOVA global aponta que, tanto o uso de aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*) quanto o *percentual de carregamento* e a *idade do concreto* foram relevantes para a resistência à compressão axial, apresentando uma significância estatística. Esses resultados sugerem que, para este estudo, o uso de aditivo cristalizante, juntamente com a variação do percentual do carregamento aplicado e a idade do concreto, são fatores relevantes para a resistência à compressão axial dos concretos. Na Tabela 16, são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Observa-se que, para os concretos sem pré-carregamento, houve significância em todas as idades analisadas. O mesmo padrão é observado para os concretos pré-carregados com 50%, exceto na idade de 91 dias, onde os resultados não foram significativos. Entretanto, quando há aplicação de carregamento com 80% da carga de ruptura, apenas na idade de 14 dias os resultados se mostraram significativos.

A partir da ANOVA global apresentada na Tabela 15, realizou-se uma análise isolada de cada variável significativa. As informações sobre o comportamento das variáveis significativas em relação a variável de resposta foram obtidas pelo programa em que a análise ANOVA foi realizada. Na Figura 33 é ilustrado o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 7 dias em função do *tipo de concreto*.

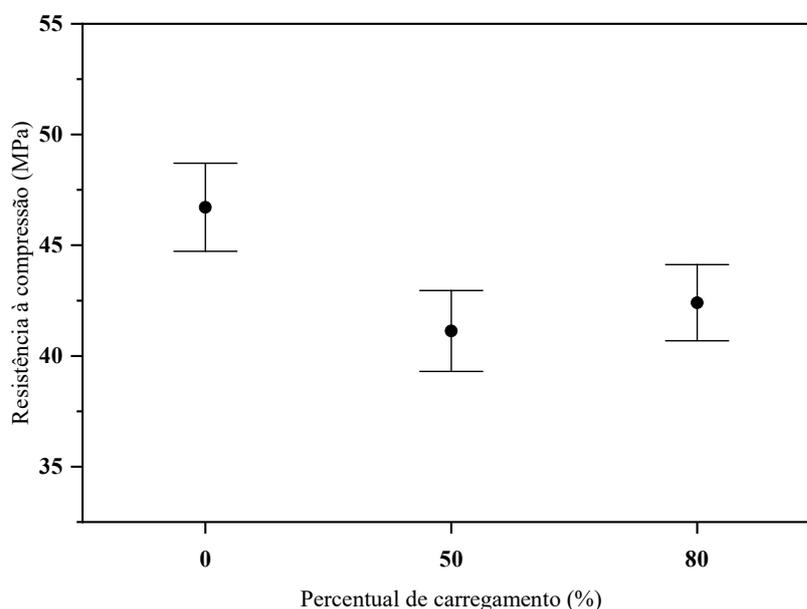
Figura 33 – Efeito isolado da variável "tipo de concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme a Figura 33, a incorporação de aditivo cristalizante na mistura de concreto revela um notável aumento na resistência mecânica dos concretos em comparação aos sem adição de cristalizante, chegando a um aumento de aproximadamente 7,1%. Já a Figura 34 mostra o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 7 dias em função dos *percentuais de carregamento* aplicados.

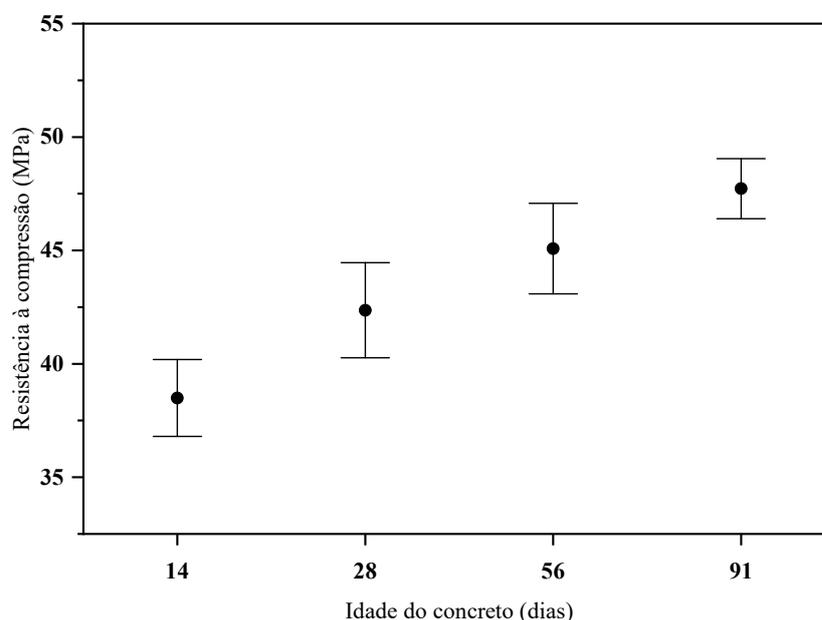
Figura 34 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme Figura 34, a aplicação de diferentes percentuais de carregamento (50% e 80%) revela uma notável redução na resistência mecânica dos concretos em comparação aos que não sofreram carregamento. No entanto, ao analisar os dados associados aos traços com 50% e 80% de carregamento, conforme evidenciado na Figura 34, observa-se que não há diferenças estatisticamente significativas nos resultados. Por fim, a Figura 35 mostra o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 7 dias em função da *idade do concreto*.

Figura 35 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme ilustrado na Figura 35, nota-se que ao longo de todas as idades de análise dos concretos (14, 28, 56 e 91 dias) houve um aumento importante na resistência mecânica, apresentando um ganho, em média, de 9,5% dos 14 -> 28 dias, 8% dos 28 -> 56 dias e cerca de 6,7% dos 56 -> 91 dias. Essa tendência de aumento na resistência mecânica ao longo do tempo é consistentemente observada em estudos anteriores. Por exemplo, Venquiaruto (2017), Borg et al. (2017) e Ziegler (2020) também encontraram um aumento progressivo na resistência do concreto ao longo de períodos similares de cura. Por outro lado, alguns estudos, como os de Takagi et al. (2018) e Geraldo, Guadagnini e Camarini (2021), ao avaliarem a resistência à compressão ao longo de 91 dias, não reportaram variações significativas nos resultados. Os autores apontam que a resistência máxima em concretos de alta resistência inicial é alcançada aos 28 dias.

Resultados semelhantes foram identificados por Roig-Flores et al. (2015), que registraram um aumento de 15% na resistência à compressão de concretos contendo CA aos 28 dias e pré-carregados aos 2 dias, em comparação ao concreto de referência. Os autores sugerem que esse aumento pode ser atribuído ao efeito de preenchimento proporcionado pelo material, facilitando o preenchimento dos poros na matriz cimentícia. Além disso, observa-se que o material também pode ter desempenhado um papel como ativador da hidratação do cimento, contribuindo para a densificação de C-S-H na matriz cimentícia (AZARSA; GUPTA; BIPARVA, 2018). Ziegler (2020) também constatou um aumento de 15% a 55% na resistência à compressão aos 28 dias, com idade de abertura de fissura fixada em 3 dias, utilizando 0,22% de CA em

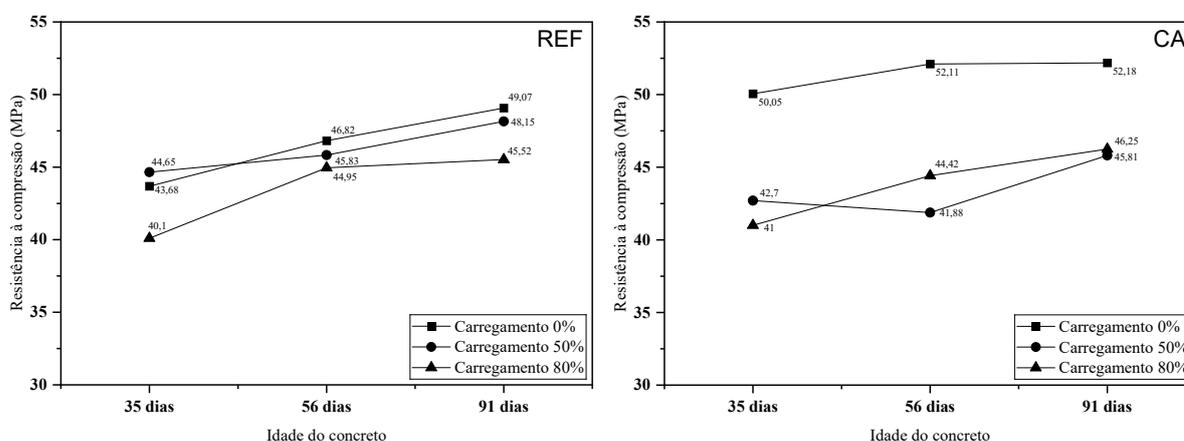
diferentes tipos de misturas.

Além disso, outros estudos como os de Ferrara, Krelani e Carsana (2014), Cappellesso et al. (2016) e Reddy, Theja e Sashidhar (2018), analisaram o incremento de 0,6% – 1,1% de CA, em amostras sem aplicação de pré-carregamento e com aplicação aos 3 dias, para avaliar seu desempenho mecânico em relação a outros concretos (referência). No entanto, os resultados obtidos pelo autores foram distintos em relação ao ganho de resistência aos 28 dias, especialmente quando o CA foi adicionado. Enquanto Cappellesso et al. (2016) e Reddy, Theja e Sashidhar (2018) observaram ganhos de 16% e 11% na resistência à compressão, respectivamente, Ferrara, Krelani e Carsana (2014) não identificaram aumento na resistência em comparação com o concreto de referência. Reddy, Theja e Sashidhar (2018) atribuíram o aumento de resistência ao preenchimento de vazios por C-S-H e calcita. O mesmo foi relatado por Vieira (2008) em seu estudo, a autora avaliou a cura em diferentes ambientes como medida de recuperação de microfissuras, sem a utilização de CA, porém com aplicação de pré-carregamento nas idades de 1, 3 e 7 dias. No entanto, não foram observadas alterações significativas na resistência à compressão axial de concretos submetidos a carregamentos precoces nas idades iniciais, indicando que os cimentos de alta resistência inicial já atingem em torno de 82% da resistência apresentada aos 28 dias já nas primeiras idades. Ferreira e Pinheiro (2017) também avaliaram a influência do uso de aditivo cristalizante no processo de autocicatrização de concretos, por meio de amostras pré-fissuras na idade de 2 dias. As amostras foram curadas sob imersão em água, e o teor de CA utilizado foi fixado em 3%, no qual foram utilizados para comparação com os concretos de referência. Os autores concluíram que a adição do aditivo não proporcionou a recuperação das propriedades mecânicas, visto que os concretos de referência apresentaram uma maior resistência à compressão na idade de 28 dias. No entanto foi verificado o surgimento de uma estrutura cristalina nas fissuras após 28 dias de cura submersa em água, o que corrobora com as imagens de análise óptica apresentadas no item 4.4. Pazderka e Hájková (2016), Azarsa, Gupta e Biparva (2018) e Geraldo, Guadagnini e Camarini (2021) examinaram o impacto do uso de 2% de teor de aditivo cristalino no processo de autocura. Com exceção de Pazderka e Hájková (2016), que não observaram um aumento significativo na resistência à compressão dos concretos analisados aos 28 dias, Azarsa, Gupta e Biparva (2018) e Geraldo, Guadagnini e Camarini (2021) demonstraram que a resistência à compressão aos 28 dias das amostras que continham CA com pré-carregamento aplicado aos 7 dias, apresentou um impacto significativo na recuperação da resistência mecânica após o período de cura. Zhang et al. (2021) e Guignoni et al. (2015), investigaram os efeitos da adição do CA (com teor de 4,5 – 8,0% do peso de cimento) no fenômeno da autocura, em relação as propriedades mecânicas, por meio de ensaios de compressão aos 28 dias. Ambos estudos revelaram um aumento de 16% e 20%, respectivamente, na resistência à compressão, em comparação com as amostras que não continham CA, indicando que sua adição foi benéfica para que houve aumento de sua resistência à compressão.

Os resultados médios do ensaio de resistência à compressão nos concretos pré-carregados aos 28 dias são apresentados na Figura 36. Nota-se que, em todas as condições de carregamento,

o CA exibe resistências superiores em comparação ao referência.

Figura 36 – Resultados médios do ensaio de resistência à compressão axial para amostras pré-carregadas aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Em geral, observa-se na Figura 35 uma tendência de crescimento da resistência com o passar do tempo para ambos os concretos. Para todas as idades de controle (Figura 36), os concretos com incorporação de aditivo cristalizante e não submetidos aos carregamentos apresentaram os melhores resultados. Nenhum dos concretos submetidos a danos aos 28 dias ultrapassou os patamares de resistência obtidos para os concretos que permaneceram íntegros (sem carregamento). Analisando o concreto sem aditivo cristalizante (referência), observa-se uma variação nas resistências à compressão axial com diferentes percentuais de carregamento. No entanto, não segue uma tendência linear clara, destacando a complexidade das interações entre carregamento e propriedades do material. Em particular, o concreto de referência com 50% de carregamento apresenta valores mais altos em comparação com as outras condições de carregamento na idade de 28 dias. Por sua vez, o concreto com aditivo cristalizante (CA) demonstrou uma consistência superior em todas as condições de carregamento. Mesmo com variações nos percentuais de carregamento, o CA continua a demonstrar um desempenho favorável nas idades subsequentes de 35, 56 e 91 dias. Isso sugere que o aditivo cristalizante contribui para a melhoria das propriedades mecânicas do concreto não apenas nas idades iniciais, mas também a longo prazo, conferindo-lhe maior estabilidade sob diferentes níveis de carregamento.

Tabela 17 – Variação da resistência à compressão axial de amostras com CA pré-carregadas aos 28 dias em comparação ao concreto referência

Idade	Percentual de carregamento (%)	Resistência média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Varição em relação ao Ref (%)
35	0	50,05	0,40	0,79	+12,72
	50	42,70	1,72	4,02	-4,56
	80	41,00	1,06	2,58	+2,19
56	0	52,11	0,31	0,59	+10,15
	50	41,88	1,32	3,15	-9,43
	80	44,42	1,34	3,01	-1,19
91	0	52,18	0,64	1,22	+5,96
	50	45,81	0,49	1,06	-5,10
	80	46,25	1,55	3,35	+1,57

Fonte: Elaboração Própria

Analisando a Tabela 17, a partir da Figura 36, nota-se que as amostras contendo CA sem carregamento (0%), apresentaram um acréscimo na resistência à compressão nas três idades de estudo (35, 56 e 91 dias), tendo seu maior aumento encontrado na idade de 35 dias (7 dias após pré-carregamento), com um aumento de cerca de 12,72%, resultado semelhante ao observado nos concretos pré-carregados aos 7 dias, conforme mostrado na Tabela 14. Por outro lado, as amostras com aplicação de pré-carregamento (50% e 80%) apresentaram um decréscimo em sua resistência à compressão em comparação com o concreto referência para as três idades em estudo, com exceção dos concretos com percentual de carregamento de 80% aos 35 dias, que apresentou um acréscimo de 2,19% em relação ao referência.

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação a idade do concreto, o percentual de carregamento e ao uso de aditivo cristalino para amostras pré-carregadas aos 28 dias, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 18, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 19.

Tabela 18 – Análise da variância (ANOVA) global para a resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	8,9	1	8,9	5,350	0,02654	Sim
Percentual de carregamento	279,5	2	139,7	83,134	< .0001	Sim
Idade do concreto	150,6	2	75,3	44,813	< .0001	Sim
Erro	60,5	36	1,6	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 19 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias

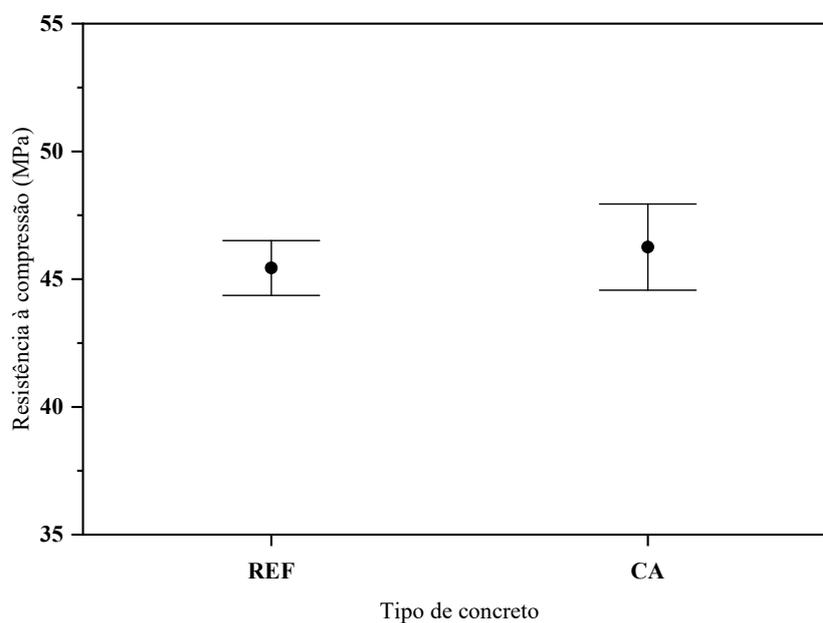
Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	35	< .00001	Sim
	56	0,00166	Sim
	91	0,01451	Sim
50	35	0,17299	Não
	56	0,01363	Sim
	91	0,08273	Não
80	35	0,44664	Não
	56	0,70370	Não
	91	0,63298	Não

Fonte: Elaboração Própria

Observando as variáveis independentes analisadas na Tabela 18, a ANOVA global aponta que tanto o uso do aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*) quanto o *percentual de carregamento* e a *idade do concreto*, assim como nos concretos pré-carregados aos 7 dias, também apresentam significância estatística. Sugerindo que o uso de aditivo cristalizante, juntamente com a variação do percentual do carregamento aplicado e a idade do concreto, são fatores relevante na determinação da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 28 dias. Na Tabela 19, são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Observa-se que, para os concretos sem pré-carregamento, houve significância em todas as idades analisadas (35, 56 e 91 dias). Para os concretos pré-carregados com 50%, apenas a idade de 91 dias mostrou resultados significativos. Entretanto, quando há aplicação de carregamento com 80% da carga de ruptura, nenhuma idade de ensaio apresentou resultados significativos.

A partir da ANOVA global apresentada na Tabela 18, realizou-se uma análise isolada de cada variável significativa. As informações sobre o comportamento das variáveis significativas em relação a variável de resposta foram obtidas pelo programa em que a ANOVA foi realizada. Na Figura 37 mostra o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 28 dias em função do uso de aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*).

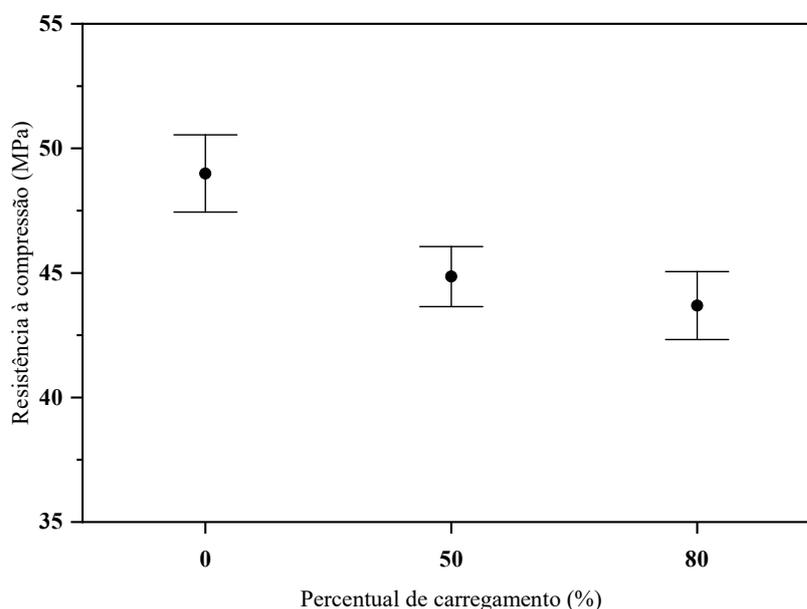
Figura 37 – Efeito isolado da variável "Tipo de concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme indicado na Figura 37, a utilização de aditivo cristalizante revela um notável incremento na resistência mecânica dos concretos quando comparados aos concretos sem carregamento (0%), mostrando comportamento semelhante aos concretos pré-carregados aos 7 dias. Já na Figura 38 é mostrado o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 28 dias em relação ao *percentual de carregamento*.

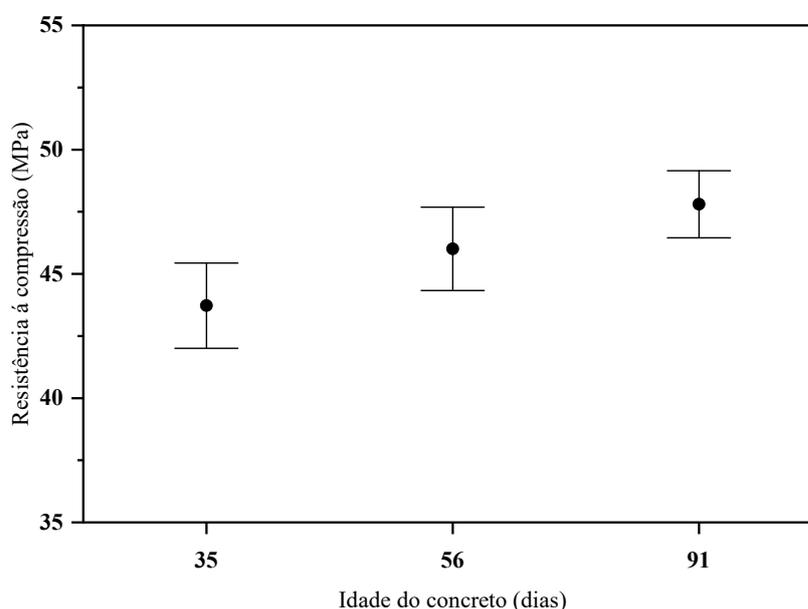
Figura 38 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme indicado na Figura 38, a variação nos percentuais de carga (0%, 50% e 80%) revelam um notável incremento na resistência mecânica dos concretos que não foram submetidos a pré-carregamento (0%), em comparação com aqueles que foram expostos a carregamentos (50% e 80%). Entretanto, ao examinar os dados relacionados aos traços com 50% e 80% de carregamento, como destacado na Figura 38, constata-se a ausência de diferenças estatisticamente significativas nos resultados, conforme indicado na ANOVA a pares da Tabela 19. Mostrando comportamento semelhante aos concretos pré-carregados aos 7 dias. É interessante observar que esse padrão de comportamento pode estar relacionado ao tipo de cimento empregado, visto que, cimentos de alta resistência inicial atingem o ápice de sua resistência já nas primeiras idades. Na Figura 39 é mostrado o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos pré-carregados aos 28 dias em relação à *idade do concreto*.

Figura 39 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a resistência à compressão de concretos pré-carregados aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

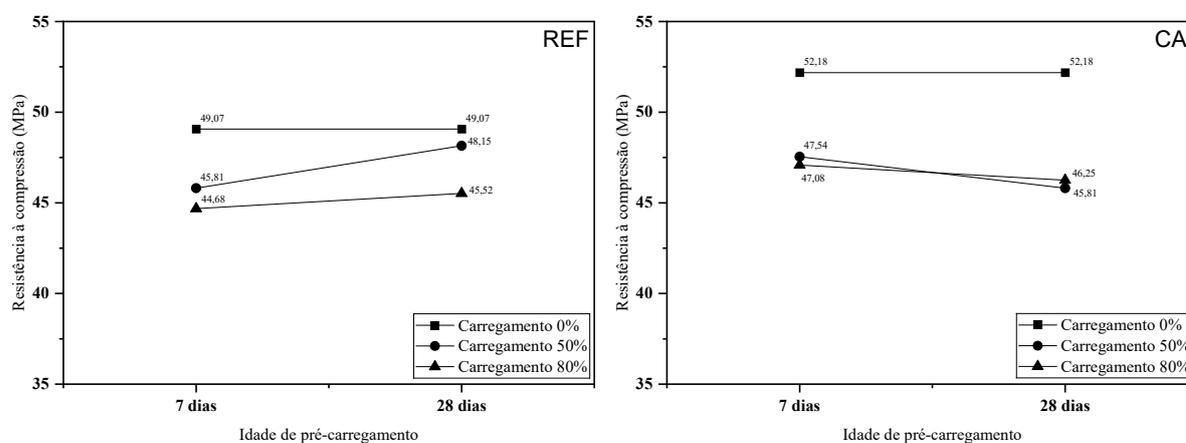
Conforme ilustrado na Figura 39, observa-se que com o passar do tempo (35, 56 e 91 dias), a resistência à compressão aumenta consideravelmente, chegando a um aumento, em média, de 6,3% dos 35 -> 56 dias, e cerca de 5,7% dos 56 -> 91 dias. Resultados semelhantes ao encontrado por Marques et al. (2019), que observaram um acréscimo de 2,6% na resistência à compressão de concretos pré-fissurados aos 28 dias da idade de 56 -> 84 dias. Assim como Cuenca, Tejedor e Ferrara (2018), que por meio da utilização de 0,8% de CA em concretos reforçados com fibra para avaliação da autocicatrização e recuperação as propriedades mecânicas, observaram um pequeno acréscimo de resistência dos 28 -> 56 dias, chegando à cerca de 1% de acréscimo. Takagi et al. (2018), também avaliaram o uso de CA em concretos pré-fissurados aos 28 dias, e obtiveram um acréscimo de 2,0% na resistência à compressão tanto dos 28 -> 56, quanto dos 56 -> 84 dias. Vieira (2008) também constatou o aumento da resistência à compressão em concretos devido à microfissuração provocada pela aplicação do pré-carregamento aos concretos estudados, os quais empregaram o mesmo tipo de cimento deste estudo. Silva (2016), ao avaliar a retração por secagem em concretos semelhantes aos de Vieira (2008), complementa essa justificativa para o aumento da resistência à compressão. Segundo a autora, isso pode ser atribuído à compactação da matriz cimentícia e a quebra dos compostos menos resistentes que constituem sua microestrutura. Nesse processo, ocorre o preenchimento dos vazios de maior dimensão, bem como a exposição dos grãos anidros de cimento. Segundo Mehta e Monteiro (2014), cuja análise incidiu sobre a relação *a/c* de concretos com adição de CA, esse comportamento é justificado pelo enfraquecimento progressivo causado à matriz cimentícia pelo

aumento da porosidade resultante do aumento relativo da água na mistura. Os pesquisadores também apontam que concretos com baixo consumo de água tendem a melhorar a resistência da zona de transição e que os cristais formados pelos produtos de hidratação tendem a apresentar tamanhos menores, aumentando assim a área superficial e intensificando as forças de contato responsáveis pelas propriedades mecânicas do concreto.

Alguns autores, buscando avaliar a pré-fissuração aos 28 dias de concretos com aditivo cristalizante, obtiveram resultados semelhantes aos encontrados nessa pesquisa. Maines et al. (2022) avaliaram a ação do uso de aditivo cristalizante no fechamento das fissuras ao longo do tempo e verificaram o potencial de recuperação das propriedades mecânicas. Para o estudo, os concretos foram mantidos em cura submersa até a idade de pré-fissuração (28 dias), e após, foram realizados ensaios de resistência à compressão nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias pós-fissuração. Como resultado, os autores concluíram que as amostras pré-fissuradas apresentaram uma redução de sua resistência à compressão quando comparado com o concreto referência (sem pré-fissuração) para todas as idades ensaiadas, apresentando uma redução de 17,2%, 9,8%, 20,5% e 20,6%, respectivamente. Marques et al. (2019) analisaram o desempenho de concretos com CA, onde parte dos concretos foram avaliados aos 28 dias, e outra parte foi submetida a pré-fissuração aos 28 dias. As amostras fissuradas foram ensaiadas aos 28 dias pós-fissuração (56 dias) e 56 dias pós-fissuração (84 dias). Sendo assim, os autores concluíram que aos 56 e 84 dias, o concreto referência sofreu uma redução de 27,3% e 26,4% de sua resistência, respectivamente, após ser fissurado aos 28 dias, em comparação ao sem carregamento. Já para os concretos com CA aos 56 e 84 dias fissurado aos 28 dias, houve um acréscimo na resistência de 19,6% e 22,6%, respectivamente, quando comparado ao concreto sem carregamento. Por fim, quando comparado o concreto CA com o referência, com exceção do sem carregamento (onde o concreto CA apresentou redução 16,6% na resistência à compressão), houve um aumento na resistência tanto para 28 dias quanto para os 56 dias pós-fissuração, de 37,1% e 38,8%, respectivamente. Reddy, Theja e Sashidhar (2018) avaliaram a capacidade de autocura do concreto com aditivo cristalino (CA) em diferentes tipos de exposições ambientais, utilizando 1,1% de CA e pré-fissuração aos 28 dias. Como resultados aos 42 dias, houve um aumento considerável da capacidade de recuperação de resistência mecânica para todas as condições de exposição, quando comparados com o referência (sem carregamento).

Para melhor compressão dos efeitos do pré-carregamento no processo de autocatrização, foi realizada uma análise comparativa dos resultados de resistência à compressão axial na idade de 91 dias, entre os concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias, conforme pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Resultados médios de resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Analisando os resultados apresentados na Tabela 40, ao observar a resistência à compressão do concreto referência (REF), sugere-se que, em ambas as idades de pré-carregamento (7 e 28 dias), a resistência diminui à medida que o percentual de carregamento aumenta. No caso do concreto contendo CA, observa-se uma tendência semelhante, com a resistência à compressão diminuindo conforme o pré-carregamento aumenta. A variação é mais notável nos casos de 50% e 80% de carregamento, quando comparados com o caso sem carregamento (0%). Quando comparado os dois tipos de concreto, nota-se que o concreto CA tende a apresentar resistência à compressão mais baixa em comparação com o concreto referência em situações de pré-carregamento mais elevado (50% e 80%). Entretanto, para os concretos CA a resistência à compressão tende a aumentar nos casos em que não há carregamento aplicado, quando comparados com o concreto referência.

Para melhor avaliação da influência das variáveis controladas (idade pré-carregamento, percentual de carregamento e aditivo cristalino) no desempenho da resistência mecânica na idade de 91 dias, realizou-se uma Análise de variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%, conforme observado na Tabela 20, e uma ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas (uma vez que a influência do aditivo cristalizante é um dos focos relevantes desta pesquisa), conforme mostrado na Tabela 21.

Tabela 20 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para a resistência à compressão axial de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	19,2	1	19,2	11,412	0,00200	Sim
Percentual de carregamento	153,5	2	76,7	45,484	< .0010	Sim
Idade de carregamento	0,05	1	0,05	0,033	0,8560	Não
Erro	40,4	24	1,6	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F;
p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 21 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	-	0,01451	Sim
50	PC 7	0,15022	Não
	PC 28	0,08273	Não
80	PC 7	0,07264	Não
	PC 28	0,63430	Não

Fonte: Elaboração Própria

A análise apresentada na Tabela 20 aponta que, para os 91 dias, tanto o uso do aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*) quanto o *percentual de carregamento*, apresentaram significância estatística. Indicando que o uso de aditivo cristalizante, juntamente com a variação do percentual do carregamento aplicado, são fatores relevante na determinação da resistência à compressão axial dos concretos na idade de 91 dias. Em contrapartida, a variável *idade de carregamento* não se mostrou significativa para a idade de 91 dias. Na Tabela 21, são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de carregamento aplicado. Observa-se que, apenas os concretos sem pré-carregamento (0%) apresentaram significância, quando comparados com os pré-carregados aos 50% e 80%, independente da idade em que foi aplicado o carregamento.

Para este caso, a análise de variância (ANOVA) global, também mostrou que a variável "*Tipo de concreto*" apresentou significância estatística ao nível de confiança de 95%. Este resultado indica que, enquanto a variável *Tipo de concreto* pode ter um efeito significativo aos 91 dias, quando todas as variáveis são consideradas conjuntamente, certas combinações específicas de percentual de carregamento e idade de carregamento acabam por sua vez não resultando em diferenças estatisticamente significativas.

Alguns autores, como Cappellesso et al. (2016), Azarsa, Gupta e Biparva (2019), Reddy, Ravitheja e Sashidhar (2020), Wang et al. (2021) e Wang et al. (2023) também encontraram um aumento na resistência à compressão de concreto com adição de CA sem aplicação de pré-

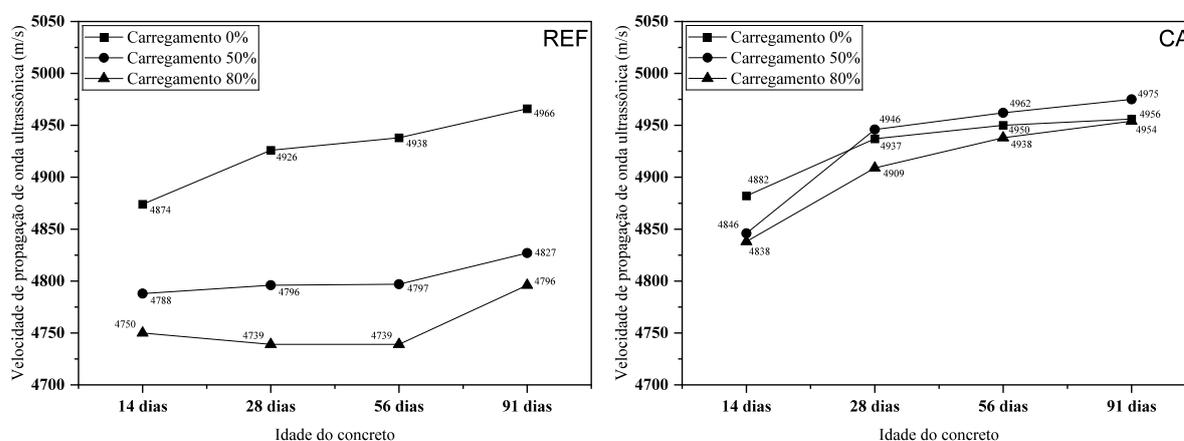
carregamento. Este aumento na resistência à compressão em concretos com adição de CA pode ser atribuído ao efeito de preenchimento proporcionado pelas misturas cristalinas, o que pode resultar no preenchimento dos poros da matriz (CAPPELLESSO et al., 2016). Além disso, os aditivos cristalinos podem ter funcionado como ativadores da hidratação do cimento, contribuindo para a densificação do C-S-H na matriz cimentícia, conforme observado por Roig-Flores et al. (2015).

4.2 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica é um ensaio não destrutivo utilizado na construção civil, que visa avaliar a compacidade e homogeneidade do concreto, detectar possíveis falhas internas de concretagem e identificar o aparecimento e a profundidade de fissuras, possibilitando a realização de comparação qualitativa em termos de resistência à compressão ou dos módulos de elasticidade dos concretos (ZHONG; YAO, 2008). Amadio (2018) apud Whitehurst (1966), correlacionaram resultados do ensaio de ultrassom com a compacidade dos concretos. Segundo os autores, concretos com velocidade de propagação de onda ultrassônica ($v \geq 4500$ m/s) apresentam excelente compacidade; concretos com velocidade entre 3500-4500 m/s compacidade boa; concretos com velocidade entre 3000-3500 m/s compacidade regular; concretos com velocidade entre 2000-3000 m/s compacidade ruim e concretos com velocidade < 2000 m/s péssima compacidade. Autores como Ramírez (2015), Al-Numan et al. (2015), Venquiaruto (2017), Muduli e Mukharjee (2019), Ribeiro (2021) e Resende (2021) tem usado essa classificação para correlacionar a compacidade dos concretos com a velocidade de propagação de onda ultrassônica. A análise das variações na velocidade dessas ondas ultrassônica possibilitam a detecção de regiões heterogêneas no interior de uma estrutura, uma vez que elas correspondem a quantidade de vazios e poros presentes na estrutura, permitindo a identificação de descontinuidades no concreto (LORENZI et al., 2009).

Os resultados médios dos ensaios de propagação de onda ultrassônica dos concretos pré-carregados (7 e 28 dias) com CA e de referência são apresentados nas Figuras 41 e 45, respectivamente.

Figura 41 – Resultados médios de velocidade de propagação da onda ultrassônica para amostras pré-carregadas aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Os concretos que receberam pré-carregamento aos 7 dias (Figura 41) apresentaram velocidade de propagação de onda ultrassônica ao longo do tempo acima de 4500 m/s, indicando excelente compactidade, apesar dos danos impostos nas primeiras idades. A análise da Figura 41 para os concretos de referência (sem CA), mostram que para o caso dos concretos sem carregamento (0%), observou-se um aumento significativo na velocidade de propagação da onda ao longo do tempo, atingindo seu pico aos 91 dias. Segundo Cappellesso (2018), este fenômeno pode estar associado à melhora na matriz cimentícia devido ao ganho de resistência em função da hidratação contínua do cimento, mas também associada à recuperação dos danos, quando a fissura é selada, as ondas serão capazes de passar por esse produto gerado e o tempo do percurso é reduzido, podendo a integridade ser consolidada com o tempo. O aumento da idade dos concretos também é um fator que influencia neste ensaio, pois com a hidratação contínua do cimento, há redução da porosidade e possível colmatção dos poros, aumentando assim, a velocidade de propagação de onda no concreto (ZHONG; YAO, 2008). No entanto, ao considerar os concretos com percentual de carregamento de 50%, observou-se uma menor velocidade de propagação da onda, que pode estar associada a microfissuração do concreto. Segundo Esteves, Medeiros Junior e Medeiros (2018) caminhos sem heterogeneidade são o caminho mais curto para passagem da onda, o que acaba gerando uma maior velocidade de propagação. No entanto, se há heterogeneidades, como fissuras, ocorre modificações na estrutura interna do concreto e dificultando assim a passagem da onda. Assim, o tempo de propagação é maior que no primeiro caso, reduzindo a velocidade de propagação da onda ultrassônica. No caso dos concretos com percentual de carregamento de 80%, observou-se uma redução ainda maior na velocidade de propagação da onda, indicando uma maior probabilidade de incidência de microfissuras. Nota-se também um maior incremento da velocidade de propagação de onda ultrassônica nestes concretos aos 91 dias, em comparação aos concretos que receberam o carregamento de 50%.

Este comportamento sugere que as microfissuras formadas permitiram uma maior percolação da água durante a cura submersa em longos períodos, resultando em uma maior hidratação aos 91 dias, evidenciada pelo aumento significativo na velocidade de propagação da onda nesse ponto.

A análise dos concretos com CA (Figura 41) indica que para um percentual de carregamento de 0%, houve uma maior velocidade de propagação da onda na primeira idade, atribuída à ausência de formação de microfissuras. No caso do carregamento com percentual de 50%, foram observadas fissuras devido à redução da velocidade aos 7 dias. No entanto, acredita-se que o aditivo cristalizante conseguiu preencher os poros (e ou microfissuras) formados até os 28 dias, resultando em uma velocidade de propagação da onda superior aos concretos sem carregamento (0%). Já no carregamento com percentual de 80%, houve uma maior formação de fissuras, presumivelmente com tamanho superior às formadas no carregamento com 50%, o que resultou em um preenchimento mais lento dos poros. No entanto, a velocidade de propagação da onda aos 91 dias foi semelhante à do sem carregamento (0%).

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação ao uso de aditivo cristalino, a idade do concreto e o percentual de carregamento aplicado, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 22, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 22 – Análise da variância (ANOVA) global para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 7 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	152996	1	152996	39,343	< .001	Sim
Percentual de carregamento	105743	2	52871	13,596	< .001	Sim
Idade do concreto	59809	3	19936	5,126	0,003	Sim
Erro	186660	48	3888	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F;

p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 23 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	14	0,89690	Não
	28	0,83928	Não
	56	0,89556	Não
	91	0,63187	Não
50	14	0,23213	Não
	28	0,01161	Sim
	56	-	-
	91	0,06935	Não
80	14	0,13753	Não
	28	0,13737	Não
	56	0,05888	Não
	91	0,03280	Sim

Fonte: Elaboração Própria

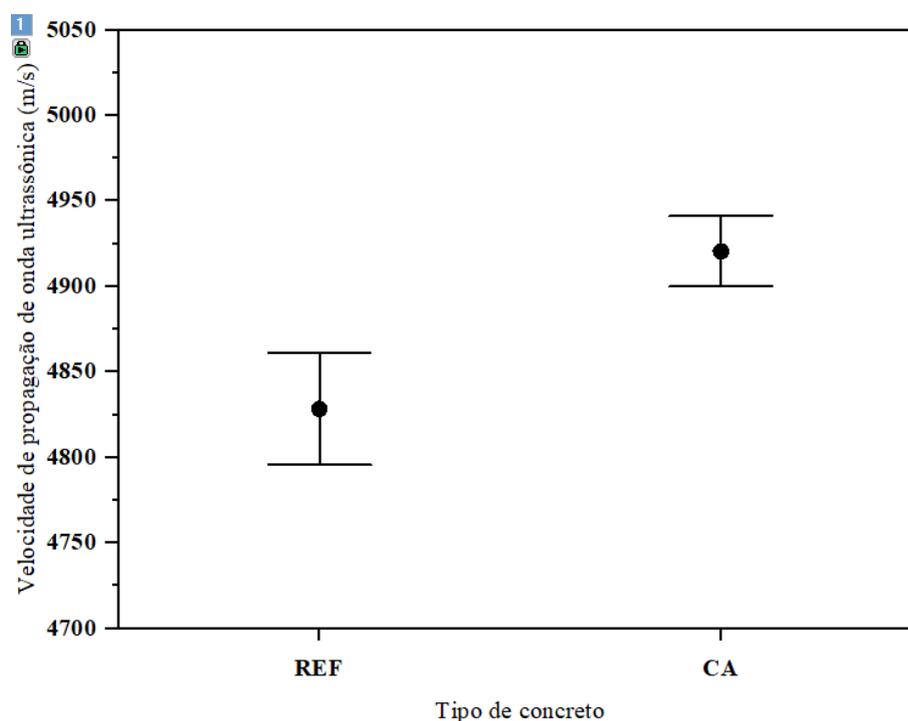
Observando as variáveis independentes analisadas na Tabela 22, a ANOVA global aponta que todas se mostraram significativas para a velocidade de propagação de onda ultrassônica em amostras pré-carregadas aos 7 dias. Isso sugere que, para esta situação de análise, há influência da idade do concreto (14, 28, 56 e 91 dias), do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%) e também do uso do aditivo cristalizante (CA) sobre a velocidade de onda ultrassônica. Na Tabela 23 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Observa-se que, para concretos pré-carregados na idade de 7 dias, apenas os concretos com pré-carregamento 50% aos 28 dias e os concretos com pré-carregamento 80% aos 91 dias, apresentaram significância estatística.

Nota-se que, na análise de variância (ANOVA) global, o teste mostrou que a variável "*Tipo de concreto*" apresentou significância estatística ao nível de confiança de 95%. Isto sugere que, ao considerar todas as amostras e combinações de fatores simultaneamente, as diferenças entre os tipos de concreto (REF e CA) são estatisticamente significativas. No entanto, ao realizar uma análise ANOVA a pares, que compara especificamente o efeito de diferentes níveis de carregamento (0%, 50% e 80%) para cada idade do concreto (14, 28, 56 e 91 dias) conforme mostrado na Tabela 23, foram observados vários pares de combinações que não mostraram significância estatística. Essa aparente discrepância pode ser explicada pelo fato de que a ANOVA global considera todas as possíveis interações e combinações de variáveis simultaneamente, o que pode diluir o efeito significativo de certas combinações específicas de fatores. Em outras palavras, na ANOVA global, a variabilidade introduzida por combinações de fatores que são significativas pode mascarar os efeitos não significativos que ocorrem em comparações específicas. Ao isolar pares de carregamento e idade do concreto, é possível identificar interações não significativas que a análise global não capturou. Isso indica que, enquanto a variável "*Tipo de concreto*" pode ter um efeito significativo quando todas as variáveis são consideradas con-

juntamente, certas combinações específicas de carregamento e idade do concreto resultam em diferenças não significativas.

Nas Figuras 42, 43 e 44 são mostrados os efeitos isolados da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos pré-carregados aos 7 dias em relação ao uso de aditivo cristalizante (*tipo de concreto*), *percentual de carregamento* e *idade do concreto*. Todos os gráficos foram gerados a partir do software utilizado para a ANOVA global.

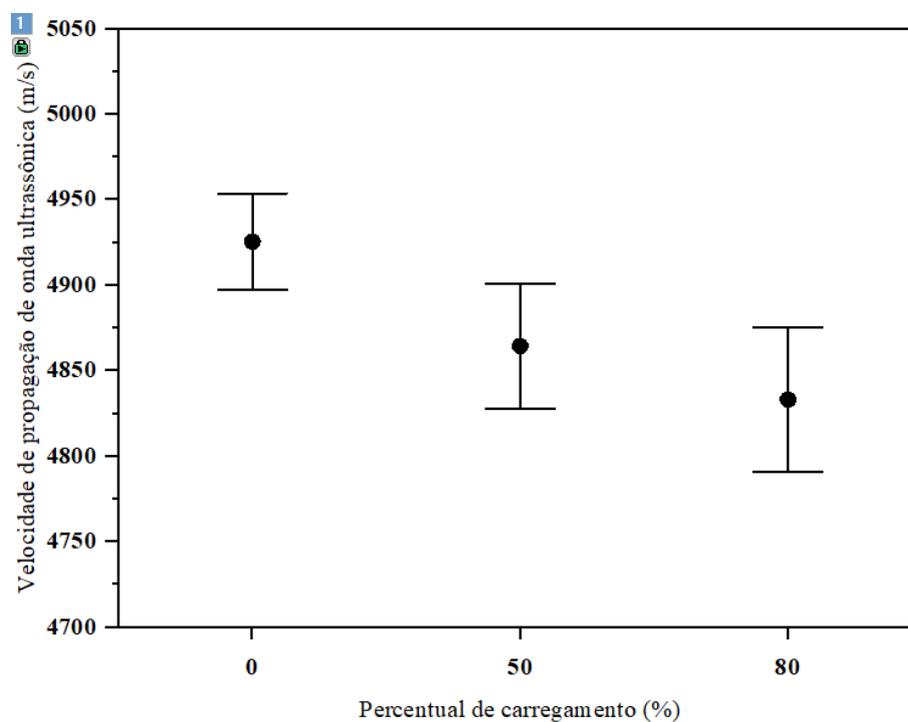
Figura 42 – Efeito isolado da variável "tipo de concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme observado na Figura 42, nota-se que o uso de aditivo cristalizante em amostras de concreto pré-carregadas na idade de 7 dias, promoveu um aumento da velocidade de propagação da onda ultrassônica em comparação ao concreto referência. Segundo Oliveira (2019) esse comportamento indica o aumento da taxa de hidratação e formação de hidratos exibidos pelas amostras com CA.

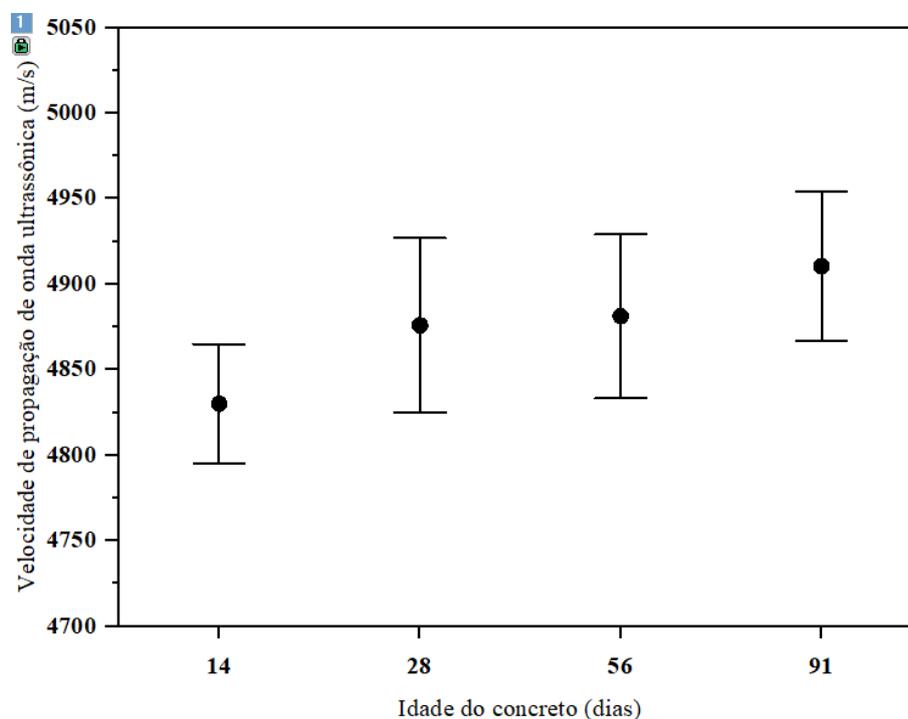
Figura 43 – Efeito isolado da variável "percentual de carregamento" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Conforme observado na Figura 43, nota-se que para uma idade de aplicação de pré-carregamento aos 7 dias, a variação do pré-carregamento dos concretos promove uma redução na velocidade de propagação de onda ultrassônica. Os concretos pré-carregados com 50% e 80% apresentam uma redução de 1,3% e 2,1% na velocidade de propagação de onda, respectivamente, quando comparados ao concreto sem carregamento (0%).

Figura 44 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

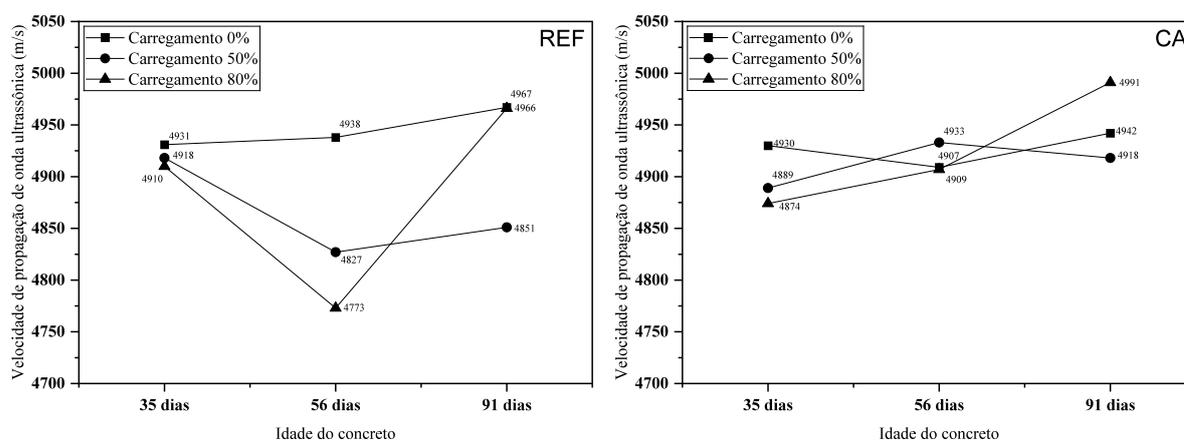
Conforme ilustrado na Figura 44, observa-se que com o passar do tempo (14, 28, 56 e 91 dias), a variação da idade do concreto promove um aumento da velocidade de onda ultrassônica, obtendo um aumento de 1,0% dos 14 -> 28 dias, dos 28 -> 56 dias a velocidade de mantém praticamente constante e dos 56 -> 91 dias apresentou um aumento de cerca de 1,2%.

Vieira (2008) identificou padrão semelhante a esta pesquisa ao analisar a propagação de ondas ultrassônicas em amostras fabricadas com cimento CP V ARI, com uma relação água/cimento de 0,50, tanto em amostras pré-carregadas aos 1, 3 e 7 dias com percentuais distintos de carregamento (25%, 50% e 75%), quanto em amostras de referência sem carregamento (0%), ensaiadas na idade de 7 e 28 dias. De acordo com a autora, nos concretos sujeitos a diferentes percentuais de carga, houve uma notável redução nos valores de velocidade ultrassônica em comparação com aqueles que não foram submetidos a nenhuma carga. O mesmo foi relatado por Cappellesso (2018), que avaliou a propagação de ondas ultrassônica em concretos produzidos com CP V ARI, pré-carregados aos 3 e 28 dias e ensaiados nas idades de 14, 28, 42, 56, 70, 84 e 91 dias. A autora observou que as velocidades nessas idades, medidas pós-fissuração aos 7 dias, resultaram em valores de velocidade de onda superiores aos encontrados aos zero dias (idade de pré-fissuração). Segundo Mehta e Monteiro (2014), isso pode ser explicado pela manifestação de uma resistência superior do concreto em comparação com a registrada na fase inicial de abertura de fissuras. Tal comportamento se deve à redução do volume de vazios capilares, ocorrida pela hidratação da pasta de cimento e ao avanço da idade

do concreto. Sturup, Vecchio e Caratin (1984) também afirmam que em idades iniciais (3, 7 e 14 dias) os valores da velocidade de onda ultrassônica são muito sensíveis a pequenas variações de resistência à compressão, enquanto que nas idades mais avançadas nota-se grandes variações de resistência que correspondem a variações mínimas no valor da velocidade.

Os resultados médios do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica nos concretos pré-carregados aos 28 dias estão apresentados na Figura 45.

Figura 45 – Resultados médios de velocidade de propagação da onda ultrassônica para amostras pré-carregadas aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Os concretos que receberam pré-carregamento aos 28 dias (Figura 41) assim como os pré-carregados aos 7 dias, também apresentaram velocidade de propagação de onda ultrassônica ao longo do tempo acima de 4500 m/s, indicando excelente compacidade, mesmo com danos impostos em idades mais avançadas. Segundo a análise da Figura 45 os concretos de referência (sem CA) e sem carregamento (0%), mostraram um acréscimo na velocidade de propagação da onda ao longo do tempo, atingindo seu pico aos 91 dias. Esse comportamento se justifica semelhante ao sem carregamento dos concretos pré-carregado aos 7 dias (Figura 41), onde Zhong e Yao (2008), Cappellesso (2018) associam esse acréscimo à melhora na matriz cimentícia devido a hidratação contínua do cimento e ao aumento da idade dos concretos, que por sua vez, contribuem com a hidratação contínua do cimento, redução da porosidade e em uma possível colmatação dos poros. Ao considerar os concretos com percentual de carregamento de 50%, observa-se pouco ou nenhum efeito de preenchimento das fissuras até 91 dias. Como houve um maior tempo pra hidratação do cimento, há uma menor formação de fissuras (maior velocidade após carregamento), devido uma maior densificação da amostra nessa idade. No caso dos concretos com percentual de carregamento de 80%, observou-se uma maior redução de velocidade de onda, o maior carregamento pode ter favorecido o percolamento de água em regiões em que haviam cimento anidro, resultando no aumento de velocidade aos 91 dias (ideia similar ao de 7 dias).

Realizando uma análise dos concretos com CA (Figura 45) observa-se que para um percentual de carregamento de 0%, houve uma maior velocidade de propagação da onda na primeira idade (35 dias), atribuída à ausência de formação de fissuras (similar ao de 7 dias). No caso do carregamento com percentual de 50%, observou-se um importante aumento de velocidade de propagação da onda na segunda idade de ensaio, mostrando a ação do aditivo cristalizante nas primeiras idades após o dano aos concretos. No entanto, após 56 dias, pouca ou nenhuma mudança foi observada na velocidade de onda ultrassônica. Já para os concretos com carregamento de 80%, foi observado o efeito de incremento de velocidade de onda ultrassônica até os 91 dias. Sendo assim, para pré-carregamento de concretos com CA aos 28 dias, o aditivo parece apresentar uma melhor atuação quando associado ao maior o percentual de pré-carregamento com maior carregamento, mesmo em longas idades, porém esta tendência de comportamento precisa ser melhor estudada.

Segundo Van Tittelboom et al. (2010), Ferrara, Krelani e Carsana (2014), as fissuras afetam a propagação das ondas através dos corpos de prova de concreto. Como as ondas ultrassônicas se propagam muito mais rapidamente no concreto endurecido (4.000 m/s – 5.000 m/s) do que na água (1.480 m/s) ou no ar (350 m/s), elas se propagam ao redor de uma fissura aberta, levando a um aumento no tempo de transmissão. No entanto, quando a trinca estiver selada, as ondas poderão atravessar os produtos de cura e isso reduz o tempo de propagação.

Com relação à compacidade dos concretos, verifica-se que as amostras de referência e as amostras com dosagem de CA, independentemente do pré-carregamento ou não, apresentaram velocidade de onda ultrassônica dentro dos limites que classificam o concreto como sendo de "excelente compacidade", para todas as idades de controle, apresentando velocidades de propagação da onda ultrassônica acima de 4500m/s, segundo a NBR 8802 ABNT (2019).

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho da propriedade em estudo, especialmente em relação ao uso de aditivo cristalino, a idade do concreto e o percentual de carregamento aplicado, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 24, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 25.

Tabela 24 – Análise da variância (ANOVA) global para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	7944	1	7944	2,370	0,132	Não
Percentual de carregamento	20812	2	10406	3,104	0,057	Não
Idade do concreto	30069	2	15034	4,485	0,018	Sim
Erro	120655	36	8391	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

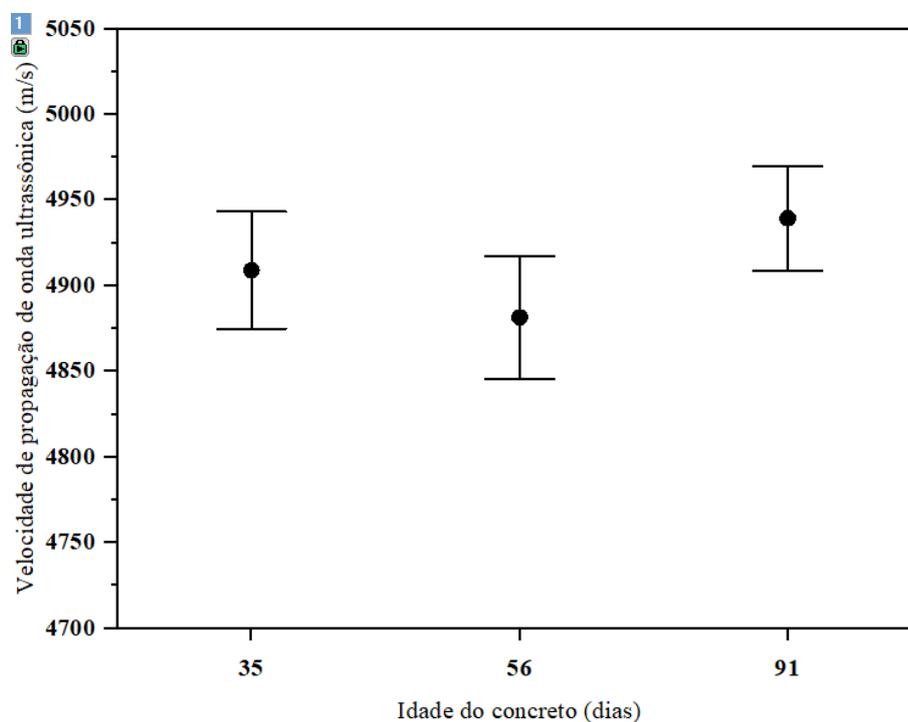
Tabela 25 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	35	0,99980	Não
	56	0,54894	Não
	91	0,63187	Não
50	35	0,75866	Não
	56	0,00668	Sim
	91	0,11348	Não
80	35	0,28536	Não
	56	0,00260	Sim
	91	0,42983	Não

Fonte: Elaboração Própria

Observando as variáveis independentes analisadas na Tabela 24, a ANOVA global aponta que tanto o uso de aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*) quanto o *percentual de carregamento* não se mostraram significativas para a velocidade de propagação de onda ultrassônica em amostras pré-carregadas aos 28 dias. No entanto, somente a variável *idade do concreto* apresentou significância estatística. Isso sugere que, para esta situação de análise, não há influência do tipo de concreto (com ou sem uso de CA) e nem do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%) sobre a velocidade de onda ultrassônica. Entre as variáveis independentes, apenas a variação da *idade do concreto* foi um fator relevante na determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica em amostras pré-carregadas aos 28 dias. Na Tabela 25 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Observa-se que, para concretos pré-carregados na idade de 28 dias, apenas os concretos com pré-carregamento 50% e 80% na idade de 56 dias apresentaram significância estatística. Na Figura 46 é mostrado o efeito isolado da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos pré-carregados aos 28 dias em relação a *idade do concreto*.

Figura 46 – Efeito isolado da variável "idade do concreto" sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos pré-carregados aos 28 dias

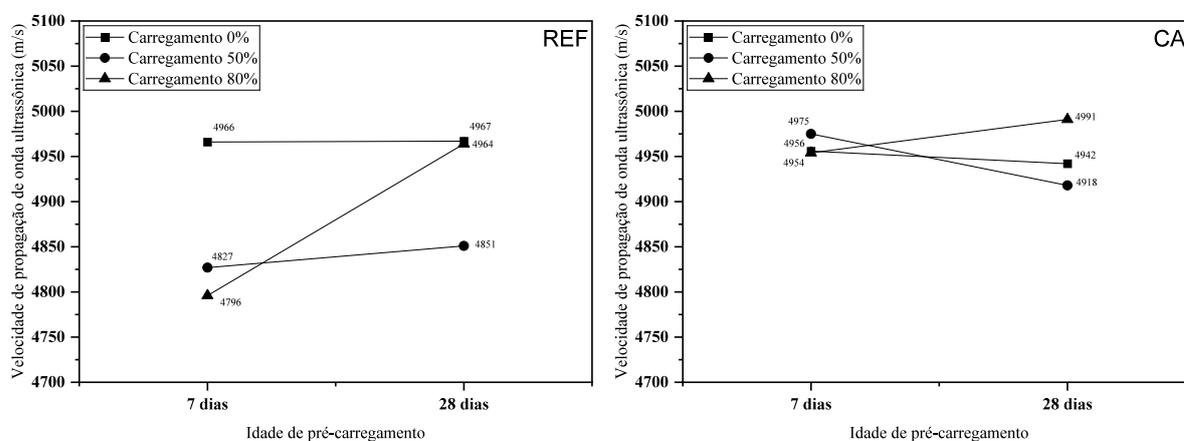


Fonte: Elaboração Própria

Conforme ilustrado na Figura 46, observa-se que com o passar do tempo (35, 56 e 91 dias), a variação da idade do concreto promove uma redução de 0,8% da velocidade de onda ultrassônica dos 35 -> 56 dias, e um aumento de 1,3% dos 56 -> 91 dias. Apresentando em média, um aumento total dos 35 -> 91 dias de 0,5%.

Para melhor compressão dos efeitos do pré-carregamento no processo de autocatrização, foi realizada uma análise comparativa dos resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica na idade de 91 dias, entre os concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias, conforme pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 – Resultados médios de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Analisando os resultados apresentados na Figura 47, ao observar a velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias, verifica-se que, tanto para os casos com percentual de carregamento de 50 e 80%, houve um aumento da velocidade de onda dos concretos contendo CA quando comparados com o de referência, implicando assim em uma atuação positiva do CA no processo de cicatrização de fissuras, tornando a matriz do concreto mais homogênea. No entanto, quando analisamos os concretos sem carregamento (0%) de ambas as idades de pré-fissuração, nota-se uma tendência da velocidade de onda do concreto em manter-se constante, mesmo com adição do CA.

Para uma avaliação da influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, em relação a idade do concreto, o percentual de carregamento e ao uso de aditivo cristalino na idade de 91 dias para amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%. Conforme mostrado na Tabela 26, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 27.

Tabela 26 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para velocidade de propagação de onda ultrassônica de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	1681	1	1681	0,479	0,496	Não
Percentual de carregamento	16299	1	16299	4,640	0,041	Sim
Idade de carregamento	28790	2	14395	4,098	0,029	Sim
Erro	84305	24	3513	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F;
p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 27 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	-	0,631	Não
50	PC 7	0,070	Não
	PC 28	0,115	Não
80	PC 7	0,338	Não
	PC 28	0,430	Não

Fonte: Elaboração Própria

A análise apresentada pela ANOVA global da Tabela 26 aponta que, para a idade de 91 dias, o uso de aditivo cristalizante (*Tipo de concreto*) não se mostrou significativo, entretanto, as variáveis *percentual de carregamento* e *idade de carregamento* apresentaram significância estatística, mostrando-se relevantes para a idade em análise. Como relatado por Oliveira (2019), isso se justifica pelo fato do aumento da taxa de hidratação e pela formação de hidratos através das amostras com CA. Na Tabela 27 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de carregamento aplicado. Assim, é possível observar que o uso de aditivo cristalizante, analisados na idade de 91 dias, não se mostrou relevante para nenhuma variável em análise (*percentual de carregamento* e *idade de carregamento*).

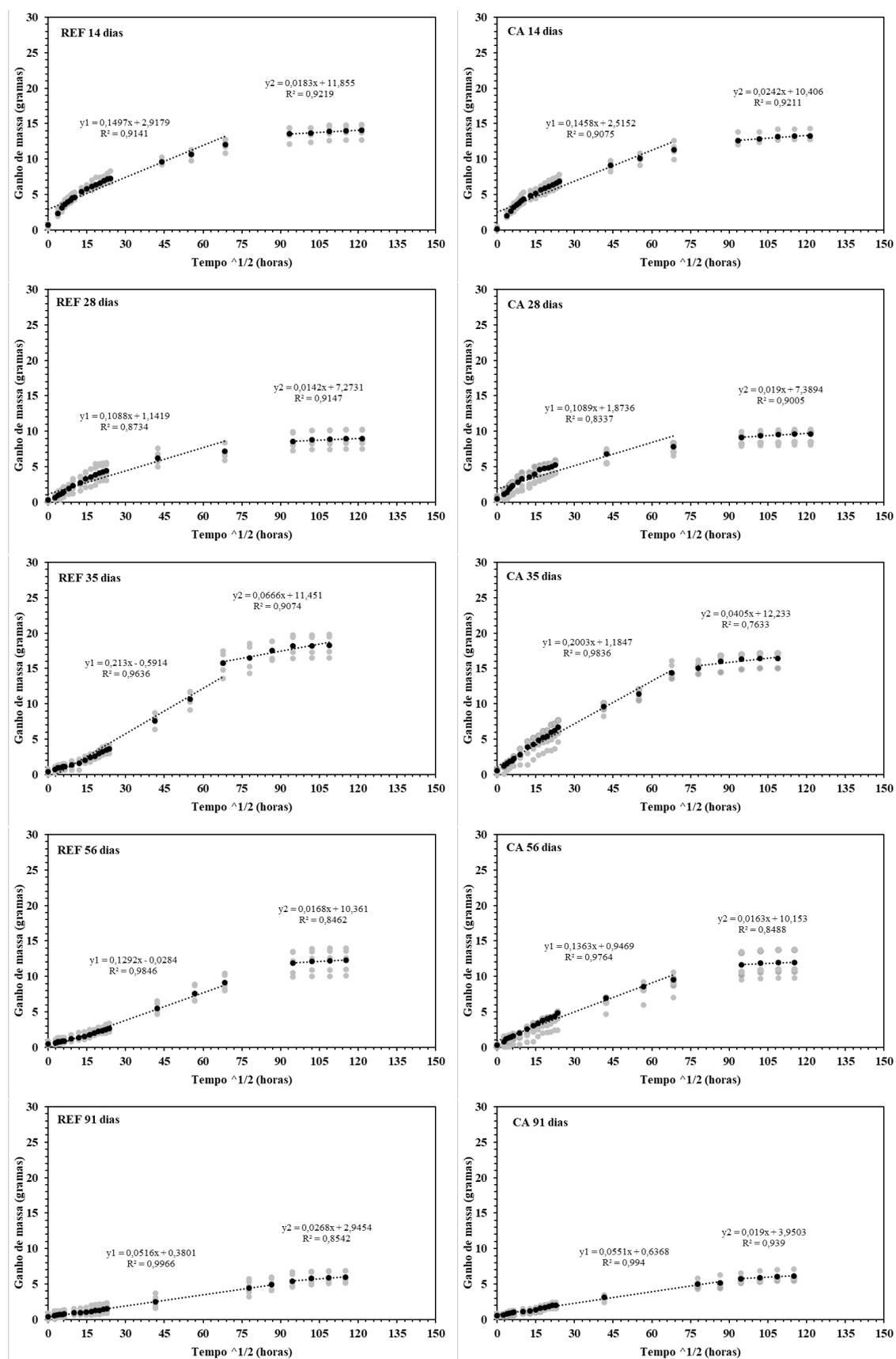
4.3 Ensaio de absorção capilar pelo Método de Kelham

Previamente às análises, é importante destacar que a taxa de absorção ($\text{g/cm}^2\text{h}^{1/2}$) está diretamente ligada à capacidade de absorver água ao longo do tempo. Em outras palavras, quanto maior a taxa de absorção, maior a quantidade de água absorvida, indicando uma forte interconexão dos poros. Em contrapartida, a resistência capilar (horas/m^2) fornece uma indicação do diâmetro dos poros do material, isto é, quanto mais finos os poros capilares, mais elevadas são as forças capilares sobre a água, resultando em uma resistência capilar mais baixa. Para simplificar, compreende-se que a resistência capilar está intrinsecamente relacionada ao tempo necessário para que o corpo de prova alcance a fase de saturação. Dado que poros mais finos possibilitam uma penetração e ascensão mais rápidas da água, pode-se afirmar que resistências capilares mais altas indicam poros grossos e/ou uma grande quantidade de poros, visto que levaram mais tempo para serem completamente atingidos. Alternativamente, poros capilares mais finos, porém com grande tortuosidade, também resultam em um maior período de tempo para serem percorridos (COSTA, 2015).

Conforme os gráficos das Figuras 48 à 52, foram realizados ajustes por meio de regressão linear nas retas que representam a absorção acumulada de água. As equações resultantes descrevem as ações capilares durante as fases de absorção (y1) e saturação (y2). Vale destacar

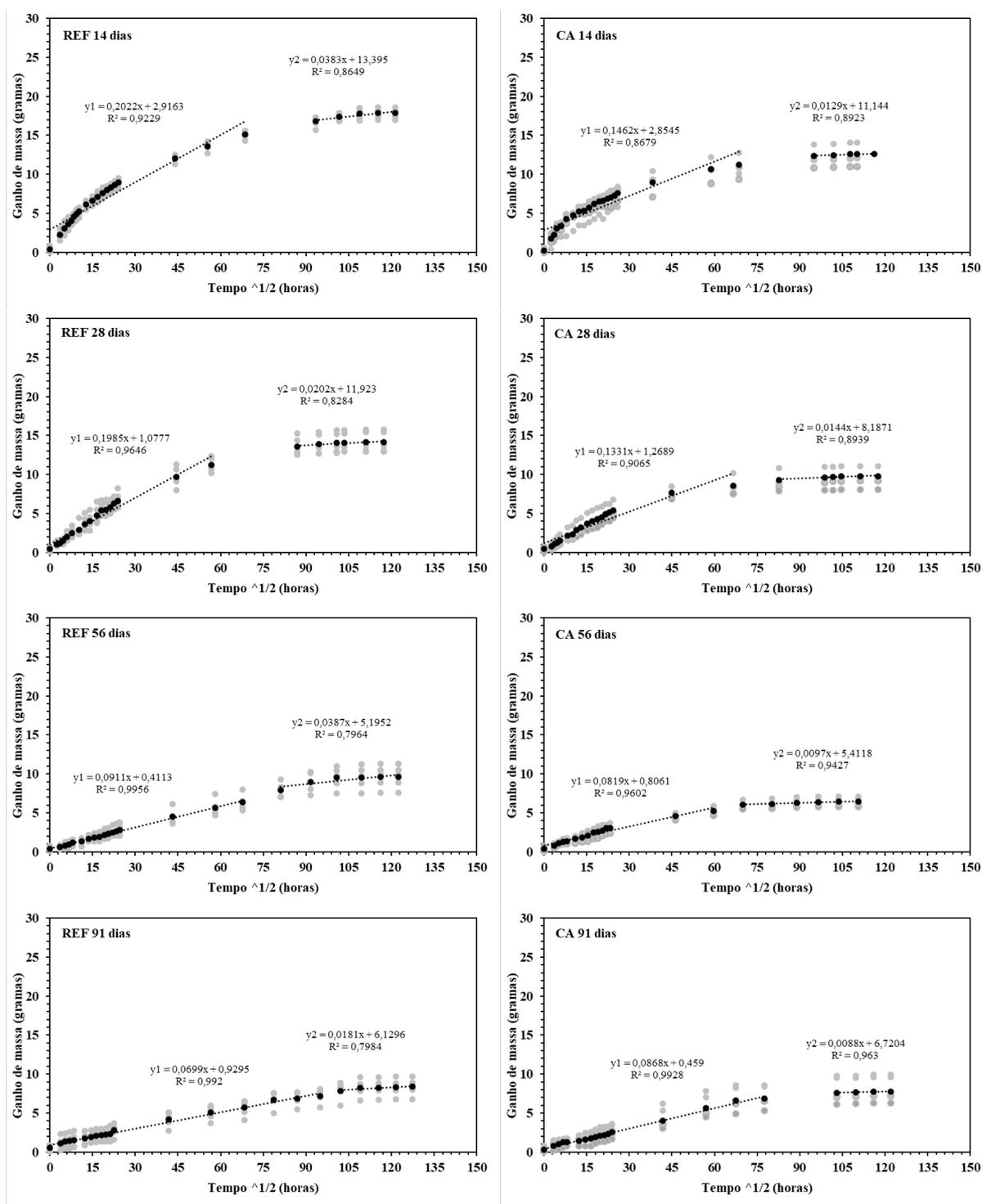
que os pontos pretos nos gráficos referem-se a média de absorção obtida a partir dos demais pontos.

Figura 48 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos sem pré-carregamento (0%)



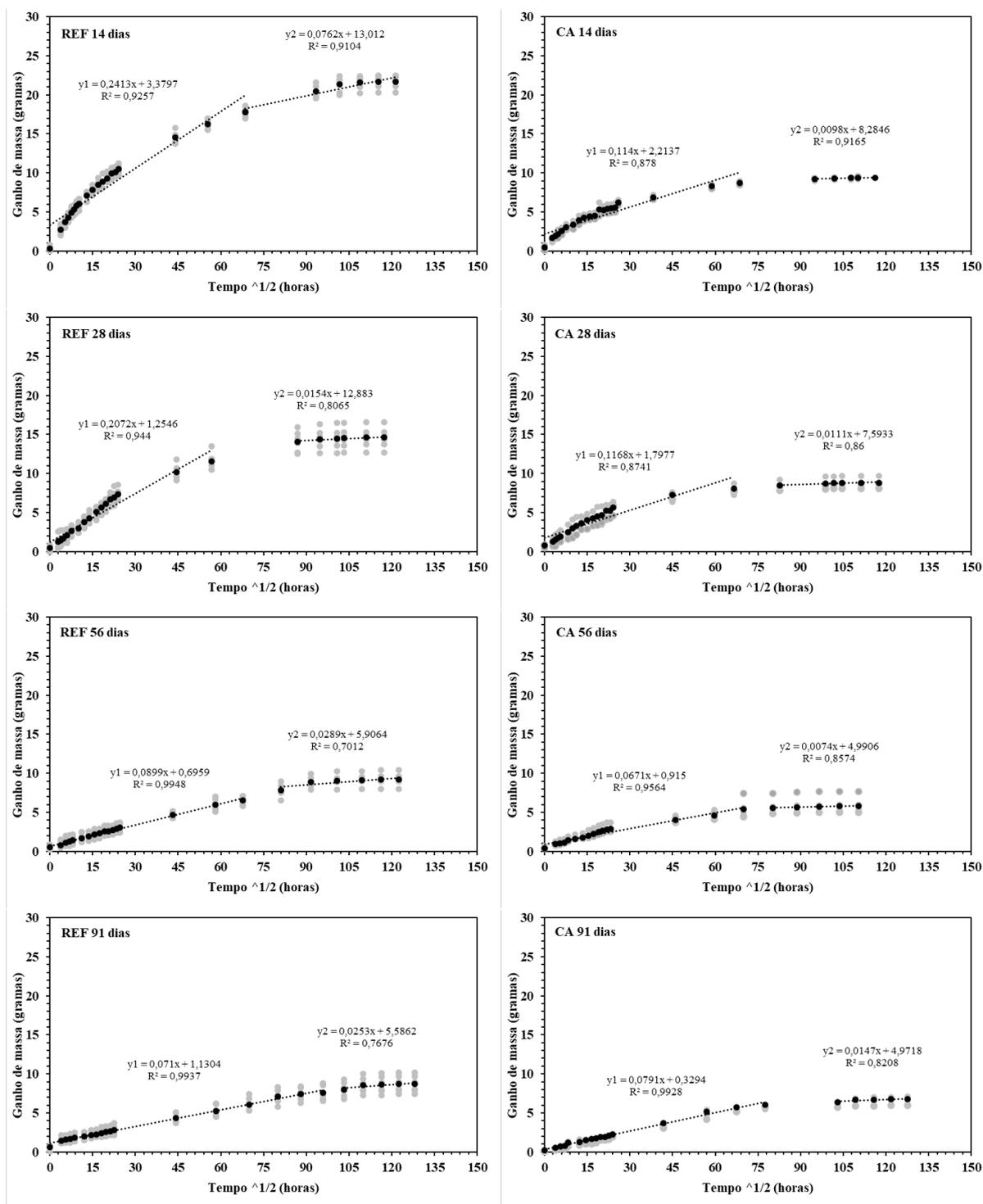
Fonte: Elaboração Própria

Figura 49 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 7 dias com 50% de carregamento



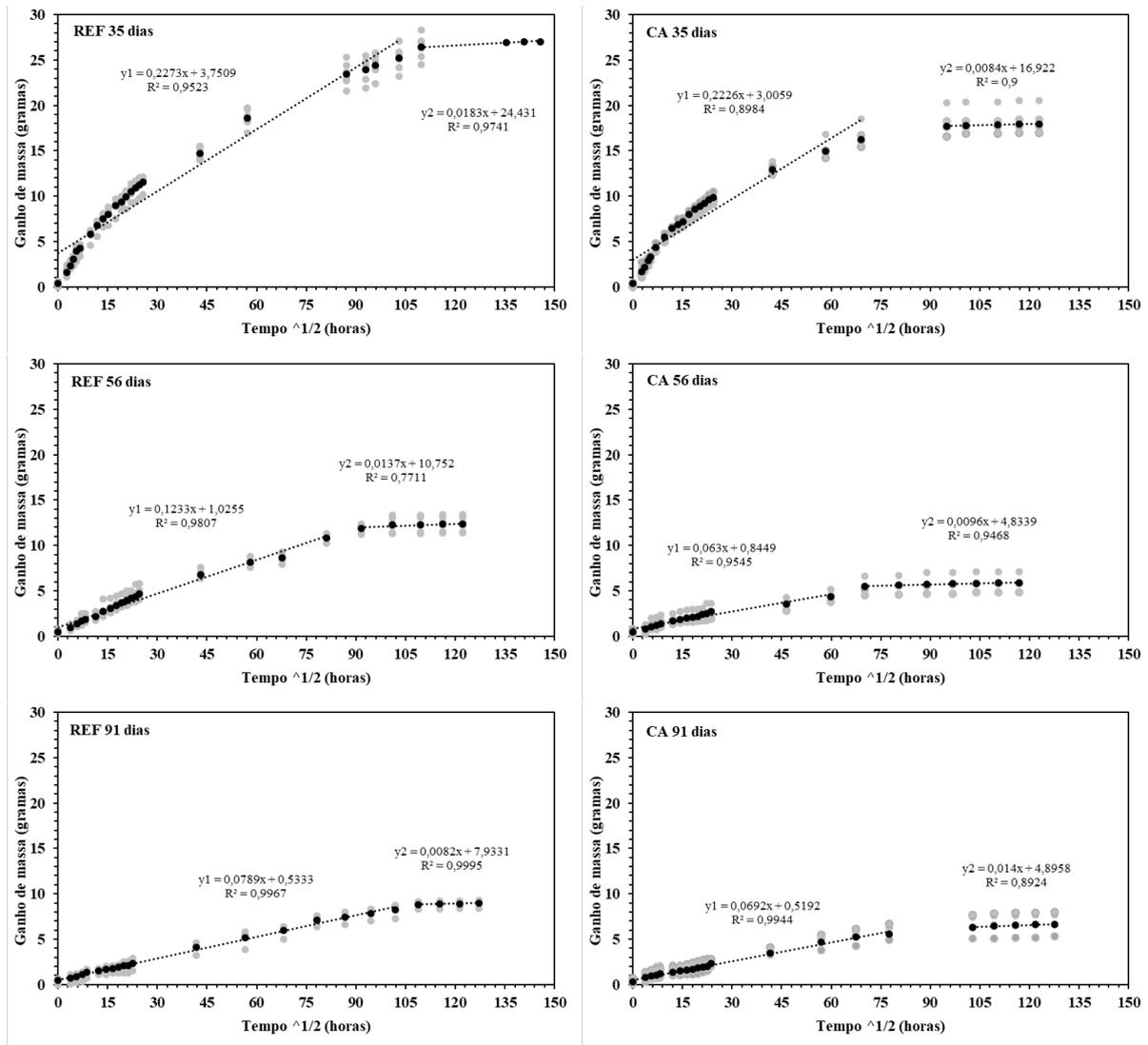
Fonte: Elaboração Própria

Figura 50 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 7 dias com 80% de carregamento



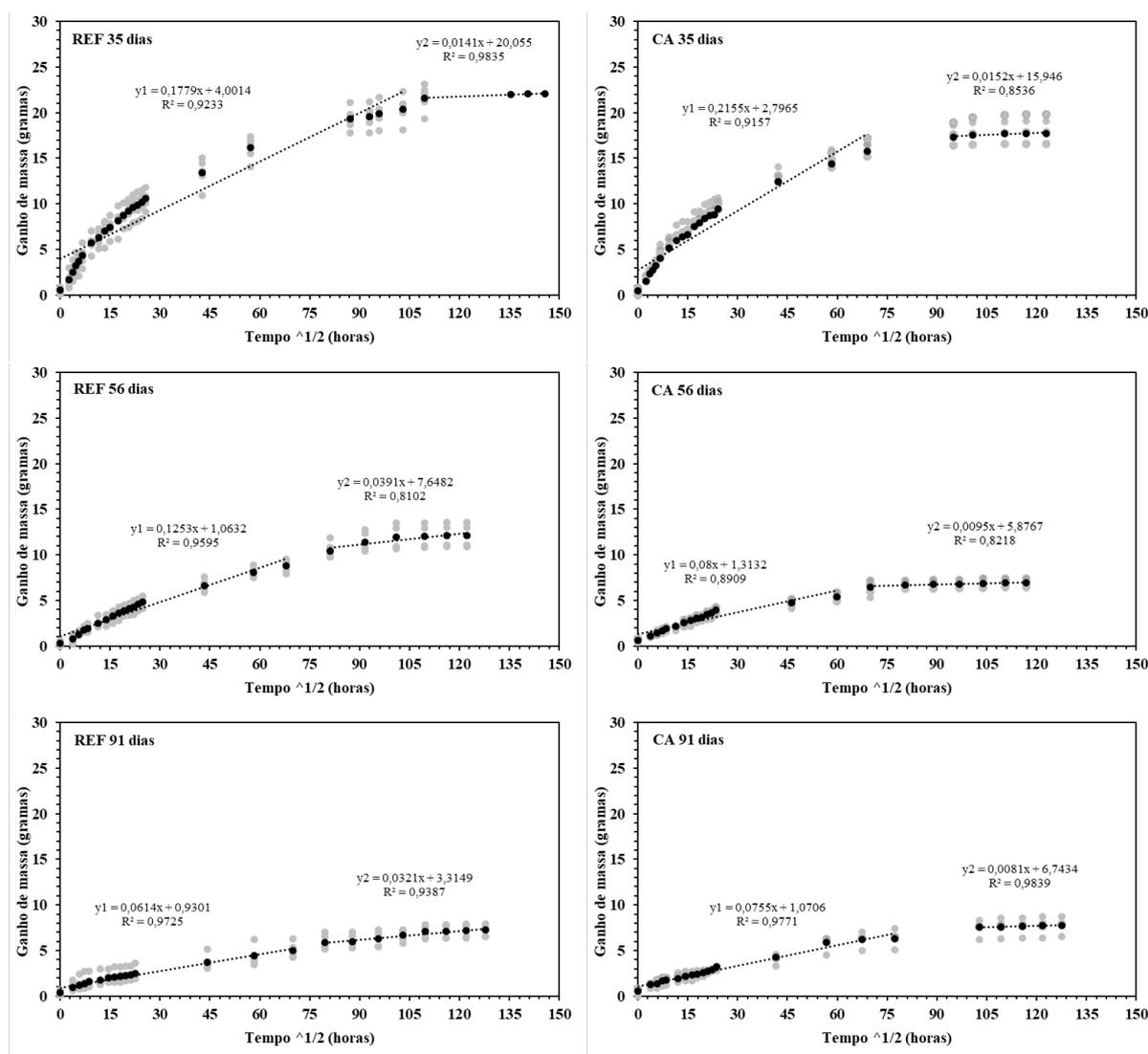
Fonte: Elaboração Própria

Figura 51 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 28 dias com 50% de carregamento



Fonte: Elaboração Própria

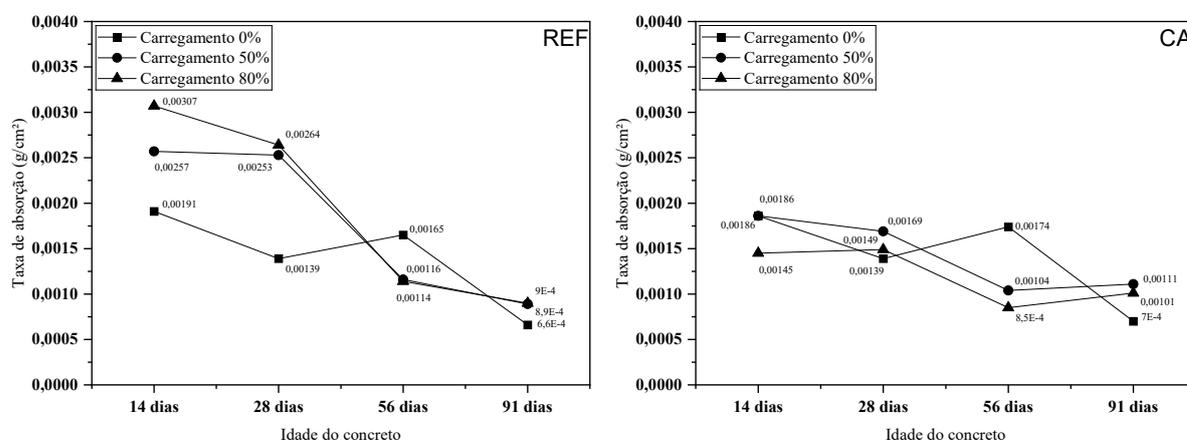
Figura 52 – Evolução do ganho de massa médio no tempo para os concretos pré-carregados aos 28 dias com 80% de carregamento



Fonte: Elaboração Própria

Com base nos gráficos das Figuras 48 à 52, foram calculados os valores médios de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo para as diferentes amostras de concreto pré-carregadas aos 7 e 28 dias, conforme descrito no tópico 3.3.3. Na Figura 53 são apresentados os resultados referentes as amostras de concreto pré-carregadas na idade de 7 dias.

Figura 53 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar para amostras pré-carregadas aos 7 dias



Fonte: Elaboração Própria

Comparando-se inicialmente, apenas o efeito dos diferentes percentuais de carregamento do concreto referência, nota-se que, com 0% de carregamento, a absorção média apresenta uma redução expressiva ao longo do tempo, indicando boa resistência à absorção de água. Contudo, ao ser pré-carregado com 50% e 80%, há um aumento inicial na absorção média, especialmente nos primeiros dias, seguido por uma diminuição gradual. Mesmo assim, a absorção permanece mais elevada em comparação com o concreto sem carregamento. Já para o concreto contendo CA, nota-se que, com 0% de carregamento aplicado, a absorção média diminui consideravelmente ao longo do tempo, sugerindo uma boa resistência à absorção de água. Ao ser pré-carregado com 50%, há um leve aumento inicial na absorção média, especialmente aos 14 dias, seguido por uma redução nos níveis de absorção ao longo do tempo. Já o pré-carregamento com 80% resulta em um aumento temporário na absorção média nos primeiros dias, seguido por uma diminuição acentuada.

Analisando o efeito do uso do aditivo cristalizante, nota-se que para o cenário sem carregamento (0%), o concreto REF demonstra uma notável redução na absorção média ao longo do tempo, indicando eficácia na resistência à penetração de água. Em contrapartida, o concreto CA, sob as mesmas condições, apresentaram resultados muito semelhantes ao concreto REF, sendo observado para os concretos CA um leve aumento na absorção aos 56 e 91 dias. Quando sujeitos a pré-carregamento com 50%, o concreto CA apresenta uma redução na absorção média aos 14, 28 e 56 dias, em comparação ao concreto REF, seguido de um leve aumento na idade de 91 dias, sendo essa redução mais acentuada nas primeiras idades. No entanto, o concreto CA demonstra uma capacidade superior de recuperar resistência à absorção ao longo do tempo, enquanto o concreto REF mantém níveis mais elevados. Com 50% de pré-carregamento, o concreto contendo CA apresenta uma redução na absorção média em todas as idades analisadas, no entanto, com pré-carregamento de 80% a redução é mais acentuada quando comparada com o

concreto de referência. Entretanto, o concreto REF continua a exibir uma absorção mais elevada em comparação com o CA. Essa análise pode ser melhor observada na Tabela 28, na qual apresenta os valores médios da taxa de absorção e resistência capilar.

Tabela 28 – Resultados da taxa de absorção média ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) dos concretos pré-carregados aos 7 dias

Material	Idade	Taxa de absorção	CV (%)	Resistência capilar	CV (%)
REF (0%)		0,00191	5,95	1850386	11,51
REF (50%)	14	0,00257	9,33	1634996	21,39
REF (80%)		0,00307	7,95	1361525	20,32
REF (0%)		0,00139	9,61	1680229	11,01
REF (50%)	28	0,00253	10,78	1479927	19,99
REF (80%)		0,00264	4,60	1470289	7,96
REF (0%)		0,00165	11,96	3380232	14,23
REF (50%)	56	0,00116	13,36	3333969	14,58
REF (80%)		0,00114	6,96	2918496	9,70
REF (0%)		0,00066	19,34	4279893	9,61
REF (50%)	91	0,00089	11,29	4031102	8,07
REF (80%)		0,00090	9,65	3802585	7,58
CA (0%)		0,00186	10,53	1684359	20,01
CA (50%)	14	0,00186	12,75	1546879	15,94
CA (80%)		0,00145	13,69	1357784	21,35
CA (0%)		0,00139	7,04	1505766	18,29
CA (50%)	28	0,00169	12,49	1358766	17,38
CA (80%)		0,00149	17,16	1202560	18,68
CA (0%)		0,00174	11,51	2354229	20,08
CA (50%)	56	0,00104	12,11	1627709	15,81
CA (80%)		0,00085	15,55	1864208	26,08
CA (0%)		0,00070	20,22	3369919	17,88
CA (50%)	91	0,00111	15,04	2577589	6,10
CA (80%)		0,00101	8,01	2078611	18,56

CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação ao uso de aditivo cristalizante, a idade do concreto e o percentual de carregamento aplicado, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 29, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 30.

Tabela 29 – Análise da variância (ANOVA) global para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 7 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	2,39e-6	1	2,39e-6	86,43	< .001	Sim
Percentual de carregamento	1,60e-6	2	7,99e-7	28,87	< .001	Sim
Idade do concreto	2,87e-5	3	9,58e-6	346,19	< .001	Sim
Erro	2,41e-6	87	2,77e-8	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 30 – Análise da variância (ANOVA) a pares para absorção de água entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 7 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	14	0,99347	Não
	28	0,36222	Não
	56	0,91527	Não
	91	0,00962	Sim
50	14	0,00258	Sim
	28	0,01602	Sim
	56	0,37974	Não
	91	0,01313	Sim
80	14	0,00010	Sim
	28	0,00010	Sim
	56	0,03621	Sim
	91	0,71430	Não

Fonte: Elaboração Própria

Observando as variáveis independentes analisadas na Tabela 29, a ANOVA global aponta que todas se mostraram significativas para a absorção de água por capilaridade em amostras pré-carregadas aos 7 dias. Isso sugere que, para esta situação de análise, há influência da idade do concreto (14, 28, 56 e 91 dias), do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%) e também do uso do aditivo cristalizante (CA) sobre a absorção de água. Na Tabela 30 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Observa-se que, para concretos pré-carregados na idade de 7 dias, para amostras sem carregamento, apenas na idade de 91 dias a absorção de água se mostrou significativa. Já ao observar as amostras com aplicação de carregamento de 50%, apenas a idade de 56 dias não se mostrou significativa. Por fim, as amostras com aplicação de 80% de carregamento, praticamente em todas as idades houve significância estatística, com exceção da idade de 91 dias.

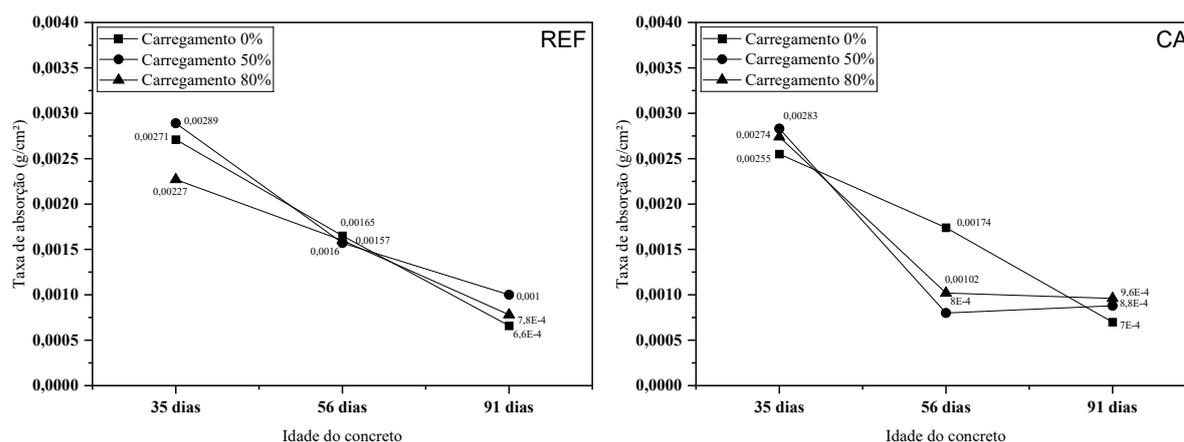
A redução na absorção média ao longo do tempo dos concretos sem carregamento pode estar associado a hidratação remanescente de grãos anidros nas primeiras idades, e a formação

do $CaCO_3$ em idades mais avançadas (TER HEIDE, 2005). Já a capacidade de recuperação de resistência à absorção ao longo do tempo dos concretos com CA em comparação ao REF, segundo Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013), pode estar relacionado com a formação de $CaCO_3$ nas bordas das fissuras, os quais são responsáveis pela redução da permeabilidade da água. Além disso, os autores também indicam a formação de C-S-H e etringita nas partes internas das fissuras, que por sua vez dificultam a passagem de água.

Em resumo, o concreto CA, beneficiado pelo aditivo cristalizante, oferece uma resistência superior à absorção de água em comparação com o concreto REF, especialmente quando sujeitos a condições de aplicação de pré-carregamento. A análise destaca a influência positiva do aditivo cristalizante na capacidade de resistência à penetração de água no material.

Na Figura 54 são apresentados os resultados referentes as amostras de concreto pré-carregadas na idade de 28 dias.

Figura 54 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar para amostras pré-carregadas aos 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Ao analisar os resultados do concreto REF (Figura 54), observa-se que, sem carregamento (0%), a absorção média apresenta uma redução relevante de 35 a 91 dias, indicando uma boa resistência à penetração de água. Contudo, ao ser pré-carregado com 50%, nota-se uma maior absorção média inicial aos 35 dias, seguido por uma tendência de redução nos subsequentes 56 e 91 dias. O pré-carregamento com 80% também resulta em uma maior absorção média inicial aos 35 dias, seguido por uma diminuição nos 56 e 91 dias. Entretanto, a absorção média permanece superior ao concreto sem carregamento, indicando que para este ensaio os melhores resultados foram encontrados nos concretos que permaneceram íntegros (sem carregamento). A análise dos concretos CA sem carregamento revelaram uma diminuição da absorção média ao longo do tempo, assemelhando-se ao comportamento do REF. No entanto, ao ser pré-carregado com 50% ocorre um aumento inicial aos 35 dias seguido por uma queda considerável nos subsequentes 56 e 91 dias. O pré-carregamento com 80% também induz a um aumento

inicial aos 35 dias, com uma subsequente diminuição nos 56 e 91 dias. A absorção média, no entanto, permanece mais alta em comparação com o concreto sem carregamento.

Comparativamente, ambos concretos (REF e CA) sem carregamento, exibem padrões semelhantes de redução na absorção média ao longo do tempo, indicando resistência à penetração de água. Nos cenários de pré-carregamento, o concreto CA tende a apresentar uma absorção média mais elevada do que o REF, especialmente nos estágios iniciais. Além disso, o pré-carregamento influencia de maneira mais pronunciada a absorção média no concreto CA em comparação com o REF, ressaltando a influência positiva do aditivo cristalizante nas propriedades de resistência à penetração de água. Essa análise pode ser melhor observada na Tabela 31, na qual apresenta os valores médios da taxa de absorção e resistência capilar para as diferentes amostras de concreto pré-carregadas aos 28 dias, conforme descrito no tópico 3.3.3.

Tabela 31 – Resultados da taxa de absorção média ($\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) dos concretos pré-carregados aos 28 dias

Material	Idade	Taxa de absorção	CV (%)	Resistência capilar	CV (%)
REF (0%)		0,00271	12,62	2200926	3,42
REF (50%)	35	0,00289	4,59	3916270	2,15
REF (80%)		0,00227	5,01	3842174	6,27
REF (0%)		0,00165	12,49	3380232	14,71
REF (50%)	56	0,00157	3,44	3150301	12,24
REF (80%)		0,00160	9,25	2334301	12,37
REF (0%)		0,00066	18,34	4279893	9,61
REF (50%)	91	0,00100	3,57	4381886	6,83
REF (80%)		0,00078	11,54	2649895	6,62
CA (0%)		0,00255	8,44	1912041	16,14
CA (50%)	35	0,00283	6,61	1688325	8,12
CA (80%)		0,00274	5,21	1723917	7,95
CA (0%)		0,00174	8,69	2354229	22,33
CA (50%)	56	0,00080	9,55	2232058	5,15
CA (80%)		0,00102	9,93	1676014	3,93
CA (0%)		0,00070	20,22	3369919	17,58
CA (50%)	91	0,00088	9,28	2514522	18,70
CA (80%)		0,00078	12,80	2649895	4,69

CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação ao uso de aditivo cristalino, a idade do concreto e o percentual de carregamento aplicado, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 32, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 33.

Tabela 32 – Análise da variância (ANOVA) global para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	1,44e-8	1	1,44e-8	0,654	0,422	Não
Percentual de carregamento	5,88e-7	2	2,94e-7	13,363	< .001	Sim
Idade do concreto	5,90e-5	2	2,95e-5	1341,786	< .001	Sim
Erro	1,56e-6	71	2,20e-8	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 33 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA para pré-carregamentos na idade de 28 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	35	0,91040	Não
	56	0,11619	Não
	91	0,00962	Sim
50	35	0,94457	Não
	56	0,00010	Sim
	91	0,02514	Sim
80	35	0,00010	Sim
	56	0,00033	Sim
	91	0,00512	Sim

Fonte: Elaboração Própria

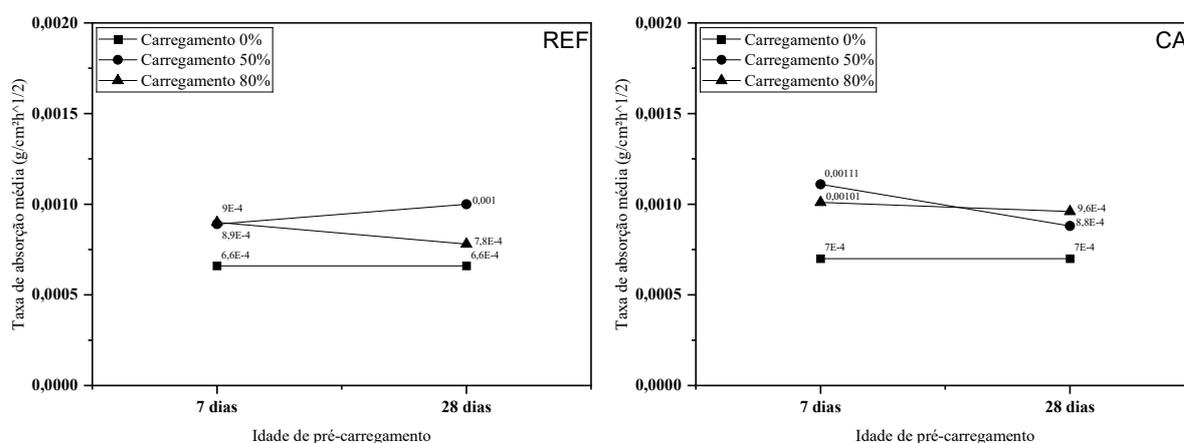
Observando as variáveis independentes apresentadas na Tabela 32, a ANOVA global aponta que todas se mostraram significativas para a absorção de água em amostras pré-carregadas aos 28 dias. Isso sugere que, para esta situação de análise, a idade do concreto (35, 56 e 91 dias) e do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%) são estatisticamente significativas. No entanto, o uso do aditivo cristalizante (CA), por sua vez, não se mostrou significativo frente a absorção de água. Na Tabela 30 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA para cada percentual de carregamento e idade de ensaio. Nota-se que, para concretos pré-carregados na idade de 28 dias, para amostras sem carregamento, apenas na idade de 91 dias a absorção de água se mostrou significativa. Já ao observar as amostras com aplicação de carregamento de 50%, apenas a idade de 35 dias não se mostrou significativa. Por fim, as amostras com aplicação de 80% de carregamento, todas as idades (35, 56 e 91 dias) apresentaram significância estatística.

Neste caso, a análise de variância (ANOVA) global, também mostrou que a variável "*Tipo de concreto*" não apresentou significância estatística ao nível de confiança de 95%. Indicando que, enquanto a variável "*Tipo de concreto*" pode não ter um efeito significativo quando

todas as variáveis são consideradas conjuntamente, certas combinações específicas de carregamento e idade do concreto acabam resultando em diferenças significativas.

Para melhor compreensão dos efeitos do pré-carregamento no processo de autocicatrização, foi realizada uma análise comparativa dos resultados de absorvidade na idade de 91 dias, entre os concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias, conforme pode ser observado na Figura 55.

Figura 55 – Resultados médios do ensaio de absorção capilar aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaboração Própria

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 55 para os concretos ensaiados na idade de 91 dias, nota-se que o uso do aditivo cristalizante parece não apresentar diferença significativa para a taxa de absorção média em comparação com o concreto referência. Os concretos REF e CA sem carregamento apresentaram as menores absorções entre os concretos investigados. A variação da idade de carregamento para os concretos REF 50% promoveu um aumento de 18% na absorção, enquanto que para o carregamento de REF 80% foi observada uma redução de 19%. Para os concretos com CA observou-se o contrário, a variação da idade de carregamento promoveu para os concretos CA 50% uma redução de 23% na absorção, enquanto que para os concretos CA 80% houve aumento de 11% na absorção. A tendência de comportamento não ficou clara e precisa ser melhor estudada.

Essa análise pode ser melhor observada na Tabela 34, na qual são apresentados os valores médios da taxa de absorção e resistência capilar para as diferentes amostras de concreto na idade de 91 dias, pré-carregadas aos 7 e 28 dias.

Tabela 34 – Resultados da taxa de absorção média ($\text{g/cm}^2\text{h}^{1/2}$) e resistência capilar média (h/m^2) aos 91 dias dos concretos pré-carregados aos 7 e 28 dias

Material	Idade de carregamento	Taxa de absorção	CV (%)	Resistência capilar	CV (%)
REF (0%)	7	0,00066	18,51	4279893	9,61
REF (50%)		0,00089	11,24	4031102	8,06
REF (80%)		0,00090	9,62	3802585	7,57
CA (0%)	7	0,00070	20,15	3369919	17,87
CA (50%)		0,00111	15,01	2577589	6,09
CA (80%)		0,00101	7,97	2078611	18,56
REF (0%)	28	0,00066	18,51	4279893	9,61
REF (50%)		0,00100	3,58	4381886	6,83
REF (80%)		0,00078	11,51	2649895	6,62
CA (0%)	28	0,00070	20,15	3369919	17,58
CA (50%)		0,00088	9,31	2514522	18,70
CA (80%)		0,00096	12,82	2833577	4,69

CV: coeficiente de variação

Fonte: Elaboração Própria

Para uma avaliação da influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, em relação ao uso de aditivo cristalino, o percentual de carregamento e idade de carregamento na idade de 91 dias para amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) global conforme apresentando na Tabela 35 com um nível de confiança de 95%, e uma análise ANOVA em pares, apenas entre os concretos REF e CA, para identificação de diferenças significativas entre as variáveis mencionadas, conforme mostrado na Tabela 36.

Tabela 35 – Análise da variância (ANOVA) global aos 91 dias para absorção de água de amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias

Efeitos	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Tipo de concreto	1,57e-7	1	1,57e-7	18,560	< .001	Sim
Percentual de carregamento	5,03e-6	2	2,51e-6	296,914	< .001	Sim
Idade de carregamento	1,37e-8	1	1,37e-8	1,614	0,212	Não
Erro	3,05e-7	36	8,46e-9	-	-	-

SQ: soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste - F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 36 – Análise da variância (ANOVA) a pares entre concretos REF e CA aos 91 dias

Carregamento (%)	Idade (dias)	Valor - p	Significância
0	-	0,034	Sim
50	PC 7	0,030	Sim
	PC 28	0,022	Sim
80	PC 7	0,668	Não
	PC 28	0,007	Sim

Fonte: Elaboração Própria

A ANOVA aponta que, de um modo geral, o incremento de CA na mistura e à intensidade do carregamento influenciaram significativamente na variável de resposta (taxa de absorção) aos 91 dias. No entanto, a idade de aplicação do carregamento (7 e 28 dias) não se mostrou significativa frente a taxa de absorção de água. Na Tabela 36 são apresentados os resultados da ANOVA em pares, comparando os concretos REF e CA aos 91 dias, para cada percentual e idade de carregamento. Nota-se que, quanto a influência do uso de aditivo cristalizante, a taxa de absorção na idade de 91 dias se mostrou significativa para todas as condições analisadas, com exceção dos concretos pré-carregados aos 7 dias com 80% de carregamento, no qual não apresentou relevância estatística.

4.4 Microscopia óptica

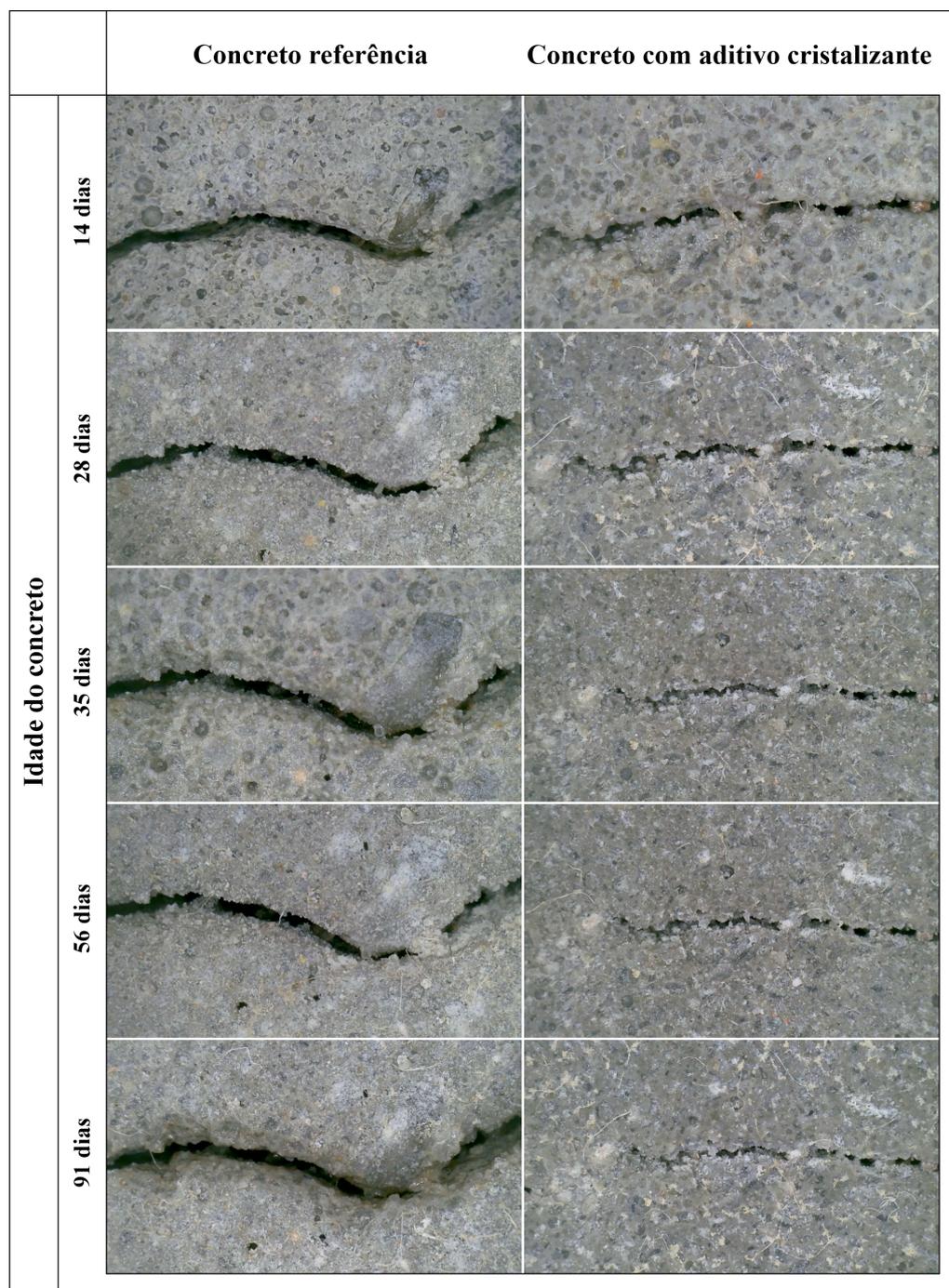
Após a abertura de fissura, foi realizada uma análise microscópica dos corpos de prova ao longo de um período de imersão em água de 91 dias para avaliar a formação de selamentos brancos e consequentemente o fechamento das fissuras, tanto em amostras sem aditivo cristalizante (referência) quanto as amostras com adição de CA, conforme evidenciado na Figura 56 onde observa-se a evolução gradativa das fissuras. Assim, de acordo com os resultados apresentados na Figura 56, observou-se que à medida que a idade de cicatrização aumenta, o grupo de amostras de referência não apresentou cicatrização superficial relevante da fissura, quase não havendo alteração ao longo das idades. Enquanto que com a adição de 1% de CA, a fissura teve um preenchimento significativo, ficando parcialmente preenchida. No entanto nota-se a formação de pequenos cristais nos concretos referência, neste caso, em ritmo mais lento, devido à reação de hidratação das partículas de cimento não hidratadas nas fissuras em contato com a água, que produz produtos de hidratação que preenchem parte das fissuras.

Na idade de 28 dias, a adição de CA teve a principal contribuição para o aumento da taxa de cura. A substância ativa do CA reage com os produtos de hidratação do cimento para gerar C-S-H e preencher as fissuras, e a taxa de cicatrização é significativamente melhorada. Aos 91 dias de idade, a taxa de cicatrização do grupo referência continua não sendo significativa, comprovando que a capacidade da hidratação do cimento para cicatrizar fissuras é relativamente baixa. No entanto, amostras com CA demonstraram excelentes efeitos de cicatrização aos 91

dias. Com base nos resultados, na investigação microscópica o mecanismo dominante esperado de autocura é a precipitação de cristais de $CaCO_3$. Inicialmente, enquanto as amostras estão imersas em água, os íons cálcio (Ca^{2+}) reagem com a água presente e libera $Ca(OH)_2$ na solução. Estes cristais de $CaCO_3$ fixam-se a superfície da fissura e reduzem a sua largura ou, em alguns casos, conseguem o fechamento completo da fissura (STEFANOVSKA; FIDANCHEVSKI, 2023).

A cinética de fechamento de fissuras demonstra um selamento mais rápido para aberturas de fissuras intermediárias, a mistura contendo aditivos cristalinos apresenta a selagem mais rápida. Essa observação está em linha com os resultados de Ferrara, Krelani e Carsana (2014), para faixas semelhantes de abertura de fissuras e pode ser explicada pelo fato de que fissuras maiores expõem maiores quantidades de material hidrofílico e reativo à água. O efeito global resulta em uma combinação sinérgica da reatividade do aditivo com a água, os produtos de hidratação do cimento (como o hidróxido de cálcio) e sua ação catalisadora na hidratação adicional do cimento. Em conformidade com essa suposição, pode-se observar que os corpos de prova contendo aditivo cristalizante apresenta a maior capacidade de fechamento de fissuras ao final do período de observação de 91 dias, quando comparado com os concretos sem aditivo cristalizante (referência).

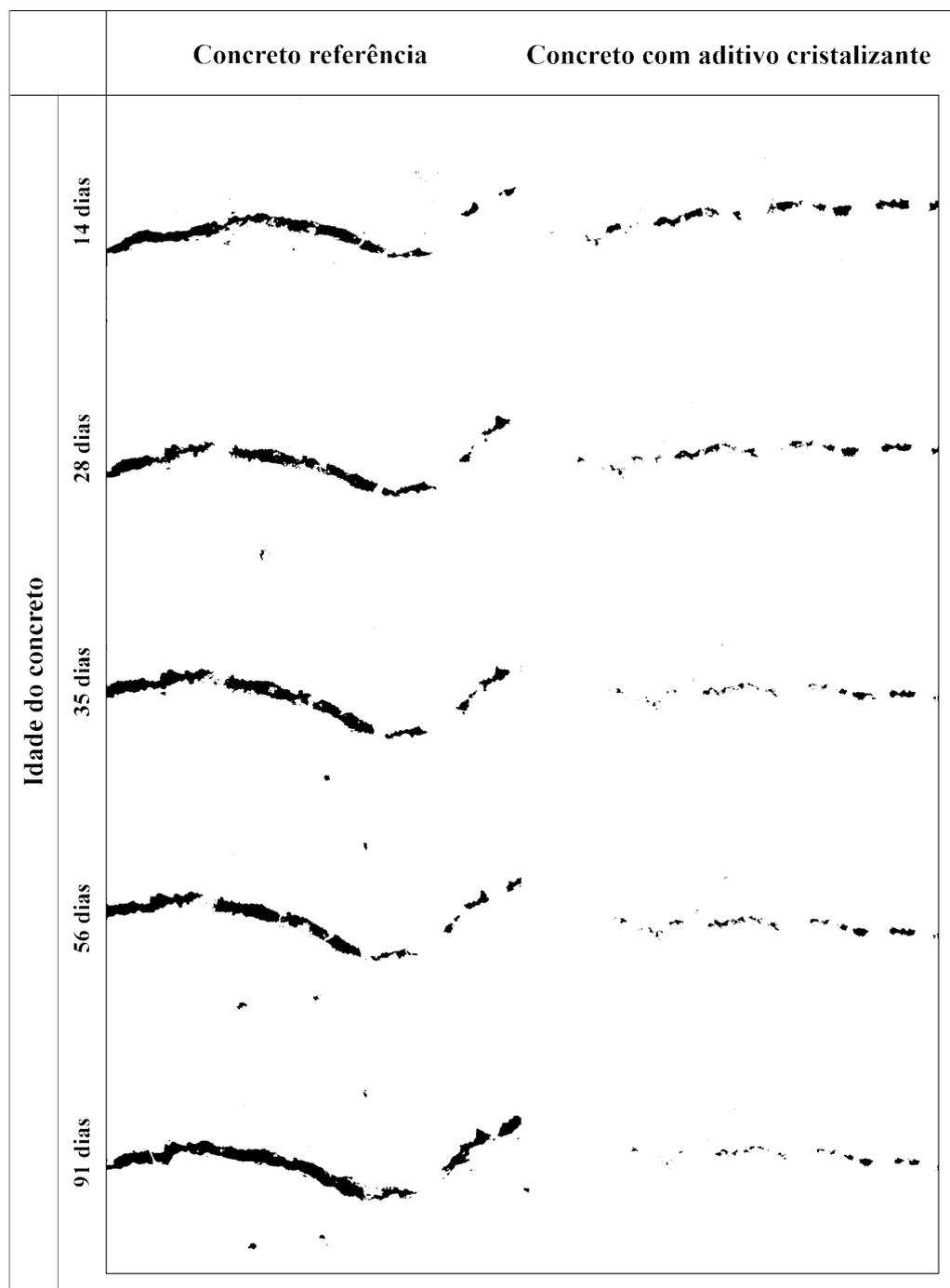
Figura 56 – Comparação entre o aspecto da fissura aos 14 dias (idade de abertura da fissura) e após 91 dias de cicatrização, para corpos de prova referência e CA



Fonte: Elaboração Própria

Por meio da plataforma *JSBin*, foi realizada a binarização das imagens obtidas por microscopia óptica, com o intuito de auxiliar na análise de preenchimento das fissuras por meio da formação dos produtos de autocicatrização ao longo dos 91 dias de estudo. As imagens em questão estão destacadas na Figura 57.

Figura 57 – Comparação das fissuras binarizadas após 91 dias de cicatrização, para corpos de prova referência e CA



Fonte: Elaboração Própria

Ao se tratar da análise das larguras das fissuras, não foi possível realizar sua quantificação devido às limitações do equipamento de microscopia óptica empregado, assim como à falta de padronização das imagens devido à iluminação variável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a contribuição de um aditivo cristalizante no processo de autocicatrização de fissuras em concretos convencionais submetidos a danos por compressão (microfissuras) em diferentes idades e com variação no percentual de carga aplicada.

Foram analisados os efeitos do percentual de pré-carregamento, idade de pré-carregamento e o uso de aditivo cristalizante sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos. Além disso, foram desenvolvidos análises estatísticas para avaliar a influência de cada variável nos resultados das propriedades estudadas.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial revelaram uma clara tendência de redução na resistência dos concretos de referência (sem adição de CA) à medida que o percentual de carregamento era aumentado, independentemente da idade de aplicação do carregamento (7 e 28 dias). Por outro lado, os concretos com adição de CA demonstraram uma consistência superior em todas as condições de carregamento, evidenciando sua capacidade de manter níveis elevados de resistência mesmo diante de variações nos percentuais aplicados (0%, 50% e 80%). Notavelmente, a adição de CA em conjunto com ausência de pré-carregamento, por meio da análise estatística, se mostrou como um fator determinante para obtenção da maior resistência nos concretos estudados. De forma geral, os melhores desempenhos foram registrados nos concretos com aditivos cristalizantes e sem pré-carregamento, indicando que a incorporação de CA desempenhou um papel significativo na melhoria das propriedades de resistência.

Com base nos resultados do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, fica claro que, independentemente da idade em que o pré-carregamento foi aplicado (7 e 28 dias), os materiais exibiram uma velocidade de propagação de onda ultrassônica consistentemente superior a 4500 m/s. Isso é uma indicação robusta de uma excelente compacidade estrutural, mesmo com os danos causados pelo pré-carregamento. Sendo assim, foi observado que houve uma diferença nos níveis de velocidade de propagação de onda. Para os concretos de referência (sem adição de CA) que receberam aplicação do carregamento, os valores da velocidade ultrassônica diminuíram ao longo do tempo em relação aos que não receberam carregamento. No entanto, os concretos com adição de CA a partir da idade de 28 dias, independente do percentual de carregamento aplicado, mostraram uma recuperação da velocidade ultrassônica apresentando velocidades semelhantes tanto para os carregamentos de 0% quanto para 50% e 80%. De maneira geral, o incremento de CA para os concretos pré-carregados nas idades de 7 e 28 dias, contribuiu de forma positiva para o fechamento das microfissuras impostas pelos danos por compressão, aumentando a velocidade ultrassônica nos concretos, ou seja, indicando uma condição de cicatrização, independentemente do percentual de carregamento aplicado (0%, 50% e 80%).

O ensaio de absorção de água por capilaridade revelou padrões distintos de comportamento entre os diferentes tipos de concreto analisados. Observou-se que, os concretos de

referência (sem adição de CA) que não sofreram carregamento (0%) apresentaram uma redução relevante da absorção de água ao longo do tempo. No entanto, quando parte das amostras do concretos de referência (sem CA) foram submetidas a um pré-carregamento de 50% e 80%, os concretos apresentaram uma maior absorção nas idades iniciais, seguido por uma tendência de redução em idades posteriores. Para os concretos com incorporação de CA foi observada a mesma tendência de comportamento do traço de referência. Para os concretos não submetidos ao pré-carregamento notou-se que a absorção média diminui consideravelmente ao longo do tempo. No entanto, ao serem pré-carregados em diferentes percentuais (50% e 80%) houve um leve aumento inicial na absorção média, seguido por uma redução nos níveis de absorção ao longo do tempo. Entretanto, essa redução na absorção ao longo do tempo nos concretos que sofreram pré-carregamento (tanto para os concretos de referência, quanto para os concretos com CA), permaneceram superiores em relação a dos concretos sem carregamento (0%). De modo geral, tanto os concretos pré-carregados aos 7 dias quanto aos 28 dias que não foram submetidos a pré-carregamento exibiram padrões semelhantes de redução na absorção média, independentemente da presença do aditivo cristalizante. No entanto, destaca-se que o concreto com adição de CA demonstrou uma resistência superior à absorção de água em comparação com o concreto de referência, especialmente sob condições de pré-carregamento. Estes resultados ressaltam a influência positiva do aditivo cristalizante nas propriedades de resistência à penetração de água.

A análise de imagem por microscopia óptica indicou que com o passar da idade de cicatrização (14, 28, 35, 56 e 91 dias), os concretos que não haviam a presença de CA (referência), apesar de apresentar a formação de pequenos cristais devido a reação de hidratação tardia do cimento, não apresentaram cicatrização superficial relevante, praticamente não havendo alterações ao longo do tempo. Já em amostras com a presença de CA, observou-se um preenchimento considerável devido a precipitação dos cristais de $CaCO_3$, recuperando parcialmente a fissura. Sendo a principal ação do aditivo cristalizante observada na idade de 28 dias.

Em síntese, os ensaios realizados nesta pesquisa corroboram os benefícios da adição de aditivo cristalizante aos concretos, especialmente no que diz respeito à capacidade de autocicatrização. Os resultados indicam que os concretos sem carregamento e com aditivo cristalizante apresentaram desempenho superior, independentemente da idade em que o carregamento foi aplicado, sendo que a mesma não apresentou influências nas propriedades avaliadas. Essas conclusões ressaltam a eficácia dos aditivos cristalizantes como uma solução promissora para fortalecer a durabilidade e a resistência dos concretos estruturais. Salienta-se que os resultados e conclusões deste estudo são aplicáveis apenas aos dados e contextos abordados neste programa experimental. Portanto, são recomendados novos estudos para corroborar as conclusões aqui encontradas e expandir o entendimento sobre o tema.

5.1 APRENDIZADOS

Durante a elaboração deste trabalho, através da aquisição de conhecimentos, destaca-se algumas precauções e cuidados importantes a serem consideradas a fim de auxiliar outros pesquisadores.

- Manter monitoramento constante da temperatura da câmara e da água, pois variações de temperatura podem afetar a cinética da hidratação dos compostos;
- Realizar uma limpeza da fissura utilizando pistola de ar comprimido antes de capturar as primeiras imagens de microscopia ótica, a fim de evitar a liberação de partículas ao longo do tempo, garantindo assim uma avaliação precisa do fechamento superficial da fissura;
- Garantir a padronização do tamanho (zoom) e iluminação durante a captura de imagens de microscopia ótica para evitar sobreexposições que possam dificultar o processamento da imagem;
- Aumentar o número de corpos de prova utilizados em todos os ensaios para minimizar a variabilidade dos resultados e garantir uma análise mais representativa.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, cita-se:

- Avaliar o efeito de diferentes dosagens de aditivos cristalizantes na estrutura do concreto;
- Ampliar a faixa de análise na microscopia ótica, utilizando a maior ampliação possível;
- Utilização de softwares computacionais (MEV) para determinação das fissuras e microfissuras;
- Avaliar a eficácia da autocatrização interna de fissuras por meio de ensaios de durabilidade (difusão de cloretos, migração de cloretos, carbonatação, entre outros);
- Utilizar técnicas não destrutivas, como tomografia e escaneamento, para monitorar a evolução do fechamento interno de fissuras ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-JAWAD, Y.; HADDAD, R. **Effect of early overloading of concrete on strength at later ages**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 22, n. 5, p. 927–936, 1992. ISSN 0008-8846.
- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **REPORT ON CHEMICAL ADMIXTURES FOR CONCRETE, ACI 212.3R-19**. Farmington Hills, MI, EUA, 2010. 7 p.
- AL-NUMAN, B. S. et al. **Compressive Strength Formula for Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity**. In: *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, v. 26, n. 1, p. 8–13, 2015.
- ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. **Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete**. In: *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 910–921, 2016. ISSN 0950-0618.
- ALPES, E. T. de A. **Influência dos aditivos cristalizantes na impermeabilização do concreto com a utilização de materiais da região de Goiânia**. 63 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG), Toledo, 2019.
- AMADIO, A. P. **Determinação das faixas de velocidade ultrassônica superficial em concreto**. 83 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2018.
- ARAUJO JR., A. G. de et al. **Study of recycling Portland cement of high initial strength**. In: *Cerâmica*, v. 63, p. 58–64, 2017.
- ARY, C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade no concreto**. 81 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5738**: Concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 16697**: Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5739**: Concreto — ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 11 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo – determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 7 p.
- AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. **Crystalline Waterproofing Admixtures Effects on Self-healing and Permeability of Concrete**. In: 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering (NHICE-01), 2018.
- AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. **Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement**. In: Cement and Concrete Composites, v. 99, n. 0, p. 17–31, 2019.
- BANTHIA, N.; BIPARVA, A.; MINDESS, S. **Permeability of concrete under stress**. In: Cement and Concrete Research, v. 35, n. 9, p. 1651–1655, 2005. ISSN 0008-8846.
- BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. 102 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2018.
- BORG, R. P. et al. **Crack sealing capacity in chloride-rich environments of mortars containing different cement substitutes and crystalline admixtures**. In: Journal of Sustainable Cement-Based Materials, v. 7, n. 3, p. 141–159, 2017.
- BRUHWILER, E.; SAOUMA, V. E. **Water Fracture Interaction in Concrete—Part II: Hydrostatic Pressure in Cracks**. In: ACI Materials Journal, v. 92, p. 383–390, 1995.
- CALÇADA, L. M. L. **Estudo da Eficácia do Ensaio de Migração em condições de Fluxo Não Estacionário na Previsão da Penetração de Cloretos em Concreto**. 214 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Santa Catarina, 2004.
- CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 295 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CAPPELLESSO, V. G. et al. **Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete**. In: Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 1, n. 1, p. 1–12, 2016. ISSN 0008-8846.
- CARMONA, T. G.; CARMONA FILHO, A. **Fissuração nas estruturas de concreto - Boletim técnico**. [S.l.]: ALCONPAT Internacional, 2013.
- CHEUNG, J. et al. **Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement**. In: Cement and Concrete Research, v. 41, p. 1289–1309, 2011.
- COSTA, F. B. P. da. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

CUENCA, E.; SERNA, P. **Autogenous Self-Healing Capacity of Early-Age Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete**. In: *Sustainability*, v. 13, n. 6, p. 3061, 2021. ISSN 2071-1050.

CUENCA, E.; TEJEDOR, A.; FERRARA, L. **A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles**. In: *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 619–632, 2018. ISSN 0950-0618.

DACHERI, M. E. F. **Avaliação do comportamento de concretos com politereftalato de etileno submetidos a elevadas temperaturas**. 79 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete, 2019.

DAL MOLIN, D. C. C. **Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. 238 p. Dissertação (Mestrado) — Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1988.

DE BELIE, N. et al. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. In: *Advanced materials interfaces*, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.

DE NARDI, C. et al. **Effectiveness of crystalline admixtures and lime/cement coated granules in engineered self-healing capacity of lime mortars**. In: *Materials and Structures*, v. 50, n. 4, p. 191, 2017.

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

EDVARDBSEN, C. **Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete**. In: *Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*, p. 473–487, 1999.

ESTEVEZ, I. C. A. **Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade de concretos convencionais fissurados**. 103 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

ESTEVEZ, I. C. A.; MEDEIROS JUNIOR, R. A.; MEDEIROS, M. H. F. **NDT for bridges durability assessment on urban-industrial environment in Brazil**. In: *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, v. 36, n. 5, p. 500–515, 2018. ISSN 2398-4708.

FALLON, C. M. et al. **The investigations on properties of self-healing concrete with crystalline admixture and recycled concrete waste**. In: *MATEC Web of Conferences*, v. 364, 2022.

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

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. **On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing**. In: *Smart Materials and Structures*, v. 25, n. 8, p. 084002, 2016. ISSN 0964-1726.

FERREIRA, A. A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 132 p. Dissertação (Mestrado) — Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1999.

FERREIRA, M.; PINHEIRO, S. **Análise do desempenho mecânico com aditivo cristalizante após o self-sealing e self-healing na resistência à compressão de argamassas**. In: IV Mostra interdisciplinar de extensão: XI EXPOTEC, Manaus-AM, Brasil, 2017.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos**. 201 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG, Goiânia, 2003.

GAGNÉ, R.; ARGOUGES, M. **Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 2, p. 176–183, 2011. ISSN 0008-8846.

GERALDO, R. H.; GUADAGNINI, A. M.; CAMARINI, G. **Concreto autorreparável com aditivo cristalino feito com diferentes teores de cimento**. In: *Cerâmica*, v. 67, n. 383, p. 370–377, 2021.

GHOSH, S. K. **Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications**. *Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications*, p. 1–28, Weinheim: Wiley–VCH, 2009.

GOJEVIĆ, A. et al. **The Effect of Crystalline Waterproofing Admixtures on the Self-Healing and Permeability of Concrete**. In: *Materials*, v. 14, n. 8, 2021. ISSN 1996-1944.

GOMES, S. da R. et al. **Assessment of autonomous and autogenous healing on cementitious grouts promoted by additions of microcapsules and crystalline admixtures**. In: *Matec web of conferences*, v. 378, n. 07001, p. 1–5, 2023.

GONÇALVES JUNIOR, A. A. **Autocicatrização de materiais cimentícios com escória de alto-forno e ativador alcalino**. Tese (Doutorado) — Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 2022.

GUIGNONI, G. et al. **Avaliação da penetração acelerada de cloretos em concretos com aditivo impermeabilizante por cristalização e diferentes relações água/cimento**. In: *Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção*, Lisboa, Portugal, 2015.

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

HANEHARA, S.; YAMADA, K. **Rheology and early age properties of cement systems**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 21, p. 175–195, 2008.

HASSANI, E. M. et al. **Influence of Permeability-Reducing Admixtures on Water Penetration in Concrete**. In: *ACI Materials Journal*, v. 114, n. 9, p. 911, 2017.

- HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993.
- HERMAWAN, H. et al. **Influence of Crystalline Admixtures and Bacteria on the Fresh Properties of Self-healing Concrete**. In: Springer International Publishing, Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021, v. 40, p. 451–460, 2023.
- HIDALGO, A. et al. **Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their alkaline nature: Part I: Portland cement pastes**. In: Cement and Concrete Research, v. 37, n. 1, p. 63–70, 2007.
- HOLLMANN, C. F. **Avaliação da influência de aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020.
- HUANG, H. et al. **Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions**. In: Materials Design, v. 92, p. 499–511, 2016. ISSN 0264-1275.
- HUNG, C.-C.; SU, Y.-F. **Medium-term self-healing evaluation of Engineered Cementitious Composites with varying amounts of fly ash and exposure durations**. In: Construction and Building Materials, v. 118, p. 194–203, 2016. ISSN 0950-0618.
- IGARASHI, S. ichi; KUNIEDA, M.; NISHIWAKI, T. **Technical committee on autogenous healing in cementitious materials**. In: Japan: JCI. TC075B, 2009.
- JONKERS, H. M. **Bacteria-based self-healing concrete**. In: Genium, n. 1, p. 84–93, 2021.
- KANEMATSU, M. et al. **Quantification of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography**. In: Materials and Structures, v. 605(1-2), p. 154–158, 2009.
- KELHAM, S. **A water absorption test for concrete**. In: Magazine of Concrete Research, v. 40, n. 143, p. 106–110, 1998. ISSN 0024-9831.
- KUENZEL, C. et al. **The mechanism of hydration of MgO-hydromagnesite blends**. In: Cement and Concrete Research, v. 103, p. 123–129, 2018.
- LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 56 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) — Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2008.
- LENZ, S. K. **Influência de diferentes linhagens bacterianas e nutrientes na autocicatrização de matrizes a base de cimento com e sem ar incorporado**. 168 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.
- LI, H.-F. et al. **Effect of types of curing environments on the self-healing capacity of mortars incorporating crystalline admixture**. In: Case Studies in Construction Materials, v. 18, p. e01713, 2023. ISSN 2214-5095.
- LI, V. C.; YANG, E.-H. **Self Healing in Concrete Materials**. [S.l.]: Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. 161-193 p. ISBN 978-1-4020-6250-6.

- LI, W. et al. **Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials**. In: *Advanced Materials*, v. 30, n. 17, p. 1705679, 2018.
- LOPES, A. N. de M. **Avaliação Comparativa de Concretos com e sem Sílica Ativa para Resistências entre 50 e 65 MPa**. 191 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UnB, Brasília/DF, 1999).
- LORENZI, A. et al. **Utilização de ultra-som para o monitoramento de estruturas de concreto**. In: 111 Pan-American Conference for Nondestructive Test. Rio de Janeiro,, 2013.
- LORENZI, A. et al. **Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. In: . 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), p. 13, 2009.
- MAHMOODI, S.; SADEGHIAN, P. **Effect of different exposure conditions on the self-healing capacity of engineered cementitious composites with crystalline admixture**. In: *Structural Concrete*, v. 24, n. 2, 2023. ISSN 2133-2144.
- MAINES, A. et al. **Estudo de autocicatrização de fissuras em concreto com fibras metálicas utilizando aditivo cristalizante**. In: *Revista UNIFEDE Edição Tecnologias: Engenharia, Produção e Construção*, v. 1, n. 27, 2022.
- MARQUES, A. M. et al. **Estudo da autocicatrização do concreto**. 20 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Escola de Engenharia Mackenzie (EE), São Paulo, 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 3ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. ISBN 978-85-98576-12-1.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p. ISBN 978-85-98576213.
- MELLO, V. M. de. **Potencial de autocicatrização dos materiais cimentícios promovida pela biomineralização de carbonato de cálcio por diferentes linhagens bacterianas em uma matriz com ar incorporado**. 132 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2022.
- MENG, B. **Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters**. In: *Materials and Structures*, v. 27(3), p. 125–134, 1994.
- MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento portland : contribuição aos processos de autocicatrização**. 166 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2016.
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.
- MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. **Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete**. In: *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 398–414, 2019.

- NEHDI, M. L.; SOLIMAN, A. M. **Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research**. In: *Construction Materials*, v. 164, p. 57–77, 2011.
- NEPOMUCENO, J. M. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 793–827, 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. ISBN 978-85-8260-366-6.
- OLIVEIRA, A. d. S. **Estudo do Potencial de Aditivo Cristalizante como Estimulador de Autocicatrização de Fissuras de Matrizes Cimentícias**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2019.
- OLIVEIRA, A. de S. et al. **Crystalline admixture effects on crystal formation phenomena during cement pastes hydration**. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 139, n. 6, p. 3361–3375, 2020.
- OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYOMA, C. M. **Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto**. In: *Revista Concreto*, n. 55, 2009. ISSN 1809-7197.
- PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2020.
- PALIN, D.; WIKTOR, V.; JONKERS, H. **Autogenous healing of marine exposed concrete: Characterization and quantification through visual crack closure**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 73, p. 17–24, 2015. ISSN 0008-8846.
- PARK, S. S. et al. **Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure**. In: *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 597–604, 2012.
- PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. **Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete**. In: *Acta Polytechnica*, v. 56, n. 4, p. 291, 2016.
- PEDROSO, M. G. **Autocicatrização do concreto com diferentes tipos de cimentos em interação com catalisador cristalino**. 115 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Materiais e Componentes de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- PEREIRA, V. G. Álvares. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. 154 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.
- PETRY, N. d. S. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

POLESELLO, E.; MAUS, M. **A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido**. In: Revista Tecnologia e Tendências, v. 11, n. 1, p. 14–36, 2020.

QIAN, C. et al. **Application of microbial self-healing concrete: Case study**. In: Construction and Building Materials, v. 290, p. 123226, 2021. ISSN 0950-0618.

RAMÍREZ, F. C. **Deteção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. 169 p. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

RASHEEDUZZAFAR. **Influence of Cement Composition on Concrete Durability**. In: ACI Materials Journal, v. 89, p. 574–586, 1992.

RAUF, M. et al. **Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete**. In: Construction and Building Materials, v. 258, p. 119578, 2020. ISSN 0950-0618.

REDDY, P. Y.; RAMESH, B.; KUMAR, L. P. **Influence of bacteria in self healing of concrete - a review**. In: Materials Today: Proceedings. International Conference on Nanotechnology: Ideas, Innovation and Industries, v. 33, p. 4212–4218, 2020. ISSN 2214-7853.

REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A.; SASHIDHAR, C. **Micromechanical Properties of Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture and Silica Fume**. In: Materials Journal, v. 117, n. 3, p. 63–74, 2020.

REDDY, T. C. S. R.; THEJA, A. R.; SASHIDHAR, C. **Self-healing ability of high-strength fibre-reinforced concrete with fly ash and crystalline admixture**. In: Civil Engineering Journal, v. 5, n. 5, p. 971, 2018.

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

REINHARDT, H.-W.; SOSORO, M.; ZHU, X. feng. **Cracked and repaired concrete subject to fluid penetration**. In: Materials and Structures, v. 31, p. 74–83, 1998.

RESENDE, H. F. **Estudo da influência das elevadas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do concreto de alta resistência com e sem adição de fibras de polipropileno**. 138 p. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2021.

RIBEIRO, A. N. **Análise de concretos com adição de politereftalato de etileno em situação de incêndio sob influência de tintas intumescentes**. 72 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete, 2021.

ROIG-FLORES, M. et al. **Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments**. In: Construction and Building Materials, v. 86, p. 1–11, 2015. ISSN 0950-0618.

ROIG-FLORES, M. et al. **Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests**. In: Construction and Building Materials, v. 114, p. 447–457, 2016.

ROMANO, R. C. O. et al. **Monitoring hydration of ordinary Portland cement with bauxite residue**. In: *Cerâmica*, v. 62, p. 215–223, 2016.

SAN MARTIN, J. F. de F. **Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: Análise em obra e em laboratório**. 40 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

SANDBERG, P.; ROBERTS, L. **Cement-admixture interactions related to aluminate control**. In: *Journal of ASTM International*, v. 2, n. 6, p. 2–14, 2005.

SBARDELOTTO, E. K. **Avaliação da autocicatrização autógena de fissuras em materiais cimentícios com adição de escória de alto forno**. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, área de concentração Infraestrutura e Sistemas Urbanos. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. **Advances in understanding hydration of Portland cement**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 38–56, 2015.

SILVA FILHO, L. C. P. da; HELENE, P. Ibracon. **Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração**, In: ISAIA G. C. (ed). *Concreto: Ciência e Tecnologia*, n. 3, p. 1129–1174, 2011.

SILVA, L. M. B. da. **Desenvolvimento de um sistema especialista para diagnóstico de fissuras em concreto armado**. 166 p. Dissertação (Mestrado) — Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1996.

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

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. **Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive**. In: *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 4, p. 566–574, 2012. ISSN 0958-9465.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. **Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials**. In: *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 217–224, 2013. ISSN 0950-0618.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1998. 262 p. ISBN 85-7266-096-8.

STEFANOVSKA, I.; FIDANCHEVSKI, E. **Self-healing of cement mortars based on fly ash and crystalline admixture**. *MATEC Web Conf.*, In: SMARTINCS'23 Conference on Self-Healing, Multifunctional and Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems, v. 378, p. 02018, 2023.

STEPKOWSKA, E. T. et al. **Phase transformation on heating of an aged cement paste**. In: *Thermochimica Acta*, v. 420, n. 1-2, p. 79–87, 2004.

STURRUP, V. R.; VECCHIO, F. J.; CARATIN, H. **Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength**. [S.l.]: Detroit: American Concrete Institute, 1984.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

TAKAGI, E. M. et al. **Self-healing of self-compacting concretes made with blast furnace slag cements activated by crystalline admixture**. In: *Int. J. Materials and Product Technology*, v. 56, n. 1/2, 2018.

TAN, N. P. B. et al. **Silica-based self-healing microcapsules for self-repair in concrete**. In: *Journal of Applied Polymer Science*, v. 133, n. 12, p. 1–12, 2015.

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

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. [S.l.]: Academic Press, 1990.

TER HEIDE, N. **Crack healing in hydrating concrete**. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Microlab., Delft, 2005.

TER HEIDE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-healing of early-age cracks in concrete**. In: *Proc. of 1st International Conference on Self-Healing Materials*, 2007.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. **A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 36, p. 30–38, 2006.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 1ª. ed. São Paulo: PINI: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. v. 2.

VAN BELLEGHEM, B. et al. **Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 113, p. 130–139, 2018. ISSN 0008-8846.

VAN BELLEGHEMA, B.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Efficiency of self-healing cementitious materials with encapsulated polyurethane to reduce water ingress through cracks**. In: *Materiales de Construcción*, v. 68, n. 330, p. e159, 2018. ISSN 0465-2746.

VAN BREUGEL, K. **Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure**. In: *37th conference on our world in concrete and structures (OWICS 2012)*, Singapore, p. 1–17, 2012.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-Healing in Cementitious Materials - A Review**. In: *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013. ISSN 1996-1944.

VAN TITTELBOOM, K. et al. **Use of bacteria to repair cracks in concrete**. In: *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 1, p. 157–166, 2010.

- VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017.
- VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.
- VILELA, H. T. P.; TEIXEIRA FILHO, M. G.; CAMPOS NETO, T. F. **Effects of the use of crystallizing admixtures on mortar alkali-aggregate reactions and absorption**. In: Revista ALCONPAT, v. 11, n. 1, p. 1–17, 2021. ISSN 2007-6835.
- WANG, J. et al. **X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete**. In: Cement Concrete Composites, v. 53, p. 289–304, 2014.
- WANG, R. et al. **Self-healing of high-performance engineered cementitious materials with crystalline admixture in the seawater environment**. In: Journal of Building Engineering, v. 63, p. 105472, 2023. ISSN 2352-7102.
- Wang, X. et al. **Effect of fly ash on the self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixture under different conditions**. In: AIP Advances, v. 11, n. 7, p. 075018, 2021.
- WEBER, R. V. **Avaliação da autocicatrização autógena de compósitos cimentícios com adições de metacaulim e sílica ativa**. 63 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Toledo, 2022.
- WHITEHURST, E. A. **Evaluation of concrete properties from sonic tests**. [S.l.]: Detroit: American Concrete Institute, 1966.
- WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. **review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material**. In: Construction and Building Materials, v. 28, p. 571–583, 2012.
- YANG, Y. et al. **Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles**. In: Cement and Concrete Research, v. 39, n. 5, p. 382–390, 2009. ISSN 0008-8846.
- YANG, Y.; YANG, E.-H.; LI, V. C. **A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements**. In: Materials and Structures, v. 45, n. 11, p. 1625–1638, 2012.
- ZHANG, L. V. et al. **Crack self-healing in bio-green concrete**. In: Composites Part B: Engineering, v. 227, p. 109397, 2021. ISSN 1359-8368.
- ZHANG, W. et al. **Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review**. In: Composites Part B: Engineering, v. 189, p. 107892, 2020. ISSN 1359-8368.
- ZHANG, Y.-R. et al. **Effects of the charge characteristics of polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes**. In: Cement and Concrete Research, v. 67, p. 184–196, 2015.

ZHONG, W.; YAO, W. **Influence of damage degree on self-healing of concrete**. In: *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 6, p. 1137–1142, 2008. ISSN 0950-0618.

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

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

ANEXO A – DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Resultados de resistência à compressão axial									
Referência					Aditivo Cristalizante				
Carregamento	Idade (dias)				Carregamento	Idade (dias)			
	14	28	56	91		14	28	56	91
0%	40,78	44,18	48,09	48,76	43,04	50,74	51,70	51,78	
	38,21	42,00	46,51	50,23	43,77	48,88	52,08	51,68	
	37,82	39,81	45,85	48,21	44,49	47,02	52,46	53,09	
50%	34,98	36,08	40,98	46,67	36,96	43,88	43,88	46,03	
	36,12	37,85	38,64	45,20	38,24	40,64	44,17	47,63	
	33,84	39,62	40,14	45,56	36,73	42,26	41,75	49,23	
80%	35,95	45,17	44,18	44,21	42,19	34,54	43,93	48,46	
	34,94	44,35	42,83	45,46	39,89	44,35	45,78	45,48	
	33,92	41,73	46,43	44,37	41,04	39,45	42,08	46,97	

Referência				Aditivo Cristalizante			
Carregamento	Idade (dias)			Carregamento	Idade (dias)		
	35	56	91		35	56	91
0%	43,79	48,09	48,76	49,52	51,70	51,78	
	44,28	46,51	50,23	50,01	52,08	51,68	
	43,30	45,85	48,21	50,50	52,46	53,09	
50%	44,49	45,91	50,08	42,96	42,64	45,60	
	44,73	45,55	47,45	44,66	42,98	46,42	
	44,97	46,26	46,91	40,48	40,02	45,24	
80%	40,82	45,85	47,46	41,70	42,55	47,73	
	40,89	45,79	43,38	39,50	45,64	46,90	
	38,59	43,21	45,42	41,79	45,08	44,11	

ANEXO B – DADOS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica									
Referência				Aditivo Cristalizante					
Carregamento	Idade (dias)			Carregamento	Idade (dias)				
	14	28	56		14	28	56	91	
0%	4950,50	5000,00	5000,00	5025,13	0%	4950,50	4938,27	4950,50	4975,12
	4830,92	4842,62	4866,18	4878,05		4796,16	4889,98	4889,98	4938,27
	4842,62	4938,27	4950,50	5000,00		4901,96	4987,53	4889,98	4914,00
50%	4842,62	4926,11	4807,69	4938,27	50%	4807,69	4938,27	5025,13	4962,78
	4784,69	4878,05	4796,16	4750,59		4901,96	4962,78	5037,78	5012,53
	4739,34	4796,16	4694,84	4796,16		4830,92	4938,27	4962,78	4950,50
80%	4716,98	4739,00	4739,34	4796,16	80%	4866,18	4926,11	4950,50	4962,78
	4819,28	4950,50	4975,12	5000,00		4878,05	4962,78	4975,12	4975,12
	4716,98	4854,37	4739,34	4866,18		4773,27	4842,62	4889,98	4926,11

Referência				Aditivo Cristalizante			
Carregamento	Idade (dias)			Carregamento	Idade (dias)		
	35	56	91		35	56	91
0%	5012,53	5000,00	5025,13	0%	5012,53	4950,50	4975,12
	4842,62	4866,18	4878,05		4842,62	4889,98	4938,27
	4938,27	4950,50	5000,00		4938,27	4889,98	4914,00
50%	4926,11	4830,92	4914,00	50%	4938,27	4938,27	4926,11
	4854,37	4796,16	4830,92		4750,59	4987,53	4926,11
	4975,12	4854,37	4807,69		4987,53	5025,13	4901,96
80%	4889,98	4761,90	4962,78	80%	4842,62	4914,00	4950,50
	4950,50	4750,59	4938,27		4866,18	4926,11	5000,00
	4889,98	4807,69	5000,00		4914,00	4889,98	5025,13

ANEXO C – DADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA CONCRETOS PRÉ-CARREGADOS AOS 7 DIAS

REFERÊNCIA PRÉ-CARREGADOS AOS 7 DIAS									
	Identificação	reta 1	reta 2	e (m)	M(sg)	x(h/2)	y(g)	S(g/cm ³ .h/2)	M(h/m ³)
14 dias	REF I - 0%	0,1361x + 2,7826	0,0220x + 10,125	0,05	519,00	64,351	11,54	0,00173	1656398,33
	REF II - 0%	0,1476x + 3,6370	0,0114x + 13,306	0,05	500,00	70,991	14,12	0,00188	2015899,59
	REF III - 0%	0,1551x + 2,8534	0,0144x + 12,258	0,05	484,00	66,842	13,22	0,00197	1787114,81
	REF IV - 0%	0,1629x + 2,4259	0,0259x + 11,136	0,05	508,00	63,577	12,78	0,00207	1616832,91
	REF V - 0%	0,1486x + 2,7487	0,0159x + 11,819	0,05	519,00	68,352	12,91	0,00189	1868794,08
	REF VI - 0%	0,1480x + 3,0597	0,0201x + 12,485	0,05	537,00	73,693	13,97	0,00188	2172247,30
14 dias	REF I - PC 7 - 50%	0,1975x + 3,2437	0,0293x + 13,960	0,05	511,00	63,712	15,83	0,00251	1725656,16
	REF II - PC 7 - 50%	0,4042x + 6,0296	0,0358x + 22,078	0,05	533,00	46,905	24,62	0,00515	846599,79
	REF III - PC 7 - 50%	0,1941x + 3,4254	0,0293x + 14,668	0,05	514,00	68,220	16,67	0,00247	1978498,05
	REF IV - PC 7 - 50%	0,2136x + 2,4358	0,0424x + 13,238	0,05	565,00	63,097	15,91	0,00272	1692518,52
	REF V - PC 7 - 50%	0,1661x + 2,7827	0,0108x + 15,720	0,05	498,00	83,305	16,62	0,00211	2616555,36
	REF VI - PC 7 - 50%	0,2071x + 3,1928	0,0484x + 12,944	0,05	523,00	61,444	15,92	0,00264	1605013,90
14 dias	REF I - PC 7 - 80%	0,2346x + 3,1210	0,0250x + 17,378	0,0485	520,00	68,020	19,08	0,00299	1966936,16
	REF II - PC 7 - 80%	0,2333x + 3,2051	0,0528x + 14,933	0,0485	539,00	64,975	18,36	0,00297	1794744,45
	REF III - PC 7 - 80%	0,2475x + 3,9694	0,0247x + 19,351	0,0485	532,00	69,038	21,06	0,00315	2026232,03
	REF IV - PC 7 - 80%	0,2112x + 4,1084	0,0061x + 21,772	0,0515	510,00	86,122	22,30	0,00269	2796486,09
	REF V - PC 7 - 80%	0,2148x + 3,1249	0,0108x + 20,820	0,0515	513,00	86,741	21,76	0,00273	2836816,54
	REF VI - PC 7 - 80%	0,1999x + 4,3859	0,0108x + 20,520	0,0515	519,00	85,320	21,44	0,00255	2744681,61
28 dias	REF I - 0%	0,0938x + 0,4411	0,0076x + 6,5995	0,05	525,00	71,443	7,14	0,00119	2041649,78
	REF II - 0%	0,1250x + 1,7479	0,0152x + 8,5090	0,05	506,00	61,577	9,44	0,00159	1516666,28
	REF III - 0%	0,1099x + 0,8951	0,0197x + 6,4452	0,05	491,00	61,531	7,66	0,00140	1514427,66
	REF IV - 0%	0,1201x + 1,6636	0,0138x + 8,5863	0,05	514,00	65,124	9,49	0,00153	1696463,36
	REF V - 0%	0,0983x + 0,9794	0,0107x + 7,0429	0,05	526,00	69,218	7,78	0,00125	1916454,63
	REF VI - 0%	0,1060x + 1,0763	0,0183x + 6,4524	0,05	544,00	61,301	7,57	0,00135	1503126,33
28 dias	REF I - PC 7 - 50%	0,1810x + 0,7157	0,0126x + 11,565	0,0485	467,00	64,426	12,38	0,00230	1764557,38
	REF II - PC 7 - 50%	0,1932x + 0,6764	0,0211x + 10,708	0,0485	502,00	58,289	11,94	0,00246	1444425,66
	REF III - PC 7 - 50%	0,1658x + 2,3879	0,0138x + 13,822	0,0515	489,00	75,224	14,86	0,00211	2133547,61
	REF IV - PC 7 - 50%	0,2235x + 1,2347	0,0180x + 13,774	0,05	525,00	61,018	14,87	0,00285	1489302,52
	REF V - PC 7 - 50%	0,1503x + 1,4581	0,0089x + 12,677	0,0515	509,00	79,342	13,38	0,00191	2373489,29
	REF VI - PC 7 - 50%	0,0927x + 1,4164	0,0089x + 7,4770	0,05	540,00	72,322	8,12	0,00118	2092200,00
28 dias	REF I - PC 7 - 80%	0,2056x + 1,6934	0,0067x + 14,550	0,05	487,00	64,639	14,98	0,00262	1671254,88
	REF II - PC 7 - 80%	0,2091x + 0,7521	0,0155x + 12,666	0,05	513,00	61,539	13,62	0,00266	1514806,59
	REF III - PC 7 - 80%	0,1515x + 1,5272	0,0090x + 12,674	0,05	504,00	78,223	13,38	0,00193	2447544,97
	REF IV - PC 7 - 80%	0,2256x + 1,9594	0,0219x + 14,161	0,05	473,00	59,900	15,47	0,00287	1435196,94
	REF V - PC 7 - 80%	0,2126x + 1,4354	0,0132x + 13,402	0,05	510,00	60,013	14,19	0,00271	1440625,95
	REF VI - PC 7 - 80%	0,1997x + 0,6984	0,0067x + 11,950	0,05	524,00	58,298	12,34	0,00254	1359483,50
56 dias	REF I - 0%	0,1025x + 0,1627	0,0088x + 8,0777	0,05	523,00	84,461	8,82	0,00134	2853467,31
	REF II - 0%	0,1109x + 0,1849	0,0088x + 9,0777	0,05	507,00	87,099	9,84	0,00141	3034488,93
	REF III - 0%	0,1261x - 0,2068	0,0222x + 8,4892	0,05	490,00	79,715	10,26	0,00161	2541799,55
	REF IV - 0%	0,1509x - 0,3573	0,0103x + 12,440	0,05	516,00	85,937	13,33	0,00192	2954046,55
	REF V - 0%	0,1418x + 0,4238	0,0237x + 11,351	0,05	526,00	92,525	13,54	0,00181	3424348,68
	REF VI - 0%	0,1247x - 0,3145	0,0193x + 10,447	0,05	542,00	96,134	12,30	0,00159	3696681,16
56 dias	REF I - PC 7 - 50%	0,0792x + 0,8900	0,0055x + 8,2296	0,05	474,00	99,588	8,78	0,00101	3967069,41
	REF II - PC 7 - 50%	0,0909x + 0,1663	0,0055x + 9,2296	0,05	509,00	106,128	9,81	0,00116	4505229,94
	REF III - PC 7 - 50%	0,1111x + 0,7310	0,0067x + 9,7107	0,05	497,00	86,012	10,29	0,00144	2959256,77
	REF IV - PC 7 - 50%	0,1036x + 0,0046	0,0144x + 9,5820	0,05	533,00	107,370	11,13	0,00132	4611322,91
	REF V - PC 7 - 50%	0,0787x + 0,1254	0,0121x + 6,1819	0,05	516,00	90,938	7,28	0,00100	3307919,83
	REF VI - PC 7 - 50%	0,0590x + 1,0691	0,0077x + 5,5655	0,05	542,00	87,649	6,24	0,00075	3072947,40
56 dias	REF I - PC 7 - 80%	0,0776x + 0,5375	0,0040x + 7,5302	0,05	497,00	95,010	7,91	0,00099	3610722,86
	REF II - PC 7 - 80%	0,0930x + 1,3077	0,0055x + 9,7296	0,05	519,00	96,250	10,26	0,00118	3705647,00
	REF III - PC 7 - 80%	0,0886x + 1,1130	0,0068x + 8,2106	0,05	510,00	86,768	8,80	0,00113	3011455,32
	REF IV - PC 7 - 80%	0,0895x + 0,2607	0,0084x + 8,1523	0,05	484,00	97,307	8,97	0,00114	3787463,11
	REF V - PC 7 - 80%	0,0957x + 0,7989	0,0077x + 8,6654	0,05	519,00	89,392	9,35	0,00122	3196375,12
	REF VI - PC 7 - 80%	0,0895x + 0,2449	0,0040x + 8,6302	0,05	531,00	98,074	9,02	0,00114	3847379,01
91 dias	REF I - 0%	0,0076x + 5,0418	0,0527x + 0,4234	0,05	529,00	102,404	5,82	0,00010	4194594,63
	REF II - 0%	0,0227x + 2,6086	0,0467x + 0,1790	0,05	515,00	101,571	4,91	0,00029	4126652,67
	REF III - 0%	0,0103x + 5,7466	0,0602x + 0,9507	0,05	498,00	96,110	6,74	0,00013	3694869,79
	REF IV - 0%	0,0235x + 4,237	0,0588x + 0,6043	0,05	525,00	102,909	6,66	0,00030	4236133,60
	REF V - 0%	0,0076x + 4,3418	0,0483x - 0,0357	0,05	537,00	105,801	5,15	0,00010	4477539,18
	REF VI - 0%	0,0151x + 3,8669	0,0450x + 0,1371	0,05	550,00	124,742	5,25	0,00019	6224274,02
91 dias	REF I - PC 7 - 50%	0,0573x + 0,3274	0,0116x + 5,3560	0,05	477,00	110,035	6,63	0,00073	4843081,45
	REF II - PC 7 - 50%	0,0771x + 1,0381	0,0066x + 8,8736	0,05	509,00	111,142	9,61	0,00098	4941003,79
	REF III - PC 7 - 50%	0,0818x + 0,1178	0,0113x + 6,8004	0,05	500,00	94,789	7,87	0,00104	3592955,46
	REF IV - PC 7 - 50%	0,0640x + 1,0831	0,0079x + 6,9678	0,05	535,00	104,897	7,80	0,00081	4401319,78
	REF V - PC 7 - 50%	0,0716x + 1,1397	0,0080x + 7,5977	0,05	515,00	101,541	8,41	0,00091	4124220,17
	REF VI - PC 7 - 50%	0,0653x + 1,9196	0,0098x + 7,6347	0,05	542,00	102,975	8,64	0,00083	4241521,70
91 dias	REF I - PC 7 - 80%	0,0758x + 1,5117	0,0167x + 7,6105	0,05	497,00	103,195	9,33	0,00097	4259648,99
	REF II - PC 7 - 80%	0,0705x + 0,7870	0,0129x + 6,4803	0,05	521,00	98,842	7,76	0,00090	3907897,48
	REF III - PC 7 - 80%	0,0602x + 0,9009	0,0066x + 6,5625	0,05	512,00	105,622	7,26	0,00077	4462813,90
	REF IV - PC 7 - 80%	0,0752x + 0,8063	0,0117x + 7,5365	0,05	485,00	105,987	8,78	0,00096	4493331,72
	REF V - PC 7 - 80%	0,0771x + 1,6805	0,0117x + 8,7365	0,05	519,00	107,890	10,00	0,00098	4656092,92
	REF VI - PC 7 - 80%	0,0602x + 1,2321	0,0066x + 7,0625	0,05	532,00	108,776	7,78	0,00077	4732897,66

ADITIVO CRISTALIZANTE PRÉ-CARREGADOS AOS 7 DIAS									
	Identificação	reta 1	reta 2	e (m)	M(sg)	x(h/2)	y(g)	S(g/cm ² .h/2)	M(h/m ²)
14 dias	AC I - 0%	0,1527x + 3,1100	0,0201x + 11,885	0,05	499,00	66,176	13,22	0,00194	1651173,63
	AC II - 0%	0,1482x + 2,1452	0,0303x + 9,5258	0,05	532,00	62,601	11,42	0,00189	1665989,46
	AC III - 0%	0,1433x + 2,7296	0,0072x + 11,940	0,05	494,00	67,674	12,43	0,00182	1726737,32
	AC IV - 0%	0,1739x + 2,1735	0,0327x + 9,3935	0,05	540,00	51,133	11,07	0,00221	1111530,86
	AC V - 0%	0,1308x + 2,1529	0,0254x + 9,8570	0,05	517,00	73,094	11,71	0,00167	2014411,27
	AC VI - 0%	-	-	-	-	-	-	-	-
14 dias	AC I - PC 7 - 50%	0,1428x + 1,3333	0,0101x + 11,265	0,0515	539,00	74,843	12,02	0,00182	2111985,25
	AC II - PC 7 - 50%	0,1195x + 2,5920	0,0101x + 9,8655	0,05	512,00	66,485	10,54	0,00152	1768122,02
	AC III - PC 7 - 50%	0,0856x + 3,2446	0,0067x + 9,4426	0,05	508,00	78,649	9,97	0,00109	2472347,70
	AC IV - PC 7 - 50%	0,1660x + 3,1989	0,0160x + 12,303	0,05	490,00	60,694	13,27	0,00211	1473504,65
	AC V - PC 7 - 50%	0,1387x + 3,3449	0,0112x + 10,813	0,0485	498,00	58,573	11,47	0,00177	1458533,48
	AC VI - PC 7 - 50%	0,1606x + 2,2821	0,0144x + 11,594	0,05	504,00	63,693	12,51	0,00204	1622713,51
14 dias	AC I - PC 7 - 80%	0,1132x + 2,0305	0,0096x + 8,1039	0,05	514,00	58,624	8,67	0,00144	1374688,35
	AC II - PC 7 - 80%	0,1511x + 2,3138	0,0096x + 13,504	0,055	519,00	79,083	14,26	0,00192	2067641,54
	AC III - PC 7 - 80%	0,1157x + 1,7509	0,0096x + 8,4039	0,05	535,00	62,705	9,01	0,00147	1572766,57
	AC IV - PC 7 - 80%	0,1323x + 2,4048	0,0071x + 8,4954	0,05	530,00	48,647	8,84	0,00168	946610,88
	AC V - PC 7 - 80%	0,4582x + 2,4024	0,0212x + 14,718	0,05	519,00	28,183	15,32	0,00583	317708,93
	AC VI - PC 7 - 80%	-	-	-	-	-	-	-	-
28 dias	AC I - 0%	0,0954x + 1,2154	0,0076x + 7,1998	0,05	506,00	68,159	7,72	0,00121	1858284,43
	AC II - 0%	0,1075x + 2,3541	0,0243x + 7,0421	0,05	536,00	56,346	8,41	0,00137	1269955,62
	AC III - 0%	0,1041x + 2,3912	0,0259x + 6,7629	0,05	499,00	55,904	8,21	0,00133	1250107,00
	AC IV - 0%	0,1161x + 1,9778	0,0152x + 8,5096	0,05	545,00	64,735	9,49	0,00148	1676267,85
	AC V - 0%	0,1079x + 0,7714	0,0107x + 7,2433	0,05	523,00	66,583	7,96	0,00137	1773336,11
	AC VI - 0%	0,4353x + 0,8510	0,0157x + 10,302	0,05	521,00	22,524	10,66	0,00554	202929,21
28 dias	AC I - PC 7 - 50%	0,1596x + 2,2766	0,0062x + 11,383	0,05	527,00	59,402	11,76	0,00203	1411461,80
	AC II - PC 7 - 50%	0,0997x + 1,3443	0,0101x + 8,0456	0,05	513,00	74,791	8,80	0,00122	2237495,10
	AC III - PC 7 - 50%	0,1232x + 0,6599	0,0057x + 7,4559	0,0485	510,00	57,838	7,79	0,00157	1422156,96
	AC IV - PC 7 - 50%	0,1478x + 2,0516	0,0091x + 10,077	0,0485	494,00	57,862	10,60	0,00188	1423301,73
	AC V - PC 7 - 50%	0,1125x + 1,2473	0,0057x + 9,0559	0,0515	500,00	73,114	9,47	0,00143	2015530,57
	AC VI - PC 7 - 50%	0,1421x + 1,5839	0,0125x + 9,4972	0,0485	507,00	61,059	10,26	0,00181	1584972,68
28 dias	AC I - PC 7 - 80%	0,0949x + 1,2833	0,0035x + 8,1092	0,0515	515,00	74,682	8,37	0,00121	2102872,75
	AC II - PC 7 - 80%	-	-	-	-	-	-	-	-
	AC III - PC 7 - 80%	0,1256x + 0,8630	0,0097x + 7,6027	0,0485	537,00	58,151	8,17	0,00160	1437575,89
	AC IV - PC 7 - 80%	0,0940x + 2,8912	0,0057x + 9,0561	0,0515	531,00	69,818	9,45	0,00120	1837876,00
	AC V - PC 7 - 80%	0,1502x + 1,4281	0,0001x + 7,0961	0,05	527,00	40,170	7,46	0,00191	645454,52
	AC VI - PC 7 - 80%	-	-	-	-	-	-	-	-
56 dias	AC I - 0%	0,1097x - 0,2415	0,0148x + 8,1441	0,05	504,00	83,273	9,38	0,00140	2614526,92
	AC II - 0%	0,1410x + 0,8215	0,0192x + 11,548	0,05	536,00	88,067	13,24	0,00180	2924199,78
	AC III - 0%	0,1327x + 0,5092	0,0237x + 8,0522	0,05	499,00	69,202	9,69	0,00169	2035877,97
	AC IV - 0%	0,1541x + 0,2382	0,0132x + 12,282	0,05	545,00	85,478	13,41	0,00196	2754803,50
	AC V - 0%	0,1228x + 1,1208	0,0148x + 9,3441	0,05	523,00	76,142	10,47	0,00156	2464684,20
	AC VI - 0%	0,1311x + 2,0449	0,0103x + 9,5401	0,0485	517,00	62,046	10,18	0,00167	1636624,72
56 dias	AC I - PC 7 - 50%	0,0931x + 1,0031	0,0099x + 6,0756	0,05	544,00	60,968	6,68	0,00119	1486816,77
	AC II - PC 7 - 50%	0,0765x + 0,3891	0,0061x + 5,1598	0,05	518,00	67,766	5,57	0,00097	1836871,97
	AC III - PC 7 - 50%	0,0692x + 1,1340	0,0095x + 4,8987	0,05	514,00	63,060	5,50	0,00088	1590640,65
	AC IV - PC 7 - 50%	0,0768x + 0,7239	0,0098x + 5,7475	0,05	501,00	74,979	6,48	0,00098	2248746,44
	AC V - PC 7 - 50%	0,0807x + 0,7944	0,0056x + 5,5829	0,05	505,00	63,762	5,94	0,00103	1626219,26
	AC VI - PC 7 - 50%	0,0940x + 1,1604	0,0080x + 6,6677	0,05	513,00	64,038	7,18	0,00120	1640365,24
56 dias	AC I - PC 7 - 80%	0,0594x + 0,9587	0,0067x + 4,5793	0,0500	520,00	68,702	5,04	0,00076	1887990,72
	AC II - PC 7 - 80%	0,1019x + 0,3110	0,0134x + 6,7906	0,0500	540,00	73,216	7,77	0,00130	2144222,47
	AC III - PC 7 - 80%	0,0876x + 0,5087	0,0090x + 6,7597	0,0530	542,00	79,529	7,48	0,00112	2251656,65
	AC IV - PC 7 - 80%	0,0756x + 1,3865	0,0105x + 4,8908	0,0470	536,00	53,829	5,46	0,00096	1311731,25
	AC V - PC 7 - 80%	0,4554x + 0,9884	0,0068x + 4,2893	0,0500	521,00	67,920	4,75	0,00071	1845237,14
	AC VI - PC 7 - 80%	0,0772x + 0,4200	0,0060x + 3,7734	0,0485	536,00	47,098	4,06	0,00098	943033,79
91 dias	AC I - 0%	0,0205x + 3,4927	0,0482x + 0,5858	0,05	510,00	104,942	5,64	0,00026	4152275,76
	AC II - 0%	0,0116x + 4,6793	0,0562x + 0,3614	0,05	544,00	96,821	5,80	0,00015	3749603,50
	AC III - 0%	0,0161x + 3,6860	0,0470x + 0,7342	0,05	506,00	95,528	5,22	0,00020	3440665,40
	AC IV - 0%	0,0296x + 3,7593	0,0657x + 0,7968	0,05	553,00	82,064	6,19	0,00038	2693781,13
	AC V - 0%	0,0243x + 3,0879	0,0541x + 0,6244	0,05	531,00	82,668	5,10	0,00031	2905287,58
	AC VI - 0%	-	-	-	-	-	-	-	-
91 dias	AC I - PC 7 - 50%	0,1102x + 0,9256	0,0062x + 9,1462	0,05	541,00	78,948	9,64	0,00140	2493119,54
	AC II - PC 7 - 50%	0,0752x + 0,6973	0,0110x + 5,8829	0,05	517,00	80,773	6,77	0,00096	2609684,24
	AC III - PC 7 - 50%	0,0723x + 0,0281	0,0110x + 4,9829	0,05	513,00	80,666	5,87	0,00092	2602774,26
	AC IV - PC 7 - 50%	0,1029x + 0,9015	0,0062x + 8,8462	0,05	499,00	82,158	9,36	0,00131	2699989,33
	AC V - PC 7 - 50%	0,0829x + 0,5267	0,0094x + 6,1435	0,05	504,00	76,419	6,86	0,00106	2335948,34
	AC VI - PC 7 - 50%	0,1010x + 0,2074	0,0062x + 7,7462	0,05	512,00	79,523	8,24	0,00129	2529576,16
91 dias	AC I - PC 7 - 80%	0,0654x + 0,3373	0,0066x + 5,7708	0,0515	519,00	92,406	6,38	0,00083	3219513,37
	AC II - PC 7 - 80%	-	-	-	-	-	-	-	-
	AC III - PC 7 - 80%	-	-	-	-	-	-	-	-
	AC IV - PC 7 - 80%	0,0682x + 0,5010	0,0099x + 5,8304	0,0515	536,00	91,413	6,74	0,00087	3150685,60
	AC V - PC 7 - 80%	0,0762x + 0,0612	0,0067x + 5,1306	0,0485	530,00	72,941	5,62	0,00097	2261830,39
	AC VI - PC 7 - 80%	0,0882x + 0,6514	0,0124x + 5,7853	0,05	531	67,730	6,63	0,00112	1834916,86

REFERÊNCIA PRÉ-CARREGADOS AOS 28 DIAS									
	Identificação	reta 1	reta 2	e (m)	Ms(g)	x(h1/2)	y(g)	S(g/cm².h1/2)	M(h/m²)
35 dias	REF I - 0%	0,1678x + 0,2985	0,0277x + 11,430	0,05	519,00	79,454	13,63	0,00214	2525172,80
	REF II - 0%	0,1643x - 0,2850	0,0327x + 10,016	0,05	504,00	73,944	12,43	0,00209	2187072,39
	REF III - 0%	0,2043x - 0,6177	0,0054x + 15,918	0,05	485,00	76,925	16,33	0,00260	2366956,72
	REF IV - 0%	0,2308x - 0,3173	0,0620x + 13,355	0,05	508,00	77,238	18,14	0,00294	2386256,22
	REF V - 0%	0,2264x - 0,5272	0,0342x + 15,899	0,05	518,00	79,978	18,63	0,00288	2558601,65
	REF VI - 0%	0,1925x - 0,9298	0,0499x + 12,155	0,05	538,00	78,718	16,08	0,00245	2478615,24
35 dias	REF I - PC 28 - 50%	0,2146x + 2,9501	0,0207x + 22,247	0,05	479,00	99,520	24,31	0,00273	3961680,66
	REF II - PC 28 - 50%	0,2231x + 4,2569	0,0207x + 24,047	0,05	523,00	97,777	26,07	0,00284	3824150,30
	REF III - PC 28 - 50%	0,2275x + 3,8871	0,0207x + 24,647	0,05	509,00	100,386	26,72	0,00290	4030968,80
	REF IV - PC 28 - 50%	0,2427x + 3,8822	0,0267x + 25,398	0,05	538,00	99,610	28,06	0,00309	3968875,60
	REF V - PC 28 - 50%	0,2198x + 3,7079	0,0177x + 23,472	0,05	479,00	97,794	25,20	0,00280	3825440,48
	REF VI - PC 28 - 50%	0,2358x + 3,8212	0,0030x + 26,775	0,05	474,00	98,599	27,07	0,00300	3888689,13
35 dias	REF I - PC 28 - 80%	0,1645x + 2,7966	0,0098x + 18,987	0,05	499,00	104,657	20,01	0,00209	4381214,55
	REF II - PC 28 - 80%	0,1703x + 4,3580	0,0030x + 20,876	0,05	475,00	98,733	21,17	0,00217	3899267,53
	REF III - PC 28 - 80%	0,1850x + 4,0861	0,0177x + 20,174	0,05	487,00	96,162	21,88	0,00236	3698850,90
	REF IV - PC 28 - 80%	0,1736x + 4,2180	0,0083x + 20,466	0,05	503,00	98,294	21,28	0,00221	3864685,03
	REF V - PC 28 - 80%	0,1859x + 3,5363	0,0114x + 21,242	0,05	501,00	101,465	22,40	0,00237	4118085,24
	REF VI - PC 28 - 80%	0,1832x + 5,1023	0,0117x + 21,822	0,05	491,00	97,491	22,96	0,00233	3801795,08
56 dias	REF I - 0%	0,1025x + 0,1637	0,0088x + 8,0777	0,05	523,00	84,461	8,82	0,00131	2853467,31
	REF II - 0%	0,1109x + 0,1849	0,0088x + 9,0777	0,05	507,00	87,099	9,84	0,00141	3034488,93
	REF III - 0%	0,1261x - 0,2068	0,0222x + 8,4892	0,05	490,00	79,715	10,26	0,00161	2541799,55
	REF IV - 0%	0,1509x - 0,3573	0,0103x + 12,440	0,05	516,00	85,937	13,33	0,00192	2954046,55
	REF V - 0%	0,1418x + 0,4238	0,0237x + 11,351	0,05	526,00	92,525	13,54	0,00181	3424348,68
	REF VI - 0%	0,1247x - 0,3145	0,0193x + 10,447	0,05	542,00	96,134	12,30	0,00159	3696681,16
56 dias	REF I - PC 28 - 50%	0,1177x + 1,9321	0,0056x + 12,723	0,05	492,00	96,261	13,26	0,00150	3706500,83
	REF II - PC 28 - 50%	0,1225x + 1,2213	0,0068x + 11,405	0,05	537,00	88,018	12,00	0,00156	3098877,92
	REF III - PC 28 - 50%	0,1174x + 0,8244	0,0066x + 10,611	0,05	524,00	88,327	11,19	0,00149	3120643,42
	REF IV - PC 28 - 50%	0,1252x + 0,6963	0,0045x + 12,569	0,05	555,00	98,365	13,01	0,00159	3870298,30
	REF V - PC 28 - 50%	0,1254x + 0,8500	0,0066x + 11,711	0,05	493,00	91,423	12,31	0,00160	3343233,71
	REF VI - PC 28 - 50%	0,1274x + 0,7017	0,0050x + 10,917	0,05	489,00	83,458	11,33	0,00162	2786117,36
56 dias	REF I - PC 28 - 80%	0,1148x + 1,0225	0,0134x + 9,5156	0,05	508,00	83,758	10,64	0,00146	2806186,67
	REF II - PC 28 - 80%	0,0868x + 1,4647	0,0094x + 8,8886	0,05	484,00	95,916	9,79	0,00111	3679953,21
	REF III - PC 28 - 80%	0,1262x + 1,1905	0,0056x + 12,923	0,05	499,00	97,284	13,47	0,00161	3785702,67
	REF IV - PC 28 - 80%	0,1064x + 1,9754	0,0101x + 10,892	0,05	514,00	92,592	11,83	0,00135	3429304,00
	REF V - PC 28 - 80%	0,1332x + 0,8244	0,0066x + 12,211	0,05	513,00	89,942	12,80	0,00170	3235792,84
	REF VI - PC 28 - 80%	0,1118x + 0,8580	0,0162x + 8,9934	0,05	504,00	85,098	10,37	0,00142	2896690,06
91 dias	REF I - 0%	0,0076x + 5,0418	0,0527x + 0,4234	0,05	529,00	102,404	5,82	0,00010	4194594,63
	REF II - 0%	0,0227x + 2,6086	0,0467x + 0,1709	0,05	515,00	101,571	4,91	0,00029	4126653,67
	REF III - 0%	0,0103x + 5,7466	0,0602x + 0,9507	0,05	498,00	96,110	6,74	0,00013	3694869,79
	REF IV - 0%	0,0235x + 4,237	0,0588x + 0,6043	0,05	525,00	102,909	6,66	0,00030	4236133,60
	REF V - 0%	0,0076x + 4,3418	0,0483x - 0,0357	0,05	537,00	105,801	5,15	0,00010	4477539,18
	REF VI - 0%	0,0151x + 3,8669	0,0450x + 0,1371	0,05	550,00	124,742	5,75	0,00019	6224274,02
91 dias	REF I - PC 28 - 50%	0,0756x - 0,0914	0,0065x + 7,5768	0,05	498,00	108,327	8,28	0,00096	4693900,96
	REF II - PC 28 - 50%	0,0798x + 0,6488	0,0145x + 7,3103	0,05	542,00	102,014	8,79	0,00102	4162724,73
	REF III - PC 28 - 50%	0,0496x + 0,9327	0,0065x + 5,9768	0,05	529,00	117,032	6,74	0,00063	5478640,79
	REF IV - PC 28 - 50%	0,0513x + 0,0465	0,0115x + 5,1615	0,05	561,00	128,518	6,64	0,00065	6606708,16
	REF V - PC 28 - 50%	0,0823x + 0,7770	0,0098x + 8,0394	0,05	497,00	100,171	9,02	0,00105	4013694,46
	REF VI - PC 28 - 50%	0,0781x + 0,7939	0,0098x + 7,8394	0,05	493,00	103,155	8,85	0,00099	4256397,92
91 dias	REF I - PC 28 - 80%	0,0721x + 1,8170	0,0182x + 5,5006	0,05	513,00	68,341	6,74	0,00092	1868217,30
	REF II - PC 28 - 80%	0,0511x + 0,8893	0,0113x + 5,0868	0,05	488,00	105,465	6,28	0,00065	4449131,65
	REF III - PC 28 - 80%	0,0674x + 0,6460	0,0066x + 7,0659	0,05	505,00	105,590	7,76	0,00086	4459738,14
	REF IV - PC 28 - 80%	0,0542x + 0,5782	0,0099x + 5,2230	0,05	519,00	104,849	6,26	0,00069	4397304,86
	REF V - PC 28 - 80%	0,0606x + 0,6789	0,0080x + 6,3580	0,05	518,00	107,968	7,22	0,00077	4662808,02
	REF VI - PC 28 - 80%	0,0535x + 1,1508	0,0066x + 6,4659	0,05	508,00	113,328	7,21	0,00068	5137326,71

ADITIVO CRISTALIZANTE PRÉ-CARREGADOS AOS 28 DIAS									
	Identificação	reta 1	reta 2	e (m)	Ms(g)	x(h/2)	y(g)	S(g/cm².h/2)	M(h/m²)
35 dias	AC I - 0%	0,2245x - 0,6938	0,0220x + 14,547	0,05	497,00	68,411	16,05	0,00286	1872018,54
	AC II - 0%	0,1895x + 1,8082	0,0138x + 15,649	0,05	530,00	78,775	16,74	0,00241	2482211,91
	AC III - 0%	0,1885x + 1,3143	0,0350x + 11,395	0,05	495,00	65,672	13,69	0,00240	1725141,06
	AC IV - 0%	0,2079x + 0,6342	0,0461x + 12,384	0,05	539,00	72,619	15,73	0,00265	2109424,11
	AC V - 0%	0,1569x + 0,4797	0,0218x + 10,315	0,05	520,00	72,800	11,90	0,00200	2119944,62
	AC VI - 0%	-	-	-	-	-	-	-	-
35 dias	AC I - PC 28 - 50%	0,2535x + 2,4857	0,0069x + 19,672	0,05	497,00	69,693	20,15	0,00323	1942847,10
	AC II - PC 28 - 50%	0,2108x + 3,0032	0,0123x + 15,533	0,05	511,00	63,122	16,31	0,00268	1593775,87
	AC III - PC 28 - 50%	0,2158x + 3,5365	0,0044x + 17,184	0,05	501,00	64,558	17,47	0,00275	1667079,19
	AC IV - PC 28 - 50%	0,2248x + 2,6950	0,0096x + 16,752	0,05	508,00	65,321	17,38	0,00286	1706713,98
	AC V - PC 28 - 50%	0,2334x + 2,2907	0,0041x + 17,891	0,05	521,00	68,034	18,17	0,00297	1851474,70
	AC VI - PC 28 - 50%	0,2284x + 3,5042	0,0115x + 17,248	0,05	507,00	63,365	17,98	0,00291	1606033,28
35 dias	AC I - PC 28 - 80%	0,2299x + 3,6411	0,0167x + 17,117	0,05	510,00	63,208	18,17	0,00293	1598089,69
	AC II - PC 28 - 80%	0,2321x + 2,8878	0,0293x + 16,343	0,05	519,00	66,347	18,29	0,00296	1760777,20
	AC III - PC 28 - 80%	0,2200x + 3,2210	0,0112x + 16,556	0,05	504,00	63,865	17,27	0,00280	1631492,35
	AC IV - PC 28 - 80%	0,2117x + 3,1822	0,0211x + 15,401	0,05	514,00	64,107	16,75	0,00270	1643884,54
	AC V - PC 28 - 80%	0,2045x + 3,1569	0,0071x + 15,765	0,05	465,00	63,871	16,22	0,00260	1631792,69
	AC VI - PC 28 - 80%	0,2092x + 1,5347	0,0071x + 15,665	0,05	542,00	69,917	16,16	0,00266	1955375,32
56 dias	AC I - 0%	0,1097x - 0,2415	0,0148x + 8,1441	0,0500	504,00	82,273	9,38	0,00140	2773751,61
	AC II - 0%	0,1410x + 0,8215	0,0192x + 11,548	0,0515	536,00	88,067	13,24	0,00180	2924199,78
	AC III - 0%	0,1327x + 0,5092	0,0237x + 8,0522	0,0485	499,00	69,202	9,69	0,00169	2035877,97
	AC IV - 0%	0,1541x + 0,2382	0,0132x + 12,282	0,0515	545,00	85,478	13,41	0,00196	2754803,50
	AC V - 0%	0,1228x + 1,1208	0,0148x + 9,3441	0,0485	523,00	76,142	10,47	0,00156	2464684,20
	AC VI - 0%	0,1311x + 2,0449	0,0103x + 9,5401	0,0485	517,00	62,046	10,18	0,00167	1636624,72
56 dias	AC I - PC 28 - 50%	0,0666x + 1,5773	0,0114x + 5,8533	0,05	515,00	77,464	6,74	0,00085	2400254,15
	AC II - PC 28 - 50%	0,0849x + 1,7847	0,0070x + 6,9178	0,05	524,00	65,893	7,38	0,00108	1736778,87
	AC III - PC 28 - 50%	0,0596x + 0,9831	0,0067x + 5,0467	0,05	515,00	76,817	5,56	0,00076	2360318,17
	AC IV - PC 28 - 50%	0,0656x + 0,6422	0,0073x + 5,0460	0,05	523,00	75,537	5,60	0,00084	2282327,99
	AC V - PC 28 - 50%	0,0560x + 0,4940	0,0066x + 4,0687	0,05	537,00	72,362	4,55	0,00071	2094523,77
	AC VI - PC 28 - 50%	0,0715x + 1,2525	0,0128x + 5,6783	0,05	522,00	75,397	6,64	0,00091	2273879,04
56 dias	AC I - PC 28 - 80%	0,0888x + 1,1247	0,0066x + 6,6696	0,05	525,00	67,456	7,11	0,00113	1820135,80
	AC II - PC 28 - 80%	0,0800x + 1,3065	0,0046x + 6,4619	0,05	535,00	68,374	6,78	0,00102	1870001,84
	AC III - PC 28 - 80%	0,0865x + 1,4408	0,0051x + 6,8277	0,05	518,00	66,178	7,17	0,00110	1751818,10
	AC IV - PC 28 - 80%	0,0636x + 1,1984	0,0056x + 5,7782	0,05	528,00	78,962	6,22	0,00081	2494003,33
	AC V - PC 28 - 80%	0,0687x + 1,4082	0,0095x + 5,4365	0,05	478,00	68,046	6,08	0,00087	1852081,91
	AC VI - PC 28 - 80%	0,0863x + 1,4148	0,0056x + 6,6782	0,05	555,00	65,222	7,04	0,00110	1701553,76
91 dias	AC I - 0%	0,0205x + 3,4927	0,0482x + 0,5858	0,0515	510,00	104,942	5,64	0,00026	4152275,76
	AC II - 0%	0,0116x + 4,6793	0,0562x + 0,3611	0,0500	544,00	96,821	5,80	0,00015	3749693,59
	AC III - 0%	0,0161x + 3,6860	0,0470x + 0,7342	0,0500	506,00	95,528	5,22	0,00020	3650201,92
	AC IV - 0%	0,0296x + 3,7593	0,0657x + 0,7968	0,0500	553,00	82,064	6,19	0,00038	2693781,13
	AC V - 0%	0,0243x + 3,0879	0,0541x + 0,6244	0,0485	531,00	82,668	5,10	0,00031	2905287,58
	AC VI - 0%	-	-	-	-	-	-	-	-
91 dias	AC I - PC 28 - 50%	0,0683x + 1,1224	0,0114x + 6,2832	0,0515	515,00	90,699	7,32	0,00087	3101666,27
	AC II - PC 28 - 50%	0,0748x + 1,0502	0,0114x + 6,5483	0,0500	524,00	86,721	7,54	0,00095	3008200,26
	AC III - PC 28 - 50%	0,0650x + 0,2045	0,0075x + 4,3105	0,0485	515,00	71,409	4,85	0,00083	2167797,56
	AC IV - PC 28 - 50%	0,0762x + 0,1454	0,0114x + 5,2832	0,0500	522,00	79,287	6,19	0,00097	2514573,70
	AC V - PC 28 - 50%	0,0577x + 1,0428	0,0099x + 5,4307	0,0500	535,00	91,797	6,34	0,00073	3370680,91
	AC VI - PC 28 - 50%	0,0611x + 0,3650	0,0099x + 5,3307	0,0515	522,00	96,986	6,29	0,00078	3546554,00
91 dias	AC I - PC 28 - 80%	0,0868x + 1,0338	0,0147x + 6,8843	0,05	524,00	81,144	8,08	0,00111	2633755,34
	AC II - PC 28 - 80%	0,0739x + 1,2212	0,0081x + 6,7478	0,05	534,00	83,991	7,43	0,00094	2821787,27
	AC III - PC 28 - 80%	0,0786x + 1,0588	0,0081x + 6,8828	0,05	518,00	82,610	7,55	0,00100	2729760,15
	AC IV - PC 28 - 80%	0,0629x + 0,7678	0,0114x + 5,0486	0,05	528,00	83,122	6,00	0,00080	2763728,70
	AC V - PC 28 - 80%	0,0528x + 0,4620	0,0066x + 5,0712	0,05	478,00	99,766	5,73	0,00067	3981320,56
	AC VI - PC 28 - 80%	0,0866x + 1,2345	0,0049x + 8,2944	0,05	554,00	86,412	8,72	0,00110	2986847,00