

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**FRANCIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA SINERGIA ENTRE ADITIVO CRISTALIZANTE E  
ADIÇÕES TERNÁRIAS NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS**

**São Leopoldo**

**2023**

FRANCIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA SINERGIA ENTRE ADITIVO CRISTALIZANTE E  
ADIÇÕES TERNÁRIAS NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2023

O48i Oliveira, Franciele Rodrigues de

**Avaliação da sinergia entre aditivo cristalizante e adições ternárias na autocicatrização de concretos / por Franciele Rodrigues de Oliveira. – 2023.**

112 f. : il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski.

1. Autocicatrização. 2. Cicatrização. 3. Cristalização.  
4. Pozolana. 5. Fissuras em concreto. 6. Durabilidade.  
I. Título.

CDU 624

Catálogo na Fonte:

Bibliotecário Maicon Juliano Schmidt - CRB 10/2791

**AVALIAÇÃO DA SINERGIA ENTRE ADITIVO CRISTALIZANTE E  
ADIÇÕES TERNÁRIAS NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS**

FRANCIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA SINERGIA ENTRE ADITIVO CRISTALIZANTE E  
ADIÇÕES TERNÁRIAS NA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Aprovado em 20/06/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski – UNISINOS

---

Prof. Dr. Maurício Mancio – UNISINOS

---

Prof. Dra. Geilma Lima Vieira - UFES

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, por sempre iluminar o meu caminho e me guiar. por todas as oportunidades que tive ao longo dessa jornada, bem como a saúde e persistência para vencer as dificuldades encontradas ao longo desse período.

A minha família, em especial minha mãe Genair Terezinha, pelas orações e apoio emocional, por sempre incentivar minha busca por conhecimento, pelo seu amor incondicional.

Um agradecimento especial a professora Marlova Piva Kulakowski, por seu conhecimento transmitido, a partir da sua dedicação, compartilhar sua experiência incansável para entrega desse trabalho.

As duas amigas que Deus colocou no meu caminho e graças ajuda e apoio que contribuíram diretamente neste trabalho: a Ieda Fagundes Zanolla e Valeria Oliveira, pelo companheirismo, pela troca de ensinamentos e pelas diversas horas no WhatsApp, por ter amigas que me encorajaram durante todos os momentos desse mestrado, dividimos muitos momentos de tristeza, incertezas, mas também momentos de boas risadas e muitos lanches.

Ao meu marido, Atila Antônio, por todo companheirismo, paciência e amor.

À Concesul e Engenheiro Marcelo Krummenauer, pelos materiais disponibilizados essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os professores que participaram da minha formação acadêmica, sou extremamente grata por todo o ensinamento compartilhado.

## RESUMO

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado devido à alta resistência à compressão e durabilidade. Para minimizar os impactos ambientais, e aperfeiçoar os cimentos já existentes, mais estudos com materiais cimentícios suplementares estão sendo desenvolvidos, e a durabilidade de estruturas de concretos é um assunto que carece de entendimento da contribuição desses materiais. As fissuras são manifestações patológicas que desencadeiam e aceleram outras categorias de danos. Para cessar ou mitigar os efeitos das fissuras, pode-se empregar materiais que, de forma espontânea ou estimulada, possam contribuir para que ocorra a autocicatrização. O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência de aditivo cristalizante no comportamento de concretos, produzidos com diferentes materiais cimentícios suplementares (MCS), quanto à capacidade de autocicatrização de fissuras. Fíler calcário, metacaulim e cinza volante foram empregados como MCS, compondo adições ternárias. Os experimentos adotaram três relações água/cimento (0,40, 0,50 e 0,60) com adição do aditivo cristalizante no teor de 0% e 1%. A abertura de fissuras ocorreu aos 3 dias, e para avaliar a autocicatrização, analisou-se: a recuperação da resistência, estabelecendo-se um índice mecânico de autocicatrização; a velocidade de pulso ultrassônico; a absorção de água; imagens por microscopia ótica das fissuras; e imagens por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostram que o emprego do metacaulim é mais eficiente que os traços referências na durabilidade, e o aditivo cristalizante contribuiu com o aumento da resistência e reduziu a absorção de água na maioria dos traços. O emprego da velocidade de propagação de onda ultrassônica pôde ser tomado apenas como avaliação qualitativa da cicatrização. A análise de imagem por microscopia ótica e eletrônica de varredura contribuíram para justificar os comportamentos observados nos demais ensaios, no entanto não foi possível obter dados que levassem a uma avaliação objetiva. Através da avaliação realizada, foi possível observar a contribuição dos MCS, com destaque para uso associado de metacaulim e fíler calcário, e a contribuição efetiva do aditivo cristalizante.

**Palavras-chave:** autocicatrização; cicatrização; cristalização; adições minerais; pozolana; MCS; fissuras em concreto; durabilidade.

## ABSTRACT

Portland cement concrete is the most widely used construction material due to its high compressive strength and durability. To minimize environmental impacts and enhance existing cements, more studies on supplementary cementitious materials are being developed. The durability of concrete structures is an area that lacks understanding regarding the contribution of these materials. Cracks are pathological manifestations that trigger and accelerate other categories of damage. To cease or mitigate the effects of cracks, materials can be employed that, either spontaneously or stimulated, contribute to self-healing. The general objective of this research is to analyze the influence of crystalline admixture on the behavior of concretes produced with different supplementary cementitious materials (SCMs) concerning the self-healing capacity of cracks. Limestone filler, metakaolin, and fly ash were used as SCMs, composing ternary additions. The experiments adopted three water-to-cement ratios (0.40, 0.50, and 0.60) with the addition of the crystalline admixture at 0% and 1%. Crack formation occurred at 3 days, and to evaluate self-healing, the following aspects were analyzed: the recovery of strength, establishing a mechanical self-healing index; the ultrasonic pulse velocity; water absorption; optical microscopy images of cracks; and scanning electron microscopy images. The results show that the use of metakaolin is more efficient than reference mixes in terms of durability, and the crystalline admixture contributed to increased strength and reduced water absorption in most mixes. The use of ultrasonic wave propagation velocity could only be taken as a qualitative evaluation of healing. The analysis of images through optical and scanning electron microscopy contributed to justifying the behaviors observed in the other tests, although it was not possible to obtain data that led to an objective assessment. Through the evaluation conducted, it was possible to observe the contribution of SCMs, with emphasis on the combined use of metakaolin and limestone filler, and the effective contribution of the crystalline admixture.

**Keywords:** self-healing; healing; crystallization; mineral additions; pozzolana; MCS; cracks in concrete; durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Venn .....	26
Figura 2 – Mecanismos para autocicatrização autógena .....	29
Figura 3 - Formação de cristais no interior do concreto. (a) Concreto não tratado. (b) Início da formação de cristais; (c) Cristalização final.....	38
Figura 4 – Exemplo de cicatrização na presença de aditivo cristalizante.....	39
Figura 5 - Organograma do programa experimental .....	40
Figura 6 – Distribuição granulométrica do cimento e dos MCS.....	43
Figura 7 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	45
Figura 8 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	46
Figura 9 – Serra circular de bancada com disco diamantado .....	48
Figura 10 – Indução de fissuras: (a) vista geral e (b) detalhe .....	49
Figura 11 – Medidas com escala: fissura (a) com 0,2 mm e (b) com 0,4 mm .....	49
Figura 12 – Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	51
Figura 13 – Medida da velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	51
Figura 14 – Esquema de posição do corpo de prova para leitura de VPOU .....	52
Figura 15 – Marcação das fissuras no CP .....	53
Figura 16 – Lupa com câmera.....	53
Figura 17 – Exemplos de posição de pontos de medida da abertura das fissuras....	54
Figura 18 – Metalização das amostras.....	55
Figura 19 – Amostras metalizadas.....	55
Figura 20 – Diagrama resultante da dosagem experimental.....	56
Figura 21 – Ensaio de abatimento (a) e aspecto visual (b) do concreto fresco.....	59
Figura 22 – Efeito isolado da variável de controle “relação água/cimento” na resistência à compressão.....	62
Figura 23 - Efeito isolado da variável de controle “cimento” na resistência à compressão.....	63
Figura 24 - Efeito isolado da variável de controle “aditivo cristalizante” na resistência à compressão.....	63
Figura 25 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “aditivo cristalizante” e “relação a/c” na resistência à compressão .....	64
Figura 26 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “aditivo cristalizante” e “tipo de cimento” na resistência à compressão .....	65



Figura 27 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “relação a/c” e “tipo de cimento” na resistência à compressão .....	65
Figura 28 – Efeito da interação entre as três variáveis de controle na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias .....	66
Figura 29 – Absorção de água por capilaridade.....	67
Figura 30 – Resistência à compressão de concretos com e sem fissuras, ao longo do tempo. ....	69
Figura 31 – Índice mecânico de cicatrização.....	70
Figura 32 – Médias em função da variável de controle “cimento” para Índice Mecânico de Cicatrização – IMC -.....	71
Figura 33 - Comparativo da VPOU entre traços CPV .....	73
Figura 34 - Comparativo ultrassom entre traços CPVCR.....	74
Figura 35 - Comparativo ultrassom entre traços LC <sup>3</sup> .....	75
Figura 36 - Comparativo ultrassom entre traços LC <sup>3</sup> CR .....	75
Figura 37 - Comparativo ultrassom entre traços FCV .....	76
Figura 38 - Comparativo ultrassom entre traços FCVCR.....	77
Figura 39 - Fissuras aberturas aos 3 dias e aos 84 dias <b>versus</b> redução de fechamento de fissura.....	78
Figura 40 – Microscopia ótica nos traços e CPV e CPVCR a/c = 0,40 .....	79
Figura 41 – Microscopia ótica nos traços CPV e CPVCR a/c = 0,50 .....	79
Figura 42 – Microscopia ótica nos traços CPV E CPVCR a/c = 0,60 .....	80
Figura 43 – Microscopia ótica dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,40.....	80
Figura 44 – Microscopia ótica dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,50.....	80
Figura 45 – Microscopia ótica dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,60.....	81
Figura 46 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,40.....	81
Figura 47 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,50.....	82
Figura 48 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,60.....	82
Figura 49 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,40.....	83
Figura 50 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,50.....	84

Figura 51 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,60.....	85
Figura 52 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,40.....	86
Figura 53 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,50.....	87
Figura 54 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC <sup>3</sup> e LC <sup>3</sup> CR a/c = 0,60.....	88
Figura 55 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,40 .....	89
Figura 56 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,50 .....	90
Figura 57 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,60.....	91
Figura 58 - Microestrutura do CPV-040 aos 84 dias: magnificação de (a) 1000x e (b) 5000x .....	92
Figura 59 – Microestrutura do CPVCR-040 aos 84 dias: magnificação de (a) 1000x, (b) 2000x e (c) 5000x .....	93
Figura 60 – Microestrutura do LC <sup>3</sup> -040 aos 84 dias: magnificação de 5000x .....	94
Figura 61 – Microestrutura do LC <sup>3</sup> CR-040 aos 84 dias: magnificação 5000x .....	94
Figura 62 – Microestrutura do FCV-040 aos 84 dias: magnificação 5000x .....	95
Figura 63 – Microestrutura do FCVCR-040 aos 84 dias: magnificação 5000x.....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração .....	24
Quadro 2 - Fenômenos relacionados à autocicatrização .....	27
Quadro 3 – Classe de adições minerais pela ASTM C618 e NBR 12653 .....	32
Quadro 4 – informações da caracterização física do cimento e dos MCS .....	42
Quadro 5 – Quantificação dos corpos de prova .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do cimento e dos MCS .....	43
Tabela 2 - Caracterização física do cimento e dos MCS.....	43
Tabela 3 – Índice de atividade pozolânica .....	44
Tabela 4 – Caracterização granulométrica e física do agregado miúdo.....	44
Tabela 5 – Caracterização granulométrica e física do agregado graúdo .....	45
Tabela 6 – Especificações técnicas do aditivo superplastificante .....	46
Tabela 7 – Características do aditivo cristalizante .....	47
Tabela 8 - Composição química do aditivo cristalizante.....	47
Tabela 9 – Dosagem - traços unitários, consumos de materiais e consistência .....	55
Tabela 10 – Dados empregados para elaboração do diagrama de dosagem .....	55
Tabela 11 - Sigla dos traços desenvolvidos .....	57
Tabela 12 – Quantitativo empregado na produção das amostras .....	58
Tabela 13 – Resistência à compressão aos 28 dias .....	61
Tabela 14 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão. ....	62
Tabela 15 - ANOVA recuperação das propriedades mecânicas .....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2\text{O}$	Alumina
(AFm)	Monosulfoaluminato de cálcio hidratado
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Ácido sulfúrico
$\text{SiO}_2$	Sílica
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de cálcio

## LISTA DE SIGLAS

%	Porcento
°C	Graus Celsius
µm	Micrômetro
a/c	Fator água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CR	Aditivo Cristalizante
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ITTP	Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
pH	Potencial hidrogênio
CP	Cimento Portland
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
MCS	Materiais cimentícios suplementares
fck	Resistência característica do concreto
LC3	<i>Limestone Calcined Clay Cement</i>
VPOU	Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica
MK	Metacaulim
RS	Rio Grande do Sul
CV	Cinza volante
FL	Fíler calcário
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial—com teor de fíler calcário

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	DELIMITAÇÕES .....	20
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1	DURABILIDADE E FISSURAS .....	22
2.1.1	<b>Durabilidade do concreto</b> .....	<b>22</b>
2.1.2	<b>Origem das fissuras</b> .....	<b>23</b>
2.1.3	<b>Dimensão das fissuras</b> .....	<b>24</b>
2.2	AUTOCICATRIZAÇÃO .....	25
2.2.1	<b>Mecanismos de autocicatrização</b> .....	<b>26</b>
2.2.2	<b>Efeitos dos materiais cimentícios suplementares na autocicatrização</b> .....	<b>30</b>
2.2.3	<b>Materiais Cimentícios Suplementares</b> .....	<b>32</b>
2.2.4	<b>Cimentos Ternários Tipo LC<sup>3</sup></b> .....	<b>37</b>
2.2.5	<b>Aditivo Cristalizante</b> .....	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>40</b>
3.1	VARIÁVEIS DE ESTUDO .....	41
3.1.1	<b>Variáveis de controle</b> .....	<b>41</b>
3.1.2	<b>Variáveis Dependentes ou de Resposta</b> .....	<b>41</b>
3.2	MATERIAIS.....	42
3.2.1	<b>Cimento e Materiais Cimentícios Suplementares</b> .....	<b>42</b>
3.2.2	<b>Agregados</b> .....	<b>44</b>
3.2.3	<b>Aditivos</b> .....	<b>46</b>
3.2.4	<b>Água</b> .....	<b>48</b>
3.3	MÉTODOS.....	48
3.3.1	<b>Indução de Abertura das Fissuras</b> .....	<b>48</b>
3.3.2	<b>Métodos de ensaio</b> .....	<b>50</b>
3.3.3	<b>Produção dos concretos</b> .....	<b>55</b>

<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	61
4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	67
4.3	AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO .....	68
<b>4.3.1</b>	<b>Índice mecânico de autocicatrização .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica .....</b>	<b>72</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Avaliação por análise de imagem obtida em estereomicroscópio .....</b>	<b>77</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura .....</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>96</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	96
5.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	97
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As características intrínsecas do concreto como, por exemplo, as reações de hidratação que evoluem ao longo do tempo modificando porosidade e resistência; a maior ou menor porosidade a depender de diversos fatores; o seu caráter químico, entre outros, o tornam um material propenso ao desenvolvimento de manifestações patológicas. A negligência com a prevenção dessas manifestações, e mesmo a ausência de tratamento destes problemas, leva à deterioração das estruturas de concreto armado, bem como de elementos isentos de armadura. Dentre a diversidade de manifestações patológicas que podem ser diagnosticadas em uma estrutura de concreto, nesse trabalho são destacadas as fissuras. Segundo Neville (2016), as fissuras em concreto alteram as suas características físicas que, por sua vez, alteram a durabilidade das estruturas de concreto, pois alteram a estanqueidade ao ingresso de água e agentes agressivos. Observa-se, ainda que, além de ser uma causa do surgimento de outras patologias mais graves, as fissuras ainda são sintomas de outras manifestações patológicas.

As fissuras surgem no concreto sempre que as tensões atuantes ultrapassam a sua resistência, independentemente da origem dos esforços. Em algumas situações específicas de geração de fissuras como, por exemplo, as geradas por retração do concreto, a autocicatrização, observada em matrizes a base de cimento Portland, pode ser um recurso para colmatar fissuras. Trata-se de um processo de regeneração de um material de forma espontânea, com ausência de um agente externo. A ocorrência desse processo pode se dar de forma induzida, classificada como autônoma, ou de forma natural, classificada como autógena (RILEM 221-SHC, 2013).

No processo autônomo, a matriz cimentícia recebe componentes específicos, como, por exemplo, um aditivo cristalizante ou bactérias encapsuladas, que podem desencadear e potencializar o selamento de fissuras. Na autocicatrização autógena, o processo se dá pelo próprio avanço das reações de hidratação do cimento (VAN MULLEM et al., 2020).

As matrizes cimentícias estão sujeitas à degradação devido à ação de agentes agressivos externos, que penetram pela porosidade capilar e fissuras da matriz, e assim, segundo Zhang et al. (2018), os aditivos cristalizantes são capazes de trazer resultados positivos quanto à durabilidade. Esses aditivos possuem em sua composição silicatos, a exemplo do silicato de sódio, que irão reagir com o hidróxido

de cálcio (CH) oriundo da hidratação do cimento, resultando em silicato de cálcio hidratado. Esse composto se precipita nos poros do concreto, e, por consequência reduz as vias de acesso de agentes agressivos ao interior da matriz.

A produção de cimento e concreto, em termos mundiais, é responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sup>2</sup> (GCCA, 2022). Assim, tendo em vista o impacto ambiental devido às emissões de CO<sup>2</sup>, tem-se tornado imperativo o emprego de materiais cimentícios suplementares (MCS). Os materiais cimentícios suplementar podem ser substituir parcialmente o clínquer de cimento Portland na produção de cimento (ABNT, 2018), sem perda de resistência, e podem ser adicionados na dosagem de concreto (ABNT, 2010; ABNT, 2012). Os MCS quimicamente ativos, no Brasil, seguem a normalização estabelecida pela NBR 12653 (ABNT, 2014) que os define como materiais sílico-aluminosos ou silicosos, cujas propriedades ligantes são, à temperatura ambiente, ativadas na presença de uma solução aquosa de hidróxido de cálcio (CH), resultando em compostos, além de ligantes, resistentes e insolúveis em água, muitas vezes resultando na densificação da matriz.

Nesse sentido, em relação à autocicatrização autógena, por um lado, a densificação da matriz cimentícia, observada quando do emprego de MCS e da sua reação com o CH em reações pozolânicas, também pode auxiliar na vedação de fissuras, tanto compondo os cimentos como os concretos. Por outro lado, o consumo mais rápido de CH e a indução do aumento da taxa de hidratação, como ocorre quando do emprego de sílica ativa e argilas calcinadas, pode prejudicar a colmatação de fissuras formadas posteriormente ao período dessas reações.

Por sua vez, aditivos cristalizantes, a base de silicatos, também reagem com o CH disponibilizado nas reações de hidratação do cimento Portland. Sendo assim, o emprego de MCS quimicamente ativos e aditivo cristalizante parecem exercer a mesma função.

Diante dos aspectos apresentados até o momento, são formulados os problemas de pesquisa do presente trabalho: Como é o comportamento da autocicatrização em concretos com MCS quimicamente ativos? Como é o comportamento da autocicatrização quando se emprega aditivos cristalizantes em concretos produzidos com MCS quimicamente ativos?

Os problemas de pesquisa apresentados estimularam a formulação das hipóteses de pesquisa desse trabalho: os MCS quimicamente ativos auxiliam no

processo de autocicatrização autógena; o aditivo cristalizante compete com os MCS para a geração de produtos que colaborem para a autocicatrização.

A partir das hipóteses de pesquisa foram estabelecidos os objetivos dessa pesquisa, apresentados na sequência.

## **1.1 OBJETIVOS**

Os objetivos do trabalho dividem-se em objetivo geral e objetivos específicos, e são apresentados nos itens que seguem.

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência de aditivo cristalizante no comportamento de concretos, produzidos com adições ternárias de materiais cimentícios suplementares, quanto à capacidade de autocicatrização de fissuras.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) Analisar a influência de traços com diferentes relações água/cimento e consumo de cimento na capacidade de autocicatrização dos concretos;
- b) Analisar o efeito da interação entre o aditivo cristalizante e diferentes materiais cimentícios suplementares com a relação água/cimento na capacidade de autocicatrização dos concretos;
- c) Avaliar as resistências mecânicas e a absorção de água dos concretos confeccionados com aditivo cristalizante e diferentes MCS;
- d) Avaliar a relação entre as propriedades mecânicas e a taxa de recuperação autocicatrização;
- e) Analisar a viabilidade do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, para detectar a autocicatrização do concreto;
- f) Analisar a estrutura formada nos concretos pela microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Conforme Wei e Gencturk, (2019), o concreto é o material muito utilizado, devido à alta durabilidade e custo comparativamente baixos Van Tittelboom e De Belie

(2013), sendo empregado em diversos componentes dos sistemas construtivos de uma edificação e de obras de infra-estrutura. Embora o cimento Portland seja utilizado há mais de um século e seja tema constante de diversos estudos, conforme destacam Ravitheja, Reddy e Sashidhar (2019), o concreto tem como uma das suas principais características a suscetibilidade a manifestações patológicas de diferentes origens, que comprometem a durabilidade das estruturas, e apontam a autocicatrização como um meio de combater os efeitos danosos da presença de fissuras.

Como já mencionado, o processo de autocicatrização pode ser induzido pelo emprego de aditivos cristalizantes (AZARSA; GUPTA; BIPARVA, 2019), bem como pode ser influenciado pelos diferentes tipos de cimento (YUAN *et al.*, 2019) e pela presença de MCS (JIANG; LI; YUAN, 2015).

O uso de aditivos cristalizantes estimula a capacidade de autocicatrização dos concretos de cimento Portland, e a sua inserção na matriz cimentícia pode ocorrer ainda no estado fresco (JIANG; LI; YUAN, 2015). O Report on Chemical Admixtures for Concrete ACI 212.3R-10 (ACI, 2010), informa que os aditivos cristalizantes, quando em contato com a água, irão reagir e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) cristalino modificado, precipitando bloqueadores de poros. Esses compostos e a fração que não tenha reagido, considerando-se uma mistura homogênea, estarão presentes ao longo de toda a matriz cimentícia, passando a constituir a microestrutura do concreto. Na presença de água, ao longo do tempo, os aditivos cristalizantes continuam reagindo, e, na eventualidade de serem geradas fissuras, podem contribuir para a autocicatrização das mesmas.

O uso de aditivos cristalizantes como estimulantes da autocicatrização tem como vantagem o fato de não modificarem a rotina de produção de concreto. Como destacam Guzlena e Sakale (2019), esses aditivos são empregados como os demais aditivos corriqueiramente incorporados aos concretos, ao contrário do que acontece com outros agentes indutores de autocicatrização, como as bactérias, que necessitam ser encapsuladas antes da adição à mistura.

De Belie (2018) destaca que, devido à diversidade de aditivos cristalizantes existentes no mercado, ainda são necessárias pesquisas para se chegar a um consenso sobre o comportamento desses materiais. O desenvolvimento de materiais cimentícios com capacidade de autocicatrização possibilita o aprofundamento do conhecimento sobre um assunto que inova a cada ano.

Quanto aos cimentos, sabe-se que a produção do clínquer envolve alto consumo energético e leva à emissão considerável de gás carbônico na atmosfera. A origem dessas emissões tem duas fontes principais: a queima de combustíveis fósseis para geração da energia que alimenta os fornos de clínquerização; e a descarbonatação do calcário, cujo CaO resultante irá compor aproximadamente 60% do clínquer.

Esses aspectos têm levado a diversos autores, entre eles Martins et al (2020), a estudar a substituição parcial do clínquer por MCS na produção de cimento, quer seja no desenvolvimento de novos materiais e quer seja na adequação e viabilidade de co-produtos. Além disso, algumas novas tendências de aumento do teor de MCS já vem sendo incorporadas em normas técnicas, revisadas para atender às demandas ambientais e econômicas. Como exemplo, cita-se NBR 16.697 (ABNT, 2018) implementada há menos de 5 anos que organizou em um único documento as especificações dos cimentos brasileiros e alterou, entre outros aspectos, os limites dos teores de filer calcário na composição dos cimentos. Assim, é importante estudar a influência dos MCS na autocicatrização. Entre os MCS destaca-se o filer calcário, que compõe grande parte dos cimentos, como pode ser observado na norma europeia EN 197-1 (CEN, 2011) e a estadunidense ASTM C150/C150M-22 (ASTM, 2022).

No Brasil, há mais de 50 anos se faz uso de MCS adicionados ao cimento, com destaque para escórias de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e filer calcário (ROADMAP, 2019). Dentre os MCS destaca-se, nesse trabalho: a cinza volante oriunda da queima do carvão para geração de energia em termoelétricas (CV), por ter largo uso na produção de cimento no sul do Brasil; o filer calcário, permitido na composição de todos os tipos de cimento no Brasil, com um máximo de 25% em cimento tipo CP-II-F (ABNT, 2018); e as argilas calcinadas, principalmente metacaulim, por ser uma adição que vem sendo abordada em um número significativo de publicações e ser preconizada como um material disponível em larga escala na crosta terrestre, além de outros inúmeros benefícios quando associada ao filer calcário em cimentos ternários (SCRIVENER, 2014).

Até o presente momento, a avaliação da eficácia da autocicatrização não é efetivamente conduzida mediante a aplicação de uma metodologia ou procedimentos padronizados por recomendações técnicas ou normas. Ferrara (2018) destaca que a avaliação da autocicatrização abrange geralmente a espessura de fissuras, cuja

efetividade pode variar de acordo com fatores de controle tais como condições de cura, materiais utilizados e técnicas de medidas.

Os métodos usualmente empregados para avaliar a eficácia da autocicatrização possuem várias limitações, o que torna praticamente impossível, por exemplo, uma avaliação das propriedades recuperadas *in loco*. Nesse sentido, Lefever et al (2022), propuseram e avaliaram uma metodologia de ensaio não destrutivo baseada na propagação de ondas ultrassônicas que pode eventualmente ser implementada na prática. Como resposta, os autores informam que, sendo o ultrassom sensível à variação das propriedades elásticas dos materiais, é possível empregar a técnica para avaliar a eficácia da autocicatrização, diferenciando a cicatrização efetiva, no sentido de promover a recuperação das propriedades mecânicas, e o simples preenchimento da fissura. O método foi validado pelos autores, que complementaram as análises com simulações numéricas de ondas que permitiram relacionar a velocidade da onda medida macroscopicamente com a rigidez dos produtos de cura depositados na fissura.

### **1.3 DELIMITAÇÕES**

Tendo em vista os objetivos do trabalho, é importante apresentar as delimitações relativas ao estudo da autocicatrização. Sendo assim, o escopo desse trabalho não aborda: estudos com mecanismos microbiológicos; utilização de polímeros; fibras; encapsulamento de agentes autocicatrizantes, entre outros.

Assim, as condições que restringem a abordagem do presente trabalho são:

- a) Cimento - CP V-ARI; cimento ternário composto com metacaulim e fíler calcário; cimento composto com cinza volante e fíler calcário;
- b) Traço do concreto – definido por diferentes relações água/cimento - 0,40, 0,50 e 0,60;
- c) Uma única idade de abertura de fissuras - 3 dias;
- d) Condições de cura – somente cura úmida.

### **1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Esta pesquisa está estruturada em cinco partes detalhadas a seguir.

No primeiro capítulo, situam-se a introdução, objetivo geral e objetivos específicos, e apresentam-se os tópicos que direcionam essa pesquisa.

O segundo capítulo, apresenta uma revisão da literatura existente, dando suporte para o trabalho e os temas oriundos da pesquisa bibliográfica referente ao que será estudado no trabalho: durabilidade e fissuras com foco no fenômeno de autocatrização.

O terceiro capítulo, explica o programa experimental, caracterização dos materiais que foram utilizados no estudo quanto à sua composição química e mineralógica, propriedades físicas, materiais, métodos e ensaios.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos em cada ensaio realizado, juntamente com as análises, as discussões e as justificativas encontradas, baseadas na literatura atual existente auxiliando no entendimento dos dados obtidos.

No quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais e as conclusões alcançadas referentes aos resultados obtidos. São também apresentadas as sugestões para trabalhos futuros. Após a apresentação dos capítulos são listadas as referências bibliográficas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

No presente capítulo, são tratados os aspectos relacionados à revisão da literatura, abordando aspectos referentes a fissuras, durabilidade do concreto, com ênfase ao processo de autocatrização com efeito das MCS.

### **2.1 DURABILIDADE E FISSURAS**

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na preparação do concreto. A grande resistência do concreto à água, bem como a sua durabilidade quando exposto ao meio ambiente, o fazem um dos materiais de construção civil mais consumidos no mundo. Desde que adequadamente dosado e executado, quando exposto às intempéries é capaz de manter-se íntegro, sem se deformar.

Na construção civil, constata-se o aumento do número de obras precocemente deteriorado, crescendo o interesse em explorar soluções para prolongar a durabilidade das edificações.

#### **2.1.1 Durabilidade do concreto**

Segundo Mehta e Monteiro (2014), em estruturas de concreto, a durabilidade é uma propriedade indispensável, sendo primordial que tenham a capacidade de resistir as condições calculado pelo projetista durante a sua vida útil (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Para Mehta e Monteiro (2014), durabilidade é definida como a capacidade do material de suportar a ação de intempéries, abrasão, ataque químico e outras condições de serviço. Ademais, correlacionam com a vida útil, preservação de forma, capacidade de uso e qualidade do concreto ao ser exposto no ambiente que fora projetado. Afirmam, ainda, que o material alcança o fim de sua vida útil logo que suas propriedades tiverem deterioradas de tal forma que se tornem antieconômicas e inseguras.

Já ACI 201.2R (ACI, 2008) considera que a vida útil do concreto é mensurada pela desempenho do material resistir à ações imprevistas de manutenção, bem como ao ataque químico, à abrasão ou outro processo de deterioração, sendo que essa propriedade não pode ter essa definição de durabilidade limitada apenas à relação água-cimento, pelo consumo de cimento ou também podendo decorrer da especificação do projeto estrutural a resistência à compressão mínima definida.



Segundo Panesar e Zhang (2020), devido ao endurecimento à base de cimento, a composição física e química do material afeta a durabilidade. A estrutura de poros, em seus aspectos físicos, inclui volume de poros, distribuição de tamanho de poros, tortuosidade e conectividade, e pode determinar a facilidade com que gases, líquidos e íons externos podem penetrar em materiais cimentícios endurecidos. Os mecanismos de deterioração causados pela entrada de matéria estranha incluem carbonização, dano por congelamento e degelo e entrada de íons sulfato. É bem conhecido que as propriedades mecânicas do sistema determinam a facilidade com que os materiais à base de cimento se deterioram sob ações físicas e químicas internas e externas.

A ABNT NBR 6118:2014 insere que estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas tendo em vista as condições ambientais previstas no que antecede a construção, e quando realizadas devem seguir um padrão que esteja em consonância a sua segurança, estabilidade e durabilidade durante o período de durabilidade do material.

Neville (2016) considera que a durabilidade do concreto é capaz de resistir ao processo de deterioração ao qual estará exposto, podendo manter a resistência adequada e dessa maneira assegurando sua condição durável de utilização durante a vida útil de projeto prescrito pelo projetista.

Percebe-se que um concreto com maior duração é aquele que mantém a sua forma, dispondo de qualidade e capacidade de uso original, mesmo quando exposto ao meio para o qual foi projetado. Todavia, nenhum material pode ser considerado eternamente durável. O concreto mesmo possuindo características e propriedades que conseguem suportar situações adversas de uso e aplicações, mudará suas características ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.1.2 Origem das fissuras**

O surgimento das fissuras pode ocorrer por vários fatores, podendo ser na composição propriedades do material cimentício quanto das relações entre seus componentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As fissuras desenvolvem durante as etapas de execução e podem ser divididas entre as que se originam no estado fresco e aquelas que surgem no concreto após seu endurecimento.

Segundo Moreira (2016), o concreto pode ter fissuras em decorrência da água contida no material evaporar velozmente após o manuseio. As fissuras também podem ocorrer por expansão térmica, por um processo de congelamento/descongelamento, retração autógena ou mesmo ação do carregamento.

Gato *et al.* (2021), definem que: “as fissuras passivas são aquelas que o tamanho da abertura é constante e são causadas por: retração intrínseca ou química, variação térmica, dessecação superficial, assentamento plástico, movimentação das formas, e sobrecargas”. As fissuras ativas já possuem um outro processo, podendo valer-se de: variações térmicas, aumento do tamanho da abertura da fissura e são causadas por: cargas dinâmicas, retração por secagem ou hidráulicas, corrosão da armadura, reação álcali-silicatos e reações expansivas com sulfatos.

Já Takagi (2013), considera o concreto uma estrutura suscetível à formação de fissuras e tem sua durabilidade reduzida quanto à abertura destas, pois maiores aberturas causam maior comprometimento, podendo gerar reparo precoce da estrutura.

### 2.1.3 Dimensão das fissuras

A ABNT NBR 6118:2014 define limites para fissuração do concreto simples, armado e protendido, permitindo valores de, no máximo, 0,40 mm, sendo que o limite estabelecido é menor quando há maior concentração de agentes de deterioração – ou seja, quando se aumenta a classe de agressividade. A norma expõe as exigências conforme Quadro 1.

Quadro 1 –Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há
Concreto armado	CAA I CAA II e CAA III CAA IV	ELS-W wk ≤ 0,4 mm ELS-W wk ≤ 0,3 mm ELS-W wk ≤ 0,2 mm
CAA I_ Classe de agressividade ambiental fraca (rural ou submersa). CAA II_ Classe de agressividade ambiental moderada (urbana). CAA III_ Classe de agressividade ambiental forte (marinha ou industrial). CAA IV_ Classe de agressividade ambiental muito forte (industrial ou respingos de maré). wk_ Abertura característica de fissuras na superfície do concreto. ELS-W_ Estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados.		

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 6118:2014.

A pesquisa de Wang *et al.* (1997), tentou apurar a proximidade da permeabilidade com a espessura das fissuras. Percebeu-se que as aberturas de fissuras quando menores do que 50  $\mu\text{m}$ , têm efeito significativo sobre a o concreto ficar permeável, sendo ela menor. No entanto, quando a espessura da fissura gira em torno de 50 e 200  $\mu\text{m}$ , o concreto reflete rapidamente o contrário, ficando mais permeável. Ao final, quando as fissuras são maiores que 200  $\mu\text{m}$ , foi identificado um aumento contínuo na permeabilidade.

Quanto maior a presença de água nas fissuras, mais ocasiona o surgimento de outras fissuras. Dessa forma, as substâncias agressivas estariam mais próximas de afetar o concreto (RILEM TC 221 SHC, 2013). As fissuras são espaços vazios, são pontos que facilitam a penetração e infiltração de substâncias agressivas no concreto, e segundo Costa e Júnior (2021) existe uma relação direta entre a velocidade e o tamanho da penetração de substâncias agressivas.

## 2.2 AUTOCICATRIZAÇÃO

A autocicatrização do concreto é um fenômeno que diz respeito à deposição de produtos na abertura de fissuras, sem a intervenção humana, regenerando-as de forma natural desde que abertura seja pequena (Zhang *et al.* (2020), sem que seja necessário que se faça uma intervenção. Esse fenômeno é considerado por Oliveira et al (2019) importante para garantir a sustentabilidade das construções, pois pode contribuir significativamente para a manutenção da vida útil das mesmas, e, segundo os mesmos autores, os seguintes conceitos são atrelados ao fenômeno:

- a) Autocicatrização – com o fechamento das fissuras há a recuperação das propriedades e conseqüente recuperação mecânicas da estrutura;
- b) Autosselamento – o fechamento de fissuras deve ser resistente contra ações ambientais;
- c) Autógeno: processo de recuperação que utiliza componentes naturais no concreto e sem adição de aditivo específicos de autocicatrização, esse tipo não é previsível e não pode ser controlado;
- d) Autônomo: processo de recuperação de fissuras com aditivo que não faz parte da mistura original do cimento.

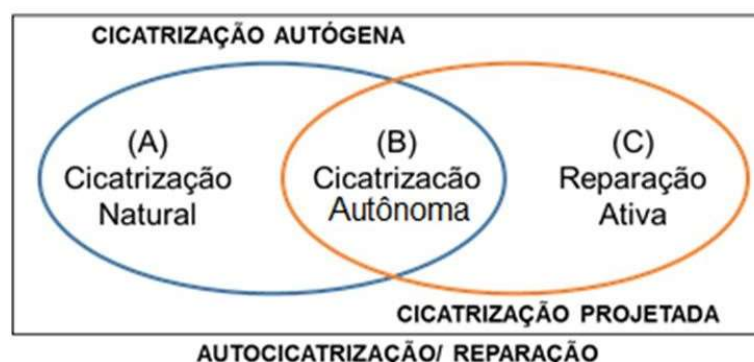
### 2.2.1 Mecanismos de autocicatrização

Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), o concreto é sensível à formação de fissuras, podendo prejudicar a durabilidade dos materiais cimentícios. A fissura acaba dando espaço a entrada de agentes agressivos, tanto em meio líquido quanto gasoso.

Muitos termos têm sido utilizados para falar sobre a cura autógena. Para adequar-se, o comitê RILEM TC SHC foi estabelecido em 2005. No Japão, o comitê JCI-TC075B teve seu início em 2007 (SHIMA *et al.* 2015). Para esse trabalho foi utilizado o termo autocicatrização.

De acordo com o Diagrama de Venn, na Figura 1, os mecanismos de autocicatrização podem ser classificados como cicatrização autógena, cicatrização projetado, cicatrização natural, cicatrização autônoma, reparação ativa e autocicatrização reparação (JCI – TC075B, 2009).

Figura 1 – Diagrama de Venn



Fonte: JCI – TC075B (2009).

O comitê JCI – TC075B (2009) estabelece as seguintes definições:

- a) cicatrização autógena (X): ocorre por meio da cicatrização natural [A], dos quais são fenômenos de enchimento e selagem de fissuras. Neste advento as fissuras do concreto são preenchidas sem quaisquer operações e trabalhos externos;
- b) cicatrização projetado (Y): ocorre mais pela reparação ativa [B], que são métodos artificiais e intencionais para preenchimento e fechamento de fissuras. Com antecedência se dá a introdução de forma projetada aos materiais ou dispositivos de cura;

- c) cicatrização natural (A): ocorrem de forma natural a preencher as fissuras, podendo surgir reações químicas;
- d) cicatrização autônoma (C): quando os fenômenos [A] e [B] ocorrem de forma simultânea, resulta na cicatrização autônoma [C], cicatrização involuntária de fissuras, a partir de adições como cinza volante com o objetivo de prover a recuperação do concreto, ou outro material suplementar cimentício adequado. São intencionalmente incorporadas ao concreto antecipadamente;
- e) reparação ativa (B): ocorre por meio de dispositivos artificiais, podendo ser sensores e atuadores;
- f) autocicatrização reparação: reparação mais abrangente precisando de tratamento no local.

No Quadro 2 pode ser observado um resumo dos fenômenos relacionados à autocicatrização, através da autocicatrização natural com reidratação do cimento, autocicatrização autônoma, com o uso, cinza volantes, aditivo expansivo. Já na reparação ativada com a utilização de fibras, dispositivos geradores de calor e fusão com técnicas de monitoramento no concreto para selar as fissuras (JCI – TC075B, 2009).

Quadro 2 - Fenômenos relacionados à autocicatrização

Exemplos de estudos			Mecanismo	Categoria	
[A]	Autocicatrização natural	Reidratação do cimento residual não hidratado em concretos com baixa relação a/c;	Autocicatrização	Autocicatrização	
		Reidratação das fissuras encontradas em estruturas hidráulicas.			
[B]	Autocicatrização autônoma	Utilização de cinzas volantes;		Autocicatrização	Cicatrização projetada
		ECC contendo cinza volante;			
		Uso de aditivos especiais (aditivo expansivo);			
[C]	Reparação ativada	Uso de bactérias.		Reparação	
		Inclusão de microcápsulas etc.;			
		Uso de fibras de enchimento;			
		Uso de dispositivos geradores de calor;			
		Uso de ligas com memória de forma;			
Fusão com técnicas de monitoramento.					

Fonte: Adaptado de JCI – TC075B (2009).

A capacidade de autocicatrização dos materiais cimentícios pode ser dividida em três categorias, sendo elas: autocicatrização natural, autocicatrização autônoma e reparação ativada (HUANG et al., 2016).

A partir das definições utilizadas para elencar tipos de cicatrizações do concreto, pode-se classificá-las em dois tipos: autógena e a autônoma. Quando a cicatrização ocorre por deposição de componentes padrões da mistura diz-se que é autógena; quando a cicatrização ocorre pela presença de elementos externos ao concreto ou quando há a necessidade de um ativador para que o processo ocorra, ela é denominada de autônoma (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

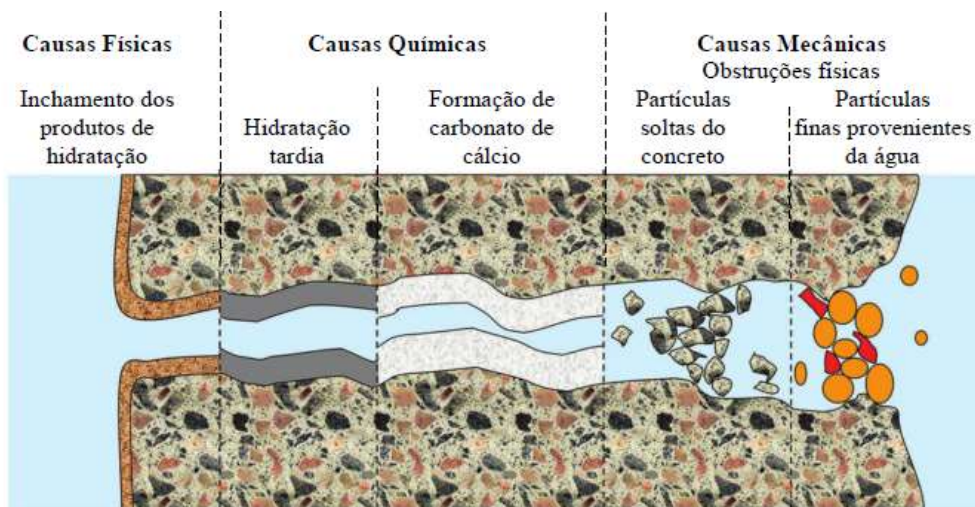
#### **a) Autocicatrização autógena**

A autocicatrização autógena é um fenômeno natural antigo, bastante frequente na vida dos seres humanos, animais e plantas, que são capazes de se regenerar, de se recompor, recuperar e curar por si próprios automaticamente. Os materiais cimentícios também apresentam essa habilidade de autocicatrização natural, ocupando espaços vazios e reparando possíveis fissuras (DE BELIE et al., 2018). A expressão "autógena" remete que a recuperação da estrutura de concreto é ocasionada sem interferência externa.

Segundo o comitê RILEM TC 221 SHC (2013), a capacidade de autocicatrização é autógeno quando a cicatrização de fissura vale-se materiais que poderiam estar presentes com outras finalidades, não propriamente projetado para a autocicatrização.

De acordo Zhang et al. (2020), a autocicatrização autógena é o fenômeno que oferece o selamento total ou parcial das fissuras, promovida pelos constituintes originais da mistura, necessariamente na presença de água. De acordo Wang et al. (2019), a cicatrização autógena está associada às propriedades de composição física, química e mecânica da matriz cimentícia, e aos principais produtos formados no fechamento das fissuras, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Mecanismos para autocicatrização autógena



Fonte: Edvardsen (1996), RILEM TC 221 SHC (2013), De Rooij *et al.* (2013) e Reinhardt *et al.* (2013).

A causa física do inchaço dos produtos umectantes devido à absorção de água pode impedir o fluxo de fluido através das rachaduras. Razões químicas podem aparecer porque essa matriz contém grãos anidros que reagem quando em contato com a água, resultando em um novo produto de hidratação (SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

Um dos principais mecanismos de autocicatrização no concreto em idades iniciais é a hidratação contínua ao longo do tempo. Porém a presença de altos teores de partículas de cimento não hidratado impede a formação de etringita tardia no concreto e desta forma não ocorre a reparação total da fissura (VAN TITTELBOOM E DE BELIE, 2013; DE ROOIJ *et al.*, 2013; FERRARA *et al.*, 2016).

### b) Cicatrização autônoma

A cicatrização autônoma é formada por materiais externos que são distribuídos na estrutura de concreto no momento de sua produção, para agir na fissura (MOREIRA 2016).

De acordo com RILEM TC 221 SHC (2013), a autocicatrização autônoma é o processo reparatório que ocorre quando se utiliza materiais que não são comumente encontrados nas matrizes cimentícias.

O processo de autocicatrização autônoma acontece como consequência, por exemplo, de MCS, aditivo redutores de permeabilidade, aditivo autocicatrizante, fibras

de vidros, cianobactérias, expansivos, polímeros superabsorventes e outras adições realizadas no concreto (TAYEBANI; MOSTOFINEJAD, 2019).

Os MCS ativos são incorporados de forma proposital na matriz de cimento, com o intuito de fechar a fissura, mediante um espaço rico em umidade. Propriedades pozolânicas, podem ser componentes em algumas adições como por exemplo a cinza volante e metacaulim (FERRARIS *et al.*, 2001; PARK *et al.*, 2005), e MCS inativas, denominadas filer (COURARD *et al.*, 2011; KAUFMANN, 2004), podem ser comparados com uma vertente da cicatrização autônoma.

### **2.2.2 Efeitos dos materiais cimentícios suplementares na autocicatrização**

As adições conhecidas como MCS estão sendo utilizado como composto do cimento de maneira frequente nos últimos anos, e na sua maioria compostas por resíduos originário de siderúrgicas, usinas termoelétricas, indústrias e mineradoras, como por exemplo: cimentantes escória granulada de alto-forno, cimentantes e pozolânicas como a sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz, pozolanas comuns cinzas volantes e argila calcinadas, pozolanas pouco reativas escória de alto-forno e inertes Fíler calcário.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) e Santos 2019, os autores cada vez mais citam dentre os benefícios obtidos pelo emprego dos MCS no concreto para avanço na durabilidade à fissuração térmica da estrutura ao que se refere ao calor de hidratação mais baixo (HAN *et al.*, 2017); beneficiamento do conduta mecânico; impermeabilidade por afinamento dos poros; intensificação da zona de transição; e, por enfim resultando da baixa da alcalinidade, maior solidez aos ataques químicos, quanto águas sulfatadas e ampliação álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (CAVALCANTI, 2006).

Na revisão da literatura em modo geral referente o concreto, existe uma definição diferente para as MCS, que não se confundem com os aditivos. Os MCS são utilizados com o intuito de somar ou mesmo substituir, mesmo que de forma parcial, a matéria-prima cimento; já os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem modificar sua proporção na composição do concreto.

Sabe-se que a utilização de MCS na construção civil é um importante avanço ao que compete as práticas sustentáveis, em que normalmente são utilizados



resíduos provenientes de outras indústrias, dos quais em grande proporção iriam para o descarte em locais inadequados, podendo ocasionar riscos de contaminação do solo e locais com água (CREMONINI *et al.*, 2005).

Ao se discutir sobre adições ao cimento, vemos a necessidade de informações sobre o efeito do filler (físico) e da pozolana (químico), embora básicas. A primeira se deve à presença de pequenas partículas resultantes de aditivos que, quando usados em quantidades normais, refinam a estrutura dos poros. Assim, permite reduzir o número e o tamanho dos poros, chegando até a bloquear alguns vazios, resultando em uma composição de cimento Portland mais compacta (MORAES, 2001).

O efeito dos MCS com propriedades pozolânicas (químico), segundo a ABNT NBR 12653:2015, consiste em:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

As principais MCS empregadas são: as sílicas ativas, metacaulim, cinzas volantes, cinza de casca de arroz e escória de alto forno (TRINDADE, 2011).

Os tipos de MCS, sejam inertes ou pozolânicas, são opções a serem utilizados como compósitos cimentícios. Sabe-se que para qualquer tipo de adição ou substituição tem efeitos diferentes nas propriedades do concreto fresco e endurecido e na sua vida útil, com vantagens e desvantagens ao longo dos anos. As vantagens podem ser analisadas através das combinações de vários materiais cimentícios suplementares, (LE; LUDWIG, 2016).

Para Takagi (2013) e Cappellesso (2018), concretos com capacidade intensificada de autocicatrização podem ser refinados a utilização de aditivos químicos misturado com grande quantidade de substituição de finos, podendo ser as MCS.

Pode ser intensificada a autocicatrização dos concretos com o uso de adição mineral, como mostram as pesquisas sobre os benefícios da utilização de cinzas volantes (ŞAHMARAN; LI, 2009; ZHANG; QIAN; MA, 2014).

Além disso, Garcia *et al.* (2015) enfatizam essa discussão ao alertarem para a contribuição da sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento, pois ao reduzirem as emissões de gases poluentes na atmosfera durante sua execução, minimizam o gasto energético e o consumo de recursos naturais não renováveis.

Já o estudo de Raisdorfer (2015), analisou a influência da adição e da substituição compostos cimentícios como: “fíler quartzoso, sílica ativa, metacaulim, sílica da casca de arroz e cinza volante”, concluindo que os MCS obtiveram resultados provocados por alterações relevantes ao que compete a durabilidade do concreto, das quais cada um agem de forma diferente na estrutura do composto cimentício.

Tafraoui, Escadeillas e Vidal (2016) avaliaram a utilização de MCS como a sílica ativa e metacaulim. Através do estudo de Fonseca (2016), testou-se a durabilidade do concreto em corpos de prova como “MCS de cinza de casca de arroz, metacaulim e fíler calcário. O estudo resultou numa durabilidade melhor, bem como melhores desempenhos mecânicos.

### 2.2.3 Materiais Cimentícios Suplementares

Os materiais cimentícios suplementares, são adições de origem mineral cuja função é melhorar o desempenho físico, mecânico, reológico e a durabilidade nas matrizes a base de cimento Portland (MOHAMMED, 2017). As adições minerais ou pozolanas são classificados em grupos ou classes de acordo com a ABNT NBR 12653:2014 e nas normas internacionais mais utilizadas, como a americana ASTM C618 (ASTM, 2019). Essas classes geralmente são divididas de acordo com a origem do aditivo., conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Classe de adições minerais pela ASTM C618 e NBR 12653

ASTM C 618	NBR 12653	Materiais que obedecem aos requisitos
Classe N	Classe N	Pozolanas naturais; materiais vulcânicos; terras diatomáceas; argilas calcinadas.
Classe F	Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso.
Classe C	Classe E	Qualquer material que difere das classes anteriores; cinza volante proveniente da queima de carvão sub-betuminoso.

Fonte: Adaptado de ASTM C618 (ASTM, 2019) e ABNT NBR 12653:2014.

Conforme Vieira (2017), os materiais cimentício suplementares podem ser originadas de resíduos industriais, agroindústrias e mineração. Diferentes tipos de subprodutos industriais, tais como metacaulim, cinzas volantes e fíler calcário, têm sido amplamente estudados nos últimos anos (GHALEHNOVI *et al.*, 2019).

### **a) Cinza Volante**

Um material obtido de resíduo da queima do carvão das usinas termelétricas, das quais utilizam do carvão mineral para a produção de energia elétrica. Durante a combustão em uma usina termelétrica, quando o carvão atinge a alta temperatura do forno, ou seja, em torno de 1400 °C, os voláteis e o carbono são queimados, pois, a maioria das impurezas minerais é fundida em alta temperatura. O material fundido é transportado para um local mais frio, de onde se solidifica em partículas semelhantes a vidro (METHA; MONTEIRO, 2014).

Segundo a ABNT NBR 12653:2014, as cinzas volantes encontram-se classificadas na Classe C, oriundas da combustão do carvão com elevado teor de carbono em sua composição, e carvão sub-betuminoso por possuírem grandes quantidades de CaO. Apresentam propriedades cimentantes na presença de água. O maior diferencial entre as classes está no teor de cálcio, apresentando as cinzas da primeira categoria de 10% a 15% de CaO, enquanto as cinzas da segunda categoria possuem de 15% a 40% de CaO (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo as ABNT NBR 5736:1991 e ABNT NBR 11578:1991 podemos utilizar cinzas volantes em teores de até 50%, em massa, como substituição para o CP IV e teores de 14%, em massa, como substituição do CP II- Z (HOPPE FILHO, 2008)

A capacidade de autocicatrização do concreto pode ser estimulada fazendo-se substituição parcial do cimento por teores de cinzas volantes. A hidratação das cinzas volantes ocorre em período superior a 28 dias, o que propicia que os produtos resultantes desta hidratação modifiquem de forma benéfica a estrutura, pois através deste fenômeno químico ocorreria o selamento da fissura (EDVARSEN, 1996 *apud* REINHARDT *et al.*, 2013).

Termkhajornkit et al. (2009) e Van Tittelboom e De Belie (2009) substituíram parte do cimento por cinzas volantes buscando estimular o potencial de fechamento automático de materiais cimentícios.

Este material pozolânico possui elevada finura, com variações de partículas entre 1 µm até 150 µm de diâmetro, sendo a maioria menor que 20 µm. Essa variação de tamanho das partículas ocorre devido ao processo térmico envolvido, grau de pulverização do carvão e do tipo de filtro instalado na usina (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003). De acordo com Cesari (2015), é interessante que as partículas possuam o mesmo tamanho das partículas de cimento Portland.

Segundo Arvantini *et al.* (2014), a taxa de dissolução dos materiais cimentícios suplementares aumenta conforme diminuição do tamanho médio das partículas, o que contribui com o aumento da atividade pozolânica e, por consequência, o desenvolvimento de produtos hidratados mais fortes, conferindo ao concreto o maior desempenho em idades avançadas.

Segundo Moreira (2016), o uso de adições minerais com propriedades pozolânicas, como a cinza volante, tem a possibilidade de ser considerado um fenômeno da autocicatrização, melhorando o potencial de fechamento da fissura no concreto.

Kang (2019) cita que a junção de cinza volante na produção de compósitos cimentícios, no que se refere a troca pelo cimento Portland, torna-se interessante na finalidade de reduzir custos e impactos ambientais, bem como melhorar as propriedades dos mesmos.

#### **b) Metacaulim**

O metacaulim é uma adição mineral obtida pela calcinação do caulim em temperaturas entre 650 °C e 800 °C, levando à sua desidroxilação e conferindo ou aumentando sua atividade pozolânica, e é caracterizado principalmente por sua alta reatividade com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e a capacidade de acelerar a hidratação do cimento (KAVITHA *et al.*, 2015). Grande parte da sua composição é constituída por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa. A reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$  originado da hidratação do cimento, pode gerar aluminatos, silicatos e silicoaluminatos de cálcio hidratado similares aos decorrentes da hidratação do cimento Portland (VEJMELKOVÁ *et al.*, 2011).

Observa-se contribuição significativa do metacaulim para o aumento da resistência de cimentos e concretos. Vejmelková *et al.* (2011) relatam que a substituição do cimento na mistura de concreto pelo metacaulim possibilitam maiores resistências especialmente nos primeiros anos. Segundo Arikan *et al.*, (2009) a incorporação de partículas "superfinas" de metacaulim ao concreto resulta em um efeito de microfíler, melhorando a compactação da matriz cimentícia. Conseqüentemente, o uso de metacaulim na massa de cimento leva ao refinamento da estrutura de poros melhorando a resistência a compressão.

O estudo de Kou, Poon e Agrela (2011) aponta que o metacaulim cooperou para o incremento da resistência do concreto a curto e longo prazo. A substituição do cimento por 15% em massa do metacaulim pode auxiliar a ter mais rendimento nas propriedades mecânicas, assim como a durabilidade do concreto. Sfikas, Badogiannis e Trezos (2014) também observaram que, substituindo 20% de cimento, todo metacaulim introduzido na mistura parecia ter reagido entre 28 e 360 dias, apresentando resistências em torno de 10% maior que o concreto referência. Medeiros (2016) demonstrou que uma composição de concreto que substituiu 60% do cimento por metacaulim e resíduos da biomassa da cana-de-açúcar atingiu uma resistência do concreto superior a 35 MPa após 91 dias.

Segundo Madandoust e Mousavi (2012), em termos de durabilidade, a adição de metacaulim reduz sinergicamente a absorção de água devido ao efeito filer e reações pozolânicas.

A produção do metacaulim mostra que o impacto no meio ambiente pode ser reduzido, comparando sua menor emissão de dióxido de carbono no que concerne ao clínquer (PERLOT; ROUGEAU; DEHAUDT, 2013).

Liu *et al.* (2017) analisaram o ataque combinado de CO<sub>2</sub> e íons de cloreto em concreto de cimento Portland com vibração normal e concluíram que sua ação combinada pode densificar a microestrutura do concreto em comparação com a ação isolada de agentes agressivos.

Kocak (2020) cita que o metacaulim, devido às suas características pozolânicas, vem sendo utilizado como material cimentício. As pesquisas apontam que os materiais cimentícios com metacaulim apresentam um melhor desempenho mecânico e resistência aos ataques químicos.

Espera-se que o metacaulim seja mais pozolânico do que outras adições minerais, como cinzas volantes, devido à sua alta concentração de sílica e alumina (BADOGIANNIS *et al.*, 2015). Também acerca disso, Kavitha *et al.* (2015) confirmaram que a reação pozolânica do metacaulim é considerada rápida.

### **c) Fíler carbonático**

De acordo com a ABNT NBR 16697:2018, além dos MCS quimicamente ativos em cimentos compostos, existem também cimentos constituídos por fileres com percentual em massa de material carbonático entre 11% e 25%. Este material

contribuí de forma física e mecânica nas propriedades do concreto e pode contribuir para melhorar a reologia da mistura na produção e no lançamento do concreto bombeado, na massa específica, na redução da permeabilidade, na redução da exsudação capilar e tendência à fissuração. Geralmente é um material inerte com finura semelhante às partículas de cimento e tem a capacidade de hidratar o cimento Portland, atuando como sítios de nucleação (SIDDIQUE; KHAN, 2011).

Segundo Silva e Brito (2015), o preenchimento de calcário é obtido de pedreiras de calcário e é produzido como subproduto de trituradores de pedra. Este material é constituído por calcário em pó, cujo principal componente é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Esse produto tem sido bastante utilizado por conta da sua ação de preenchimento, reduzindo assim o uso do cimento.

Hasui (2013) mostra que o calcário é o mais frequente tipo de fíler utilizado no cimento comercial, visto que é um material com presença de aproximadamente 10% na crosta terrestre e com jazidas na maioria dos países, incluindo o Brasil. O fíler calcário é considerado uma adição inerte, todavia de acordo com Aqel e Panesar (2016), a escolha por este material influencia o sistema cimentício por meio de mudanças no comportamento físico e químico do material.

Wang *et al.* (2018) enfatizam que, as partículas de filler calcário podem endurecer a microestrutura de materiais à base de cimento em diferentes modos. Quanto ao efeito de preenchimento, as partículas finas de calcário podem preencher os poros entre os produtos de hidratação, e o efeito de nucleação do calcário pode melhorar o grau de hidratação do cimento e gerar mais produtos de hidratação em idades precoces.

Os fílers destacam-se dentre os materiais, por conta de terem seus custos menores, além de haver em grande quantidade, mesmo que tenham uma menor reatividade ou sejam inertes (CECEL, 2019). Segundo Barsi, Trezza e Irassar (2020), utiliza-se o calcário como matéria prima para produzir cimento, sendo difundido também para enchimento.

Conforme Barbalho, Silva e Rêgo (2020), a adição de calcário torna a indústria cimenteira mais sustentável, reduz o consumo de energia e o uso de recursos naturais, o que possibilita contribuir para a redução da produção de carbono.

#### 2.2.4 Cimentos Ternários Tipo LC<sup>3</sup>

Os estudos dos cimentos ternários constituídos de argila calcinada e calcário, conhecidos como cimentos LC<sup>3</sup> (*limestone calcined clay cement*), utilizados em conjunto para fazer um cimento composto, possuem propriedades que melhoram o desempenho mecânico e a durabilidade em relação ao cimento tradicional (MOREIRA; RÊGO, 2019).

A argila calcinada, particularmente em combinação com o calcário, possui um grande potencial para a ampliação do uso de materiais cimentícios suplementares como substituto do clínquer (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Segundo Oliveira *et al.* (2019), uma das vantagens desse tipo de cimento é a alta disponibilidade dos materiais cimentícios suplementares (MCS) utilizados, o que lhe proporciona um grande potencial para suprir a produção de cimentos com baixo impacto ambiental. Além disso, a substituição de clínquer por esses materiais causa significativa diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub> no meio ambiente (KRISHNAN *et al.*, 2019).

O estudo de Lins (2017) verificou que a resistência à compressão de cimentos LC<sup>3</sup> feitos com diferentes teores (40%, 55%, 70% e 85%) e tipos de fíler calcário e argila calcinada, observou-se que, essas variáveis induzem o LC<sup>3</sup> a atingir resistências parecidas àquelas que obteve o cimento Portland.

Segundo Dhandapani *et al.* (2018) acreditam que o concreto feito com cimento LC<sup>3</sup> apresentou características de desenvolvimento de resistência semelhantes ao concreto de referência e maior desenvolvimento em relação ao concreto com cinza volante.

Já, Yu, Wu e Leung (2020) verificaram que a resistência à compressão e tração do concreto utilizando cimento LC<sup>3</sup> e variando a relação água/ligante (0,30, 0,35 e 0,40). Os mesmos confirmam que há uma tendência razoável da resistência à compressão expandir com o tempo de cura, mas diminuir com o aumento da relação água/ligante e do teor de cimento LC<sup>3</sup>.

Por outro lado Krishnan *et al.* (2019) investigaram a probabilidade de usar cimento CPV nas misturas ternárias de cimento em que o clínquer é substituído por materiais (MCSs), como metacaulim e carga de calcário, pois podem reduzir o fator clínquer em detrimento de várias vantagens quando misturado com cimentos.

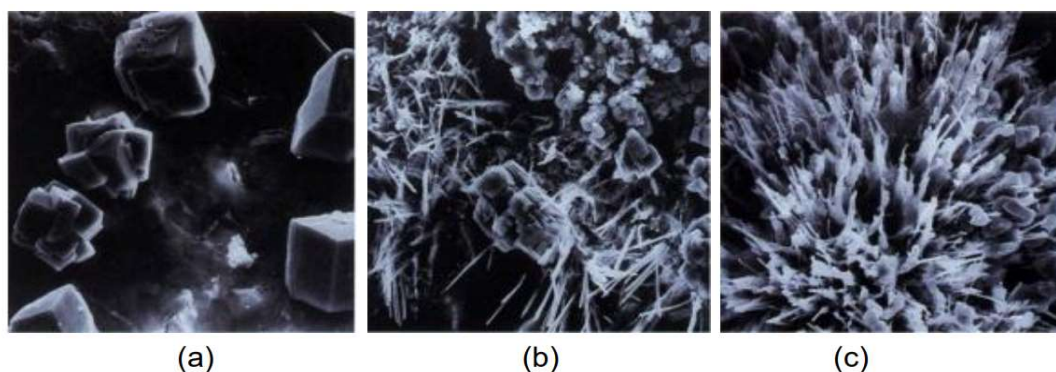
### 2.2.5 Aditivo Cristalizante

Os aditivos cristalizantes são, geralmente, empregados na forma de pó e são compostos por: “cimento Portland, fillers, pozolanas, areias, escórias, pó siliciosos e produtos químicos ativos” (GUZLENA; SAKALE, 2019). Contudo, uma parcela da composição dos aditivos cristalizantes é constituída por componentes cuja composição química é protegida por segredo industrial.

Tendo em vista a forma de ação e interação com a matriz cimentícia, os aditivos cristalizantes são incorporados durante a mistura dos componentes do concreto.

As substâncias ativas presentes em aditivo para impermeabilização por cristalização adicionado em concreto, conforme Ferrara, Krelani e Carsana (2014), na presença de água podem reagir tanto com as partículas de cimento quanto com os produtos de hidratação, formando cristais que contribuem para a capacidade de autocicatrização de fissuras, conforme Figura 3 (TAKAGI 2007).

Figura 3 - Formação de cristais no interior do concreto. (a) Concreto não tratado. (b) Início da formação de cristais; (c) Cristalização final.



Fonte: Takagi (2007).

Em decorrência, formam-se produtos insolúveis que se precipitam na rede de poros do concreto, selando-o contra o ingresso de água e substâncias nocivas, tornando-o resistente à degradação frente a ambientes agressivos. No momento em que a fissura se encontra sem água, os cristais permanecem em estado de inatividade. No entanto, assim que a água surge novamente, os cristais retomam seu crescimento, oferecendo proteção duradoura ao concreto (OURIVES et al, 2009). A Figura 4 ilustra a cicatrização de fissuras quando da presença de aditivos cristalizantes.



Figura 4 – Exemplo de cicatrização na presença de aditivo cristalizante



Fonte: Adaptado de PENETRON®

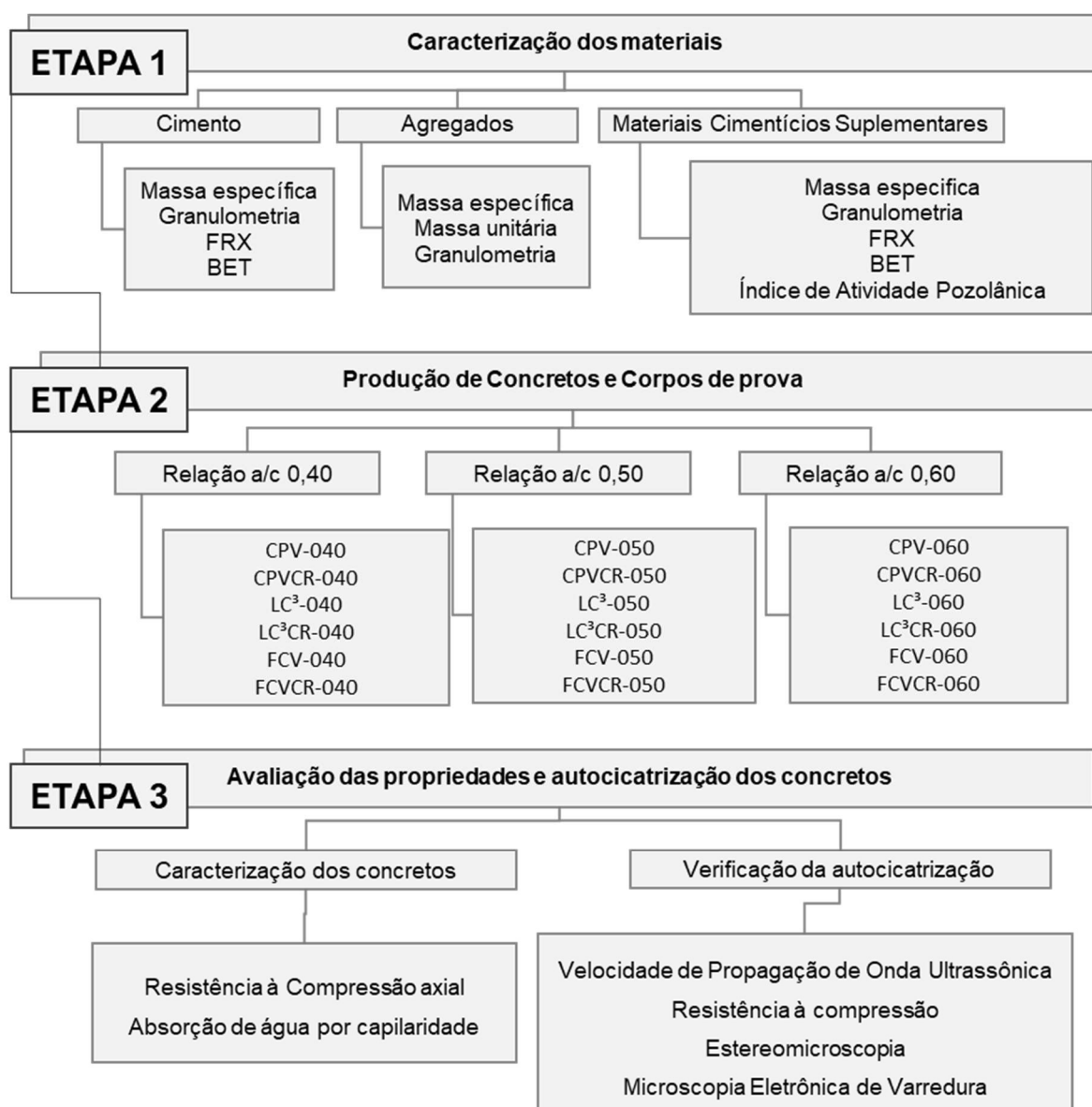
Já Elsalamawy et al. (2020) salientam que os materiais formados por aditivo cristalizante têm mostrado uma redução considerável na permeabilidade das estruturas de concreto em ambientes severos. Além disso, De Belie *et al.* (2018) classificam os aditivos cristalizantes e as MCS como estimuladores da autocicatrização autógena.

A capacidade dos cristalizantes de reduzir o ingresso de agentes externos no concreto é vinculada de forma direta às características da rede de poros da matriz de cimento, e, conforme Elsalamawyl et al. (2020), uma maior porosidade propicia a precipitação e desenvolvimento de C-S-H adicional na matriz.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De forma a atender os objetivos dessa pesquisa, a proposta envolve a análise do comportamento frente à autocicatrização de concretos compostos com adições ternárias de 3 diferentes materiais cimentícios suplementares – filer calcário, cinza volante e metacaulim, quando se emprega aditivo cristalizante. Para tanto, o programa experimental se divide em 3 etapas: preparação e caracterização dos materiais; dosagem do concreto e produção dos corpos de prova; e execução dos ensaios e análise dos dados. Essas etapas estão detalhadas conforme organograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Organograma do programa experimental



O detalhamento das diversas etapas, incluindo o planejamento dos experimentos, a origem dos materiais empregados e os procedimentos experimentais, é apresentado nos itens que seguem.

### **3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO**

Neste trabalho são apresentadas as variáveis de controle, que também são conhecidos como variáveis independentes, e as variáveis de resposta.

#### **3.1.1 Variáveis de controle**

As variáveis independentes ou de controle são aqueles parâmetros que podem influenciar as características e as propriedades do concreto, podendo ter mais de um nível de estudo (variável de controle com nível variado) ou um único nível de estudo (variável de controle fixa). Assim, as variáveis de controle estudadas em mais de um nível são:

- a) tipo de cimento, 3 níveis - cimento Portland CP V-ARI (Ref); LC<sup>3</sup> (55%CPV-ARI+30%MK+15%FC) e FCV; (55%CPV-ARI+30%CV+15%FC);
- b) relação água/cimento, 3 níveis - 0,40; 0,50 e 0,60;
- c) teor de aditivo cristalizante (CR): (0% e 1,0%) do volume de aglomerante.

As variáveis com um nível de estudo, ou nível fixo, são:

- a) idade de abertura de fissuras - 3 dias;
- b) teor de substituição do cimento por MCS - 45% em massa, sendo 30% de pozolana e 15% de fíler;

Ainda, por restrições técnicas, têm-se as variáveis não controladas, que são aquelas cujo controle não é possível executar durante o experimento. Entre essas variáveis, estão a temperatura e a umidade do ambiente de produção dos concretos e a geometria das aberturas de fissuras dos concretos analisados.

#### **3.1.2 Variáveis Dependentes ou de Resposta**

Como variáveis de resposta (variáveis dependentes), foram avaliadas, no estado endurecido, para controle de autocicatrização, as propriedades mecânicas por ensaios de resistência à compressão axial do concreto para verificar o impacto dos traços. Foram feitos ensaios de velocidade de ondas ultrassônicas para controle de recuperação autocicatrização, ensaios de absorção de água por capilaridade, impacto

dos traços na cicatrização dos concretos pela visualização e monitoramento do acompanhamento das fissuras, resistência à compressão em corpo de prova prismático com e sem fissura, e análise de imagens de estereomicroscópio (lupa) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## 3.2 MATERIAIS

Neste item é apresentada a caracterização dos materiais empregados neste trabalho, bem como os métodos empregados para as análises.

### 3.2.1 Cimento e Materiais Cimentícios Suplementares

Utilizou-se o cimento Portland CP V-ARI, oriundo de um único lote. Conforme a NBR 16.697 (ABNT, 2018), esse cimento pode conter até 10% de fíler carbonático. Os MCS foram obtidos a partir de doações de empresas diversas.

A cinza volante (CV) empregada no estudo tem origem na queima de carvão mineral em unidade de geração de energia termoelétrica no Rio Grande do Sul e é comumente utilizada em concreteiras. O lote empregado na pesquisa foi doado pela Concretul. O fíler calcário calcítico (F) foi doado pela mineradora FIDA, localizada em Caçapava do Sul, RS. A argila calcinada desta pesquisa, empregada na composição do cimento ternário tipo LC<sup>3</sup>, é um metacaulim comercial de alta pureza (HP Ultra) doado pela Metacaulim do Brasil. Os métodos de empregados para a caracterização do cimento e dos MCS é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – informações da caracterização física do cimento e dos MCS

Característica	CP V-ARI	Cinza Volante	Metacaulim	Fíler Calcário	Aditivo cristalizante
Composição química	Fluorescência de raios X (FRX) <sup>4</sup>	Fluorescência de raios X (FRX) <sup>4</sup>	Fluorescência de raios X (FRX) <sup>4</sup>	Fluorescência de raios X (FRX) <sup>4</sup>	Fluorescência de raios X (FRX) <sup>4</sup>
Perda ao fogo	ABNT NM 18:2012	ABNT NM 18:2012	ABNT NM 18:2012	ABNT NM 18:2012	ABNT NM 18:2012
Massa específica	Picnometria a gás hélio <sup>1</sup>	Picnometria a gás hélio <sup>1</sup>	Picnometria a gás hélio <sup>1</sup>	Picnometria a gás hélio <sup>1</sup>	Picnometria a gás hélio <sup>1</sup>
Área superficial específica	B.E.T. <sup>2</sup> ; 80°C; 4h	B.E.T. <sup>2</sup> ; 200°C; 1h	B.E.T. <sup>2</sup> ; 200°C; 1h	B.E.T. <sup>2</sup> ; 200°C; 1h	B.E.T. <sup>2</sup> ; 200°C; 1h
Granulometria	Difração de luz laser <sup>3</sup>	Difração de luz laser <sup>3</sup>	Difração de luz laser <sup>3</sup>	Difração de luz laser <sup>3</sup>	Difração de luz laser <sup>3</sup>
Resistência mecânica	ABNT NBR 7215:2014	-----	-----	-----	-----
Índice de atividade pozolânica (IAP)	-----	ABNT NBR 5752:2014	ABNT NBR 5752:2014	ABNT NBR 5752:2014	-----

<sup>1</sup>Picnômetro modelo Micromeritics modelo Accupyc II 1340, LCVMat-Unisinos; <sup>2</sup>Equipamento

Micromeritics, modelo TriStar II Plus, no LCVMat-Unisinos; <sup>3</sup>Equipamento Microtac, modelo S3500;

<sup>4</sup>EDX-720 SHIMADZU, LCVMat-Unisinos;

Fonte: elaborado pela autora

Na sequência, apresenta-se a caracterização do cimento e dos MCS. A Tabela 1 apresenta a caracterização química desses materiais

Tabela 1 – Composição química do cimento e dos MCS

Parâmetro químico	Cimento (%)	Cinza volante (%)	Metacaulim (%)	Fíler Calcário (%)
SiO <sub>2</sub>	17,04	55,01	59,95	12,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,22	34,15	24,50	3,61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,34	3,66	6,00	1,71
CaO	61,46	0,03	3,04	44,28
MgO	4,89	0,60	1,46	0,49
Na <sub>2</sub> O	0,39	0,14	ND	0,24
K <sub>2</sub> O	0,87	1,61	1,60	0,61
SO <sub>3</sub>	1,33	ND	0,85	1,09
MnO	0,07	0,01	ND	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,35	1,66	1,34	ND
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	ND	ND	ND
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13	0,18	0,20	0,06
SrO	0,21	ND	ND	0,12
ZnO	0,02	ND	ND	ND
Perda ao fogo	6,66	2,95	1,05	34,95
Total	100	100	100	100

Fonte: Elaborada pela autora.

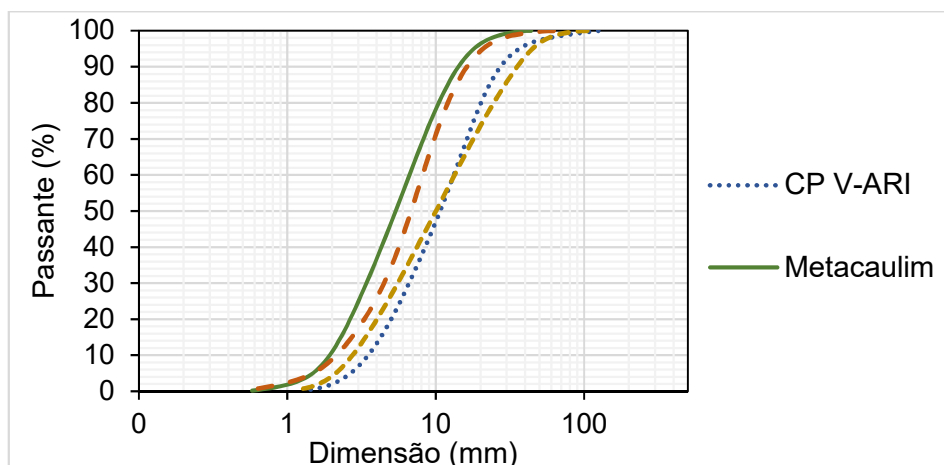
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os resultados de caracterização física do cimento e dos MCS. As curvas de distribuição granulométrica podem ser observadas na Figura 6.

Tabela 2 - Caracterização física do cimento e dos MCS

Caracterização física	Cimento	Metacaulim	Cinza Volante	Fíler calcário
Área específica – B.E.T. (m <sup>2</sup> /g)	1,61	21,80	1,53	3,06
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,05	2,53	2,12	2,77
Granulometria D10	3,51	1,93	2,75	2,14
D50	10,7	5,37	10,03	6,82
D90	27,28	14,19	35,32	16,21

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 6 – Distribuição granulométrica do cimento e dos MCS



Fonte: Elaborado pela autora.

O Índice de Atividade Pozolânica (IAP), uma determinação mecânica da pozolanicidade de MCS quimicamente ativo, é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Índice de atividade pozolânica

Parâmetro	Cimento	Metacaulim	Cinza volante
Resistência (MPa)	21,11	25,93	19,52
IAP (%)	----	122,81	92,45

Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), para ser considerado pozolânico, o resultado deve apresentar valor  $\geq 90\%$ , estando em concordância com a norma as adições metacaulim, cinza volante e fíler calcário como material inerte.

### 3.2.2 Agregados

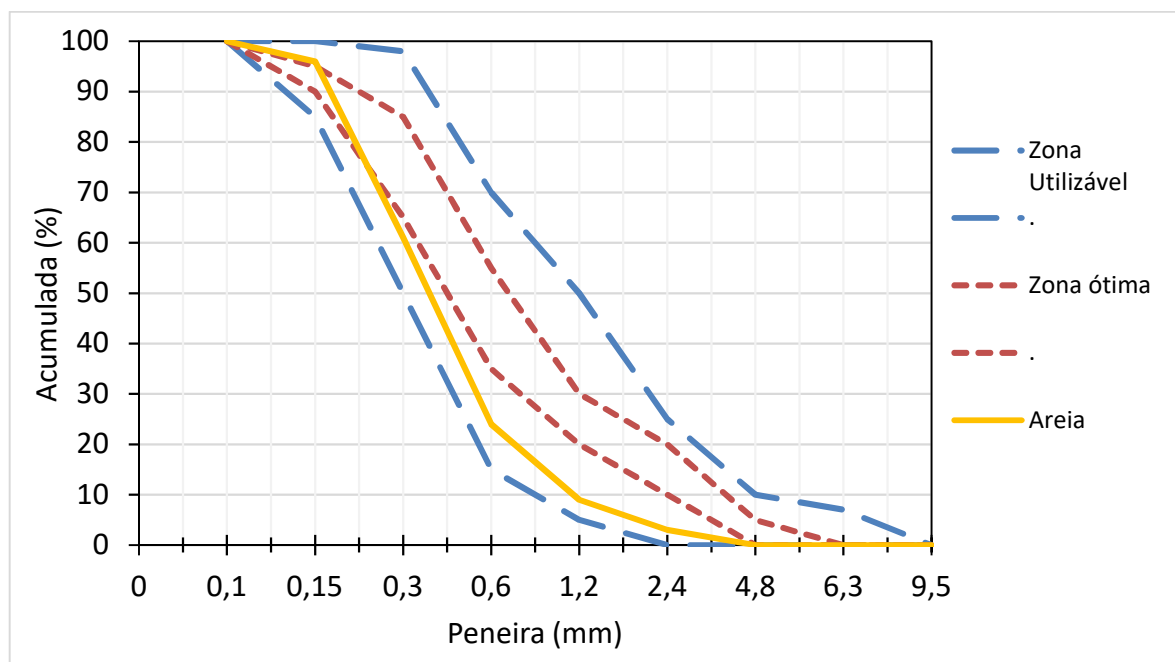
No programa experimental, o agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa extraída do Rio Jacuí. Os agregados miúdos foram caracterizados pelos ensaios de granulometria por peneiramento, massa unitária no estado solto, massa específica, absorção de água. Os ensaios de caracterização dos agregados miúdos foram realizados no LMC da Unisinos. As normas utilizadas e os resultados estão apresentadas na Tabela 4, e a sua distribuição granulométrica é apresentada no gráfico da Figura 7.

Tabela 4 – Caracterização granulométrica e física do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	ABNT NBR 17054:2022		
	Média retida (g)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)
4,8	0,0	0	0
2,4	8,8	3	3
1,2	22,5	6	9
0,6	52,1	15	24
0,3	128,8	37	61
0,15	125,2	36	96
Fundo	12,8	4	100
Total	350	100	
Módulo de finura		1,92	ABNT NBR 17054:2022
Dimensão máxima (mm)		2,40	
Densidade condição seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,56	ABNT NBR 16916:2021
Densidade condição sat. superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,58	
Absorção de água (%)		0,66	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,69	ABNT NBR 16972:2021
Índice de vazios (%)		34,01	

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 7 – Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo



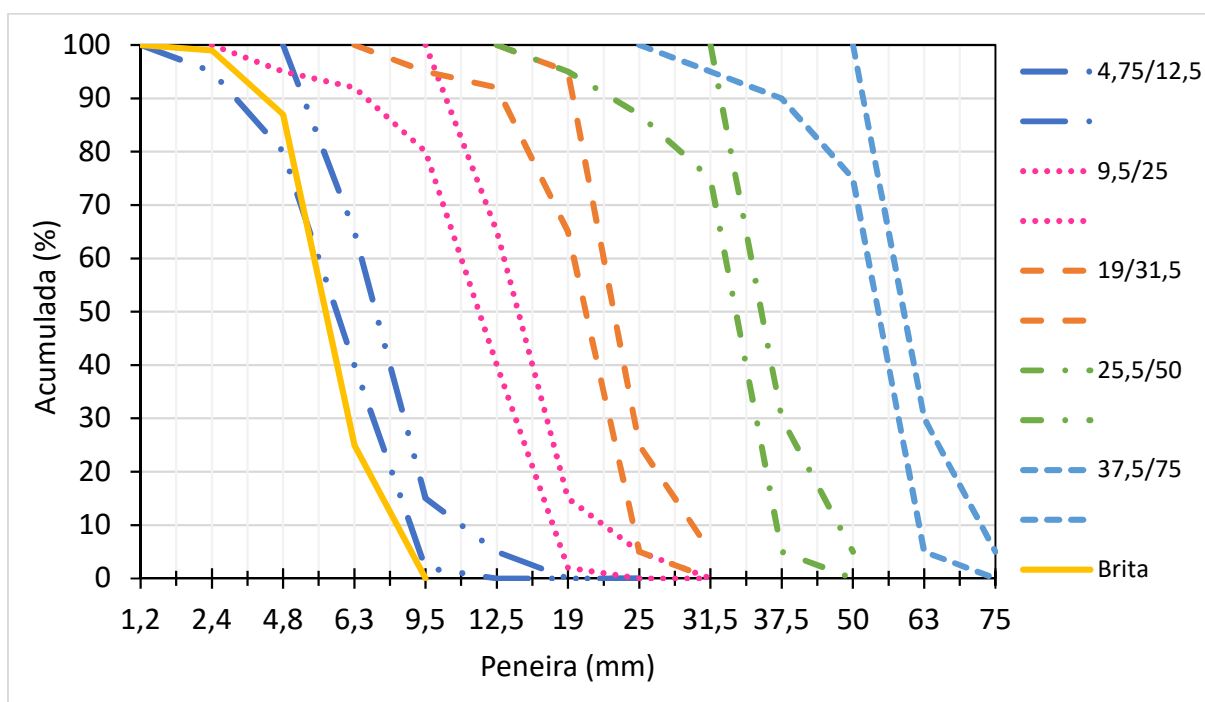
O agregado graúdo natural é oriundo de rocha basáltica região metropolitana de Porto Alegre e os ensaios de caracterização foram realizados no LMC da Unisinos. A Tabela 5 apresenta os dados resultantes da caracterização do agregado graúdo e a Figura 8 apresenta a curva de distribuição granulométrica.

Tabela 5 – Caracterização granulométrica e física do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	ABNT NBR 17054:2022		
	Média retida (g)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)
25			
19			
12,5	0	0	0
9,5	251	25	25
6,3	623,2	62	87
4,8	118,5	12	99
≤ 4,8	7,6	1	100
Total	1000,3	100	
<b>Módulo de finura</b>		3,12	ABNT NBR 17054:2022
<b>Dimensão máxima (mm)</b>		9,5	
<b>Massa específica saturado superfície seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,91	ABNT NBR 16917:2021
<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,87	
<b>Absorção de água (%)</b>		1,36	
<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>		1,66	ABNT NBR 16972:2021
<b>Índice de vazios (%)</b>		42,17	

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 8 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da distribuição granulométrica, percebe-se que o agregado graúdo utilizado é classificado comercialmente como brita 0, levando em consideração a dimensão máxima característica de 9,5 mm.

### 3.2.3 Aditivos

Para confecção dos concretos, empregou-se dois aditivos, um superplastificante e um cristalizante. O aditivo superplastificante é classificado como tipo II, de última geração, à base de policarboxilato, da linha ADVA™ CAST 525 fabricado pela GCP Applied Technologies. As características e especificações técnicas desse aditivo é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações técnicas do aditivo superplastificante

Descrição	
Dosagem recomendada (%)	0,15 a 0,80
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,06
pH a 25 °C	3,00 – 5,50
Teor de sólidos (%)	30
Cor	Líquido amarelo claro
Aspecto	Líquido

Fonte: Ficha Técnica de Produto ADVA™ CAST525 fornecida pelo fabricante (2021).



O aditivo cristalizante, segundo o fabricante do produto, é um pó constituído por cimento Portland, areia silicosa fina tratada e compostos químicos ativos, que são segredo industrial, indicado para impermeabilização e proteção do concreto. O uso desse material tem como objetivo selar o concreto contra a penetração de água e quaisquer outros líquidos, além de contribuir com a proteção contra agentes agressivos. Também consta na ficha técnica que o aditivo apresenta capacidade para selar fissuras, com aberturas de até 0,4 mm, contra a infiltração de água, de modo a promover a autocicatrização da estrutura. O teor de adição do aditivo cristalizante, no presente trabalho, foi de 1% em relação à massa de cimento, e baseou-se no estudo de Oliveira (2019), que, ao empregar o mesmo teor, obteve recuperação parcial das fissuras na ordem de 60%.

As características do aditivo cristalizante são apresentadas na Tabela 7 e a composição química aproximada, fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 8.

Tabela 7 – Características do aditivo cristalizante

Característica	Descrição
Aspecto (estado físico, forma e cor)	Sólido (pó), cinza
Odor e limite de odor	Característico de cimento
pH	10 – 13 (10% em solução)
Ponto de fusão	> 1000 °C
Dosagem em relação à massa de cimento	1%
<sup>5</sup> Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,75
<sup>5</sup> Área específica – B.E.T. (m <sup>2</sup> /g)	1,87

<sup>5</sup> Valores obtidos pela autora

Fonte: Ficha Técnica de Produto – FT 004 fornecida pelo fabricante (2021).

Tabela 8 - Composição química do aditivo cristalizante

Parâmetro químico	Teor (%)	Parâmetro químico	Teor (%)
Cimento Portland	65 a 80	<sup>5</sup> K <sub>2</sub> O	0,99
<sup>1</sup> CTS-15-1	10 a 30	<sup>5</sup> Cl	007
<sup>1</sup> CTS-15-2	5 a 10	<sup>5</sup> SO <sub>3</sub>	3,26
<sup>2</sup> CaMg(OH) <sub>4</sub>	1,5 a 6	<sup>5</sup> MnO	0,07
<sup>3</sup> Ca(Mg(OH) <sub>2</sub> O	1,5 a 6	<sup>5</sup> TiO <sub>2</sub>	0,22
<sup>4</sup> Ca(OH) <sub>2</sub>	1 a 2	<sup>5</sup> V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
<sup>5</sup> SiO <sub>2</sub>	11,51	<sup>5</sup> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<L.D
<sup>5</sup> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,94	<sup>5</sup> ZnO	0,03
<sup>5</sup> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,49	<sup>5</sup> SrO	0,16
<sup>5</sup> CaO	54,83	<sup>5</sup> ZnO <sub>2</sub>	<L.D
<sup>5</sup> MgO	3,98	<sup>5</sup> LOI	19,42
<sup>5</sup> Na <sub>2</sub> O	N.D.		

<sup>1</sup>A concentração exata do composto é segredo industrial; <sup>2</sup>Hidróxido de cálcio e magnésio; <sup>3</sup>Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio; <sup>4</sup>Hidróxido de cálcio; <sup>5</sup> Valores obtidos pela autora

Fonte: adaptado da Ficha técnica do produto (2023)

### 3.2.4 Água

A água utilizada na pesquisa é proveniente da rede de abastecimento público do município de São Leopoldo, fornecida pela Companhia de Serviço Saneamento de Água e Esgoto (SEMAE), responsável pelo controle e distribuição. A água foi utilizada em temperatura ambiente.

## 3.3 MÉTODOS

A seguir são descritos os métodos utilizados no trabalho, tanto para a produção de concreto e corpos de prova, para indução das fissuras, como os empregados para avaliar os concretos em estudo.

### 3.3.1 Indução de Abertura das Fissuras

Para obter-se fissuras em corpos de concreto, induzidas conforme explicação apresentada na continuidade desse item, optou-se por adotar corpos de prova prismáticos, uma vez que essa permite a indução da fissuração de forma controlada, sem que ocorra a ruptura completa do elemento devido aos esforços aplicados. Assim, a partir de prismas de concreto de dimensões 6 cm x 6 cm x 18 cm, cortados ao meio com máquina de corte com disco diamantado (Figura 9), obteve-se os corpos de prova com geometria 6 x 6 x 9 cm que foram empregados o estudo de autocatrização de fissuras.

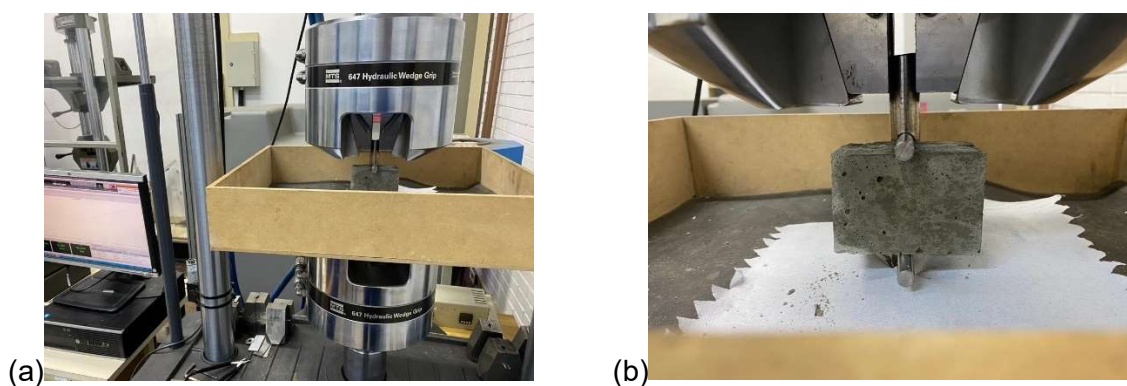
Figura 9 – Serra circular de bancada com disco diamantado



Fonte: Registrada pela autora.

Para se proceder a indução de aberturas de fissuras adotou-se o mecanismo de aplicação de cargas, apresentado por Ferrara *et al.* (2018), associado à técnica praticada pelo Grupo Autocicatrização do NORIE/UFRGS (2020). Assim, foram utilizadas duas barras de aço de 5 mm, posicionadas na direção do centro do eixo longitudinal do corpo de prova (Figura 10). O carregamento foi aplicado de maneira constante e lenta, o qual era cessado quando havia queda de carga, relacionada à formação de fissura, associado a controle visual. Empregando técnica similar, Roig-Flores *et al.* (2015) relataram aberturas entre 0 e 0,3 mm, e Suleiman e Nehdi (2018) obtiveram aberturas entre 0,05 e 0,5 mm. Adotou-se a idade de 3 dias para proceder indução de fissuras nos corpos de prova, sendo, na sequência, imersos totalmente em água até a data dos ensaios.

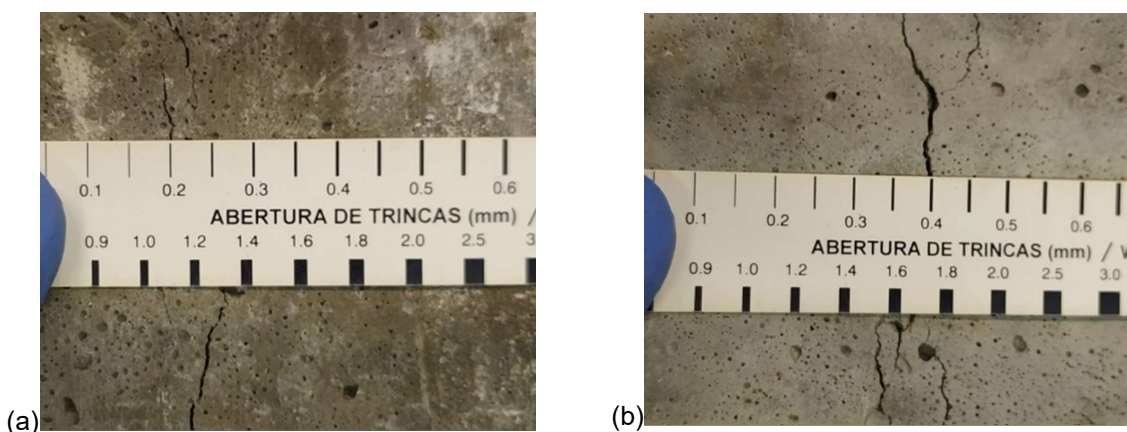
Figura 10 – Indução de fissuras: (a) vista geral e (b) detalhe



Fonte: Registrada pela autora.

Na sequência fez-se uma análise expedita da abertura das fissuras geradas, empregando-se uma escala de abertura de fissuras (Figura 11). Eliminou-se do escopo de análise aquelas fissuras que apresentavam aberturas superiores a 0,4 mm.

Figura 11 – Medidas com escala: fissura (a) com 0,2 mm e (b) com 0,4 mm



Fonte: Registrada pela autora.

### 3.3.2 Métodos de ensaio

A seguir são apresentados os ensaios que foram realizados ao longo do presente trabalho para avaliação de autocicatrização.

#### a) Resistência à compressão axial

De maneira a caracterizar os concretos estudados, foi realizado ensaio de resistência à compressão axial, de acordo com a ABNT NBR 5739:2019. Procedeu-se cura úmida submersa em solução saturada de cal, a partir de 1 dia, por 27 dias. Empregou-se 3 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, para cada combinações de variáveis de controle, retificados. Os ensaios foram executados em máquina para ensaios mecânicos, com capacidade máxima de 1000 kN.

#### b) Determinação da Absorção de Água por Capilaridade

Como forma de analisar indiretamente a porosidade dos concretos estudados, propôs-se a realização do ensaio de absorção por capilaridade segundo o procedimento adaptado de RILEM TC 116 PCD (1999), com tempos de leitura nos períodos de 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h e 96 h. Os ensaios foram realizados sob condições controladas, com  $23 \pm 2$  °C de temperatura, na idade de 84 dias. Para cada combinação de variáveis foram utilizadas 3 amostras cilíndricas com diâmetro de 100 mm e altura de 50 mm. Essas amostras foram obtidas a partir da moldagem de um único corpo de prova de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após remover fatias de aproximadamente 25 mm do topo e da base do corpo de prova, a porção restante foi dividida em 3 partes. Na sequência, as amostras foram levadas à estufa para secagem até sua constância de massa (diferença igual ou inferior a 1% entre duas medidas consecutivas em intervalo de 24 horas, quando, após resfriamento foram medidas em relação à altura, diâmetro e massa inicial. A preparação das amostras foi finalizada com a impermeabilização da superfície relativa à altura das fatias, envolvendo-as com fita de alta adesão, e cobrindo o topo com material flexível não aderente, garantindo que as amostras não sofreriam influência da absorção de água do ambiente. A Figura 12 apresenta um lote de amostras do ensaio em andamento.

Figura 12 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

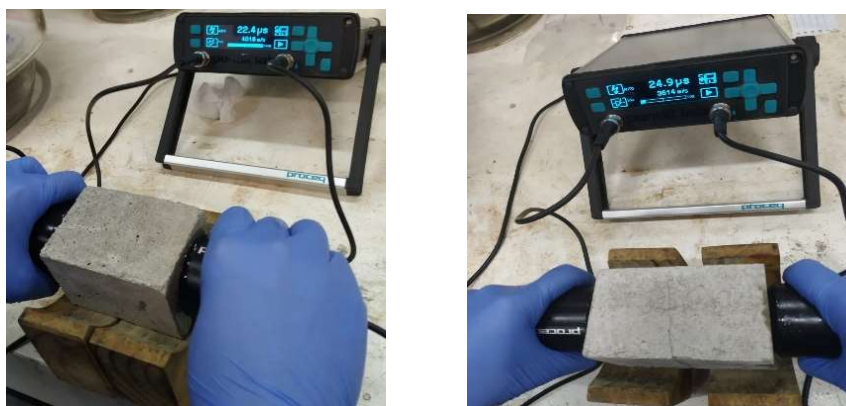


Fonte: Registrada pela autora.

### c) Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

A medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPOU) foi adotada para verificar, de forma indireta, a estanqueidade nos corpos de prova fissurados e não fissurados, ao longo do tempo, e assim determinar a ocorrência de autocicatrização. Trata-se de um método não destrutivo, especificado pela ABNT NBR 8802:2019, e tem a finalidade de comparar a homogeneidade de concretos e detectar eventuais falhas. O método faz uso de ondas mecânicas, que não causam danos ao concreto, de modo que um corpo de prova pode ser testado repetidamente durante um longo período de tempo. Para a determinação da VPOU, foi utilizado o aparelho de ultrassom da marca PROCEQ, modelo Pundit Lab, com frequência de transmissão/recepção de 54 kHz, conforme ilustra a Figura 13, no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

Figura 13 – Medida da velocidade de propagação de onda ultrassônica



(a) Corpo de prova não fissurado

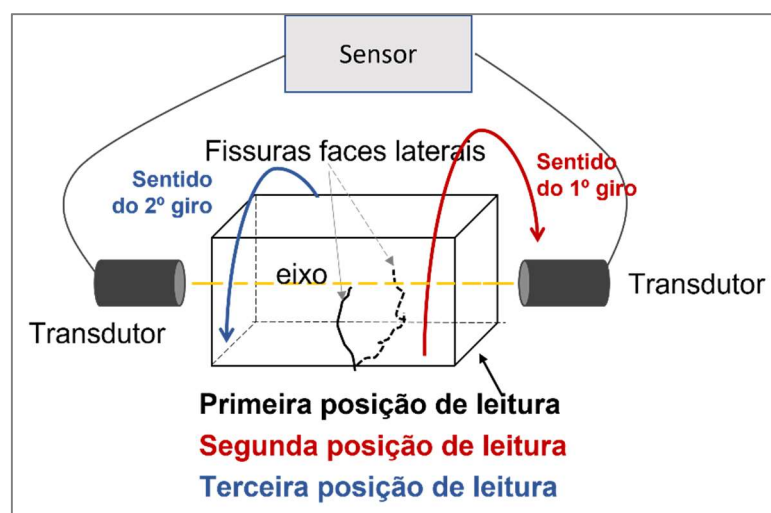
(b) Corpo de prova fissurado

Fonte: Registrada pela autora.

Foram ensaiados os corpos de prova fissurados e os não fissurados. As medições ao longo do tempo foram realizadas sempre e nos mesmos pontos nos dos corpos de prova. Procedeu-se a leitura de VPOU imediatamente antes da indução da fissura e após a fissuração, considerando essa última como a leitura de referência para avaliar a presença e evolução da autocicatrização. Foram realizadas novas leituras nas idades 3, 14, 28, 56 e 84 dias, para acompanhamento e detecção de possível autocicatrização. Após cada leitura os corpos de prova foram acondicionados em seus respectivos ambientes de exposição.

As leituras de VPOU foram executadas no sentido eixo longitudinal do corpo de prova, posicionando-se os transdutores sempre no mesmo ponto das faces perpendiculares ao eixo. Em cada corpo de prova foram realizadas três leituras de VPOU: a primeira leitura com o corpo de prova posicionado com a face oposta de aplicação de carga para baixo. Nas demais leituras girou-se o corpo de prova em 90° duas vezes, em sentidos opostos. A Figura 14 apresenta esquematicamente as posições de leitura do corpo de prova. A VPOU corresponde à média das três leituras.

Figura 14 – Esquema de posição do corpo de prova para leitura de VPOU



Fonte: Elaborado pela autora.

Antes da realização dos ensaios, removia-se, onde seriam posicionados os transdutores, a umidade superficial dos corpos de prova com um pano umedecido. Ao final, removia-se completamente da superfície do corpo de prova o gel de contato.

#### **d) Resistência à compressão de Corpos de prova prismáticos**

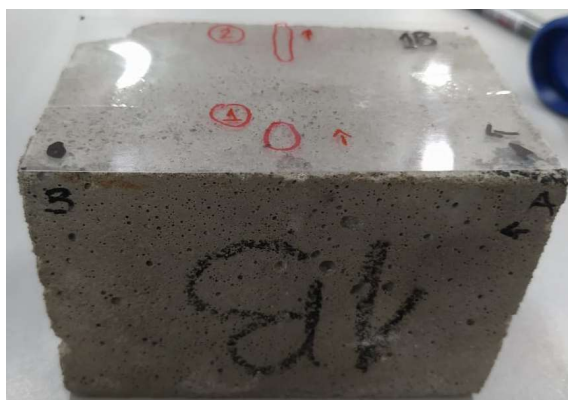
Uma das formas de avaliar a autocicatrização é determinar a taxa de recuperação de resistência, comparando-se as resistências médias de corpos de

prova fissurados-cicatrizados com corpos de prova íntegros. Para isso, foi executado ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos empregados no ensaio de propagação de onda ultrassônica, ao findar o período estabelecido de monitoramento da evolução da VPOU, ou seja, aos 84 dias de idade. A área de aplicação de carga foi definida colocando o corpo de prova entre duas placas de aço, sobre a região fissurada, com o CP deitado. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica Controls, modelo C80/ES, Classe I, com capacidade de 2000 kN.

#### **e) Análise de imagem das fissuras obtidas com estereomicroscópio**

Para proceder uma análise visual quantitativa da taxa de cicatrização das fissuras, e tendo em vista o volume de análises realizados, as imagens foram obtidas após geração das fissuras aos 3 dias de idade dos concretos e aos 84 dias, a idade final de análise. As imagens das fissuras foram obtidas em estereomicroscópio (lupa) da marca Zeiss, modelo Stemi DV4, sob a luz refletida, com ocular padrão de 10x/20 e lente frontal 1,6x que proporcionam ampliações entre 12,8x e 51,2x. Para garantir a obtenção de imagem dos mesmos pontos, nos quais foram medidas as aberturas da fissura, em ambas idades, empregou-se um gabarito, constituído por lâmina filme de poliéster, nas dimensões dos corpos de prova. Marcações na lâmina e no corpo de prova (Figura 15) constituíram pontos de referência coincidentes. As imagens foram obtidas em câmera de 64 MP, com resolução de 2400x1080 pixels, acopladas ao estereomicroscópio (Figura 16), com ampliação de 51,2x.

Figura 15 – Marcação das fissuras no CP



Fonte: Registrada pela autora.

Figura 16 – Lupa com câmera

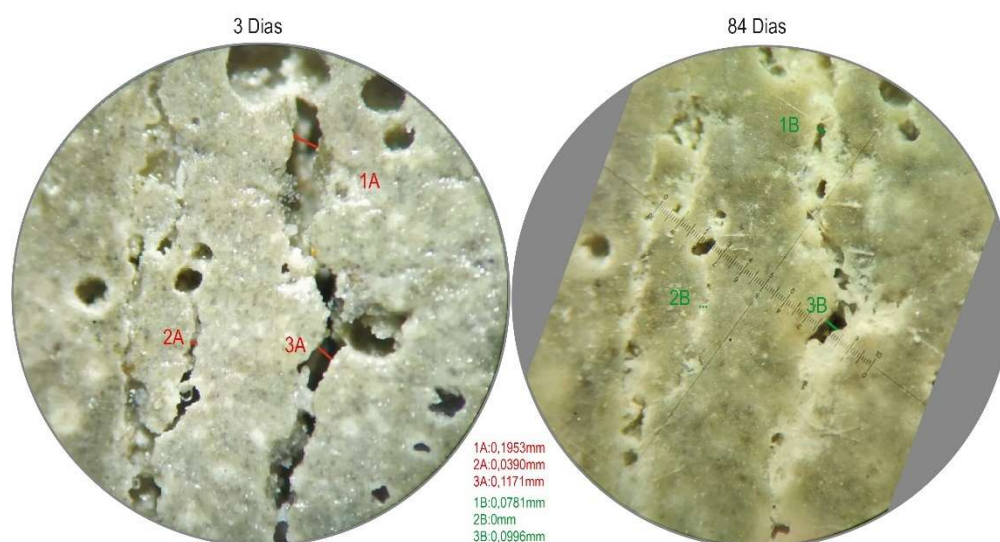


Fonte: Registrada pela autora.

Para posterior conversão de escala de ampliação, referente a cada magnificação aplicada, ao registrar as imagens, foi tomado cuidado para capturar

também a escala de referência do equipamento. O comprimento de referência equivalente à ampliação real obtida por uma magnificação de 51,2x mede 1,953 mm, e o retículo está dividido em 100 partes. Foram medidos 3 pontos previamente selecionados nas fissuras de cada corpo de prova (Figura 17). As imagens obtidas foram analisadas com emprego do programa de edição de imagens vetoriais Adobe Illustrator. Para estimar o tamanho da fissura, foi verificado quantas partes do retículo cada ponto analisado ocupava e esse valor foi dividido pelo zoom que esteve sempre configurado em 51,2x.

Figura 17 – Exemplos de posição de pontos de medida da abertura das fissuras



Fonte: Elaborada pela autora.

#### f) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O ensaio de MEV foi realizado no Centro de Microscopia e Microanálises da Pontifícia Universidade do Rio Grande do Sul, em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo INSPECT F50. As amostras foram deixadas por uma semana em dessecador. Após este período, foram metalizadas por um filme de ouro (Figura 18) através de uma técnica de deposição de íons (Sputter Coater). As amostras foram retiradas dos corpos de prova fissurados conforme (Figura 19).



Figura 18 – Metalização das amostras



Fonte: Registrada pela autora.

Figura 19 – Amostras metalizadas.



Fonte: Registrada pela autora.

Foram tomadas imagens com 1000x, 2000x, 5000x, 10.000x e 40.000x. Essa caracterização foi realizada para avaliar os produtos de hidratação das composições de cimento, com e sem aditivo cristalizante.

### 3.3.3 Produção dos concretos

A dosagem experimental do concreto foi realizada com base no método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), empregando-se três traços com quantidade de agregados 1: m de 3,5; 5,0 e 6,5, e o CP V-ARI adotado nesse estudo. Estipulou-se uma classe de trabalhabilidade S160, adotando-se para controle do ajuste dos traços um abatimento de tronco-cone de  $200 \pm 20$  mm, o que resultou na adoção de um teor de argamassa de 56%. O detalhamento da dosagem é apresentado na Tabela 9 e na Tabela 10, bem como no diagrama de dosagem da Figura 20.

Tabela 9 – Dosagem - traços unitários, consumos de materiais e consistência

m	Traço unitário				Materiais utilizados na mistura				Abatimento (mm)
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Aditivo (g)	
3,5	1	1,52	1,98	0,40	10,10	15,35	20,00	22,90	205
5	1	2,36	2,64	0,47	7,58	17,88	20,00	19,85	200
6,5	1	3,20	3,30	0,64	6,06	19,39	20,00	8,29	190

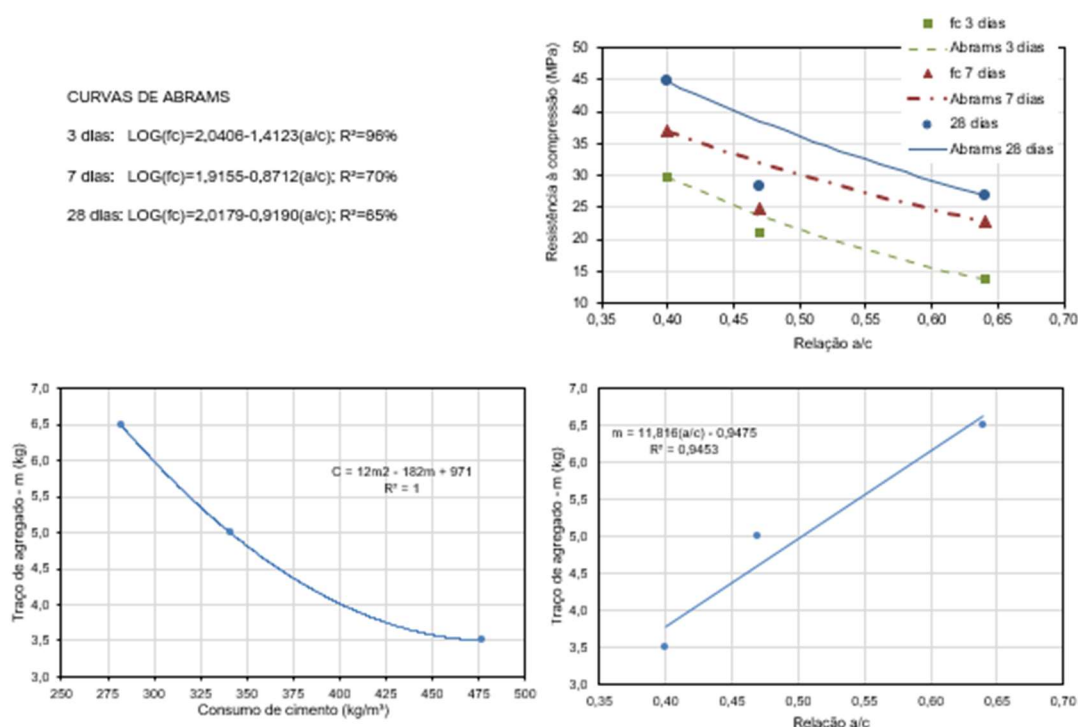
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10 – Dados empregados para elaboração do diagrama de dosagem

Traço unitário (1:m) (kg/kg)	Relação a/c	fc28 potencial (MPa)	Consumo cimento (kg/m³)
1:3,5	0,40	44,7	477
1:5,0	0,47	28,2	341
1:6,5	0,64	26,9	282

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20 – Diagrama resultante da dosagem experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da curva de dosagem, estabelece-se os traços empregados neste trabalho, com as relações água/cimento fixadas em 0,40; 0,50 e 0,60. Nos traços com MCS, 45% do cimento CP V-ARI foi substituído, em massa, por 30% de metacaulim, ou cinza volante, e 15% de fíler calcário. O cimento Portland CPV-ARI foi utilizado como referência, e a influência dos MCS foi estudada com o seu emprego compondo cimentos ternários: um cimento tipo LC<sup>3</sup>, constituído por CP V-ARI, fíler calcário e metacaulim; e o cimento FCV, composto por CP V-ARI, cinza volante e fíler calcário.

Deve ser observado que o CP V-ARI pode apresentar até 10% de material carbonático em sua composição, ou 4,4% de perda ao fogo relativo à decomposição dos carbonatos. A caracterização de perda ao fogo do CP V-ARI empregado foi de 6,66%, indicando que o cimento pode ter em torno de 10% de fíler carbonático, além de um teor relativo à uma provável pré-hidratação e/ou carbonatação. Assim, a fração de 55% de cimento CP-ARI pode conter em torno de 2,4% de material carbonático, o que faz com que o teor real de material carbonático das misturas seja maior do que 15%. Por isso, destaca-se que a composição com MK é “tipo” LC<sup>3</sup>, pois de fato extrapola os 15% de material carbonático estabelecido para esse cimento. Na Tabela 11 apresenta-se a sigla para identificar os traços de concreto, tendo em vista a sua

composição. O traço unitário, a quantidade de materiais empregados e o consumo teórico de cimento são informados na Tabela 12.

Tabela 11 - Sigla dos traços desenvolvidos

<b>Traço</b>	<b>a/c</b>	<b>Cimento (CP V-ARI)</b>	<b>Metacaulim (MK)</b>	<b>Cinza volante (CV)</b>	<b>Fíler calcário (F)</b>	<b>Aditivo cristalizante (CR)</b>
CPV-040	0,40	100%	-	-	-	-
CPVCR-040	0,40	100%	-	-	-	1%
LC <sup>3</sup> -040	0,40	55%	30%	-	15%-	-
LC <sup>3</sup> CR-040	0,40	55%	30%	-	15%	1%
FCV-040	0,40	55%	-	30%	15%	-
FCVCR-040	0,40	55%	-	30%	15%	1%
CPV-050	0,50	100%	-	-	-	-
CPVCR-050	0,50	100%	-	-	-	1%
LC <sup>3</sup> -050	0,50	55%	30%	-	15%	-
LC <sup>3</sup> CR-050	0,50	55%	30%	-	15%	1%
FCV-050	0,50	55%	-	30%	15%	-
FCVCR-050	0,50	55%	-	30%	15%	1%
CPV-060	0,60	100%	-	-	-	-
CPVCR-060	0,60	100%	-	-	-	1%
LC <sup>3</sup> -060	0,60	55%	30%	-	15%	-
LC <sup>3</sup> CR-060	0,60	55%	30%	-	15%	1%
FCV-060	0,60	55%	-	30%	15%	-
FCVR-060	0,60	55%	-	30%	15%	1%

Tabela 12 – Quantitativo empregado na produção das amostras

TRAÇO	Cimento	Areia	Brita	a/c	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Cimento (kg)	Filler Calcário (kg)	Metacaulim (kg)	Cinza Volante (kg)	CR Cristalizante (g)	Aditivo (g)	Água total (kg)	SLUMP (mm)	Consumo cimento (kg/m <sup>3</sup> )
CPV-040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	-	-	-	-	-	14,56	4,18	210	464
CPV-050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	-	-	-	-	-	8,13	4,20	200	357
CPV-060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	-	-	-	-	-	9,54	4,22	210	288
CPVCR-040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	-	-	-	-	95,09	22,08	4,18	190	432
CPVCR-050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	-	-	-	-	76,27	18,45	4,20	190	362
CPVCR-060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	-	-	-	-	63,66	4,20	4,22	200	296
LC <sup>3</sup> CR-040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	5,23	1,43	2,85	-	95,09	75,34	2,47	200	461
LC <sup>3</sup> CR-050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	4,19	1,14	2,29	-	76,27	47,39	2,49	200	364
LC <sup>3</sup> CR-060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	3,50	0,95	1,91	-	63,66	35,70	2,50	200	284
LC <sup>3</sup> -040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	5,23	1,43	2,85	-	-	39,71	2,47	210	457
LC <sup>3</sup> -050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	4,19	1,14	2,29	-	-	51,22	2,49	200	336
LC <sup>3</sup> -060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	3,50	0,95	1,91	-	-	5,28	2,50	210	279
FCV-040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	5,23	1,43	-	2,85	-	25,44	2,47	220	420
FCV-050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	4,19	1,14	-	2,29	-	13,33	2,49	210	348
FCV-060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	3,50	0,95	-	1,91	-	8,12	2,50	200	291
FCVCR-040	1	1,68	2,10	0,40	9,51	15,95	20,00	20,00	15,95	20,00	5,23	1,43	-	2,85	-	29,25	2,47	200	437
FCVCR-050	1	2,34	2,62	0,50	7,63	17,83	20,00	20,00	17,83	20,00	4,19	1,14	-	2,29	-	40,71	2,49	210	338
FCVCR-060	1	3,00	3,14	0,60	6,37	19,09	20,00	20,00	19,09	20,00	3,50	0,95	-	1,91	-	16,39	2,50	200	294

Fonte: Elaborado pela autora.

Para execução dos concretos, foi utilizada uma betoneira de eixo vertical, fabricada pela empresa *ELE International Limited*, modelo 34-3530, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 5738:2015, tendo capacidade para 56 L. A sequência de mistura foi: 100% do agregado graúdo e  $\pm 1/3$  da água de amassamento, com o acionamento da betoneira por 15s; incorporação do cimento e, quando era o caso, os MCS e o aditivo cristalizante, e o segundo  $1/3$  da água, e mistura por mais 45 segundos; inserção do agregado miúdo e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 2 minutos. O aditivo superplastificante foi adicionado para ajustar o abatimento de tronco de cone, que foi executado conforme ABNT NBR 16889:2020. Na Figura 21 é possível observar o ensaio de abatimento de tronco de cone, bem como o aspecto visual do concreto fresco.

Figura 21 – Ensaio de abatimento (a) e aspecto visual (b) do concreto fresco















Fonte: Registrada pela autora.

A massa específica do concreto fresco foi determinada seguindo o método preconizado pela ABNT NBR 9833:2009. A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada com duas camadas de 12 golpes, e os corpos de prova prismático, medindo 6 x 6 x 18 cm, com duas camadas de 35 golpes, seguindo a NBR 5738 (ABNT 2015).

No Quadro 5 apresenta-se um resumo dos corpos de prova produzidos, com as nomenclaturas, o número de exemplares estabelecidos para cada combinação de variáveis independentes, relacionando-os aos métodos de ensaio.

Quadro 5 – Quantificação dos corpos de prova

Item	ENSAIOS	Idade do ensaio	CP's: corpos de prova		Descrição da nomenclatura do concreto e número de unidades experimentais																	
					CPV		CPVCR		LC <sup>3</sup>		LC <sup>3</sup> CR		FCV		FCVCR							
					Relação a/c																	
				0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60				
1	Resistência à compressão axial	28 dias			Íntegros	Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
						3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
2	Ensaio de absorção por capilaridade	84 dias			Íntegros	Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
Total por ensaio corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm)						3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			
						12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12				
4	Recuperação das propriedades mecânicas	28 dias 56 dias 84 dias			Íntegros	Nomenclatura do experimento																
						18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
8	Velocidade de propagação de ondas ultrassônica	3 dias 14 dias 28 dias 56 dias 84 dias			Íntegros	Nomenclatura do experimento																
						-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
7	Análise Estereomicroscópio	3 dias 84 dias			Fissurados	Nomenclatura do experimento																
						-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
9	Análise microscópio eletrônico de varredura (MEV)	84 dias			Fissurados	Nomenclatura do experimento																
						-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
						Nº de unidades experimentais (Corpos de prova)																
Total CP prismáticos (4x4x8 cm)						54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54				
TOTAL GERAL						396																

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a moldagem, os corpos de prova ficaram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 h para corpos de prova cilíndricos e 48 h para corpos de prova prismáticos para cura inicial, cobertos com vidro, para evitar perda de água. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida submersos em água saturada com cal, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 9479:2006, onde permaneceram até as datas dos respectivos ensaios.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no estudo. São discutidos tanto os resultados da caracterização dos concretos, como os resultados dos ensaios para verificação da autocicatrização das fissuras, permitindo avaliar a influência dos MCS e do aditivo cristalizante nos concretos produzidos, bem como o consumo de cimento em função dos traços.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão dos concretos foi executado com o objetivo de verificar se a utilização do aditivo cristalizante e dos MCS pode exercer alguma influência nessa propriedade na idade de 28 dias. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 13, e as médias foram adquiridas através da ruptura de três corpos de prova.

Tabela 13 – Resistência à compressão aos 28 dias

Traço	Relação a/c	Média 28 dias (MPa)	Desv. padrão (Mpa)	Coef. de variação (%)
CPV	0,40	40,33	0,948	2,35%
	0,50	31,51	0,490	1,56%
	0,60	24,68	0,343	1,39%
CPVCR	0,40	32,98	0,588	1,78%
	0,50	30,52	0,639	2,09%
	0,60	27,44	0,949	3,46%
LC <sup>3</sup>	0,40	54,10	0,491	0,91%
	0,50	25,50	0,708	2,77%
	0,60	21,77	0,555	2,55%
LC <sup>3</sup> CR	0,40	58,55	0,658	1,12%
	0,50	40,93	0,407	1,00%
	0,60	24,11	0,636	2,64%
FCV	0,40	23,59	0,557	2,36%
	0,50	17,42	0,311	1,79%
	0,60	11,65	0,277	2,38%
FCVCR	0,40	32,62	0,883	2,71%
	0,50	14,03	0,342	2,44%
	0,60	11,05	0,390	3,53%

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos estudados apresentaram baixos coeficientes de variação, menores que 4%. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos a partir da análise de variância do conjunto de dados. Todos os efeitos, tanto das variáveis isoladas ou quanto das interações, apresentam efeito estatisticamente significativos.

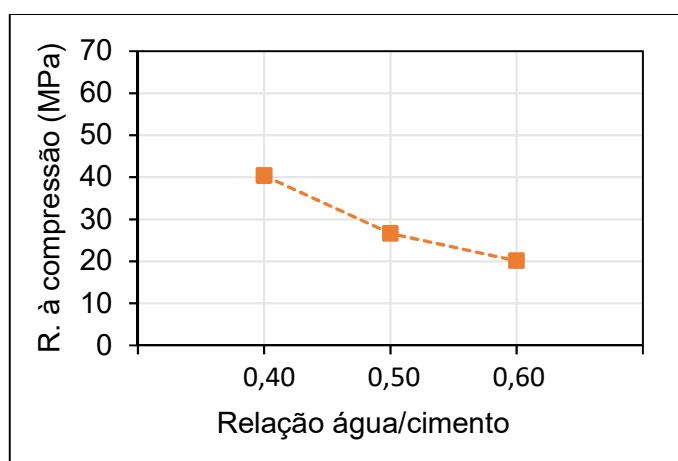
Tabela 14 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor de P	Efeito significativo
Tipo de cimento	3413,36	2	1706,68	4728,8	0,000000	Sim
Aditivo Cristalizante	78,40	1		217,2	0,000000	Sim
Relação a/c	3843,32	2	1921,66	5324,5	0,000000	Sim
Cimento X Cristalizante	196,80	2	98,40	272,6	0,000000	Sim
Cimento X a/c	908,01	4	227,00	629,0	0,000000	Sim
Cristalizante X a/c	11,67	2	78,40	16,2	0,000010	Sim
Cim X Crist X a/c	342,04	4	85,51	236,9	0,000000	Sim
Erro	12,99	36	0,36			

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados, quanto à relação água/cimento, apresentaram o desempenho esperado, ou seja, a resistência diminui à medida que a relação a/c aumenta. No gráfico de médias da Figura 22 é possível observar o efeito isolado da variável de controle “relação água/cimento” no comportamento dos concretos. A variabilidade foi maior nas resistências mais elevadas, conferidas pela relação a/c 0,40, em função da diferença na ordem de 35 MPa que ocorre entre as resistências obtidas para LC<sup>3</sup>CR e FCV, maior e menor média do conjunto analisado.

Figura 22 – Efeito isolado da variável de controle “relação água/cimento” na resistência à compressão



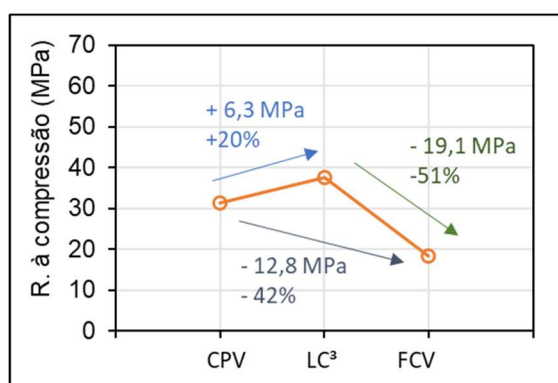
Fonte: Elaborado pela autora

Verifica-se que os concretos produzidos com LC<sup>3</sup>, contendo metacaulim, tem desempenho superior quando comparado aos concretos produzidos com os demais cimentos. A Figura 23 apresenta o gráfico de médias isolando-se a variável de controle “cimento”. Os concretos com LC<sup>3</sup> apresentaram um desempenho significativamente superior, conforme a ANOVA, na ordem de 20 e 51% comparando-se respectivamente com concretos CPV e FCV. A diferença, de 6,3 MPa maior que o CPV e 19,1 MPa que



o FCV, também indica uma diferença tecnicamente significativa. Observou-se que os traços com cinza volante, de forma geral, apresentaram as menores resistências em comparação com os outros traços com a mesma relação água/cimento. De acordo com Venquiaruto (2002), a presença dessa pozolana resulta em uma evolução mais lenta das resistências mecânicas iniciais e menor alcalinidade devido ao consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas.

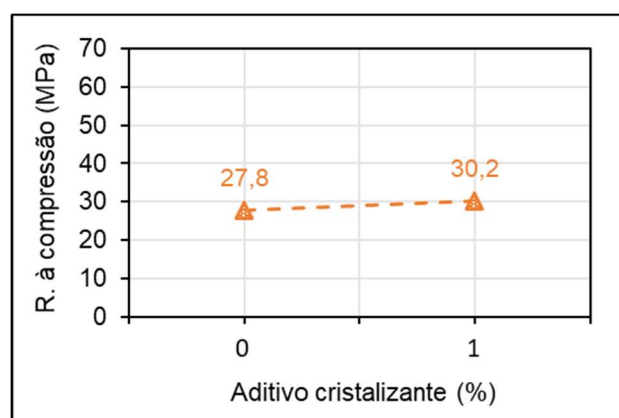
Figura 23 - Efeito isolado da variável de controle “cimento” na resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora

O efeito isolado da variável controle “aditivo cristalizante” é apresentado no gráfico de médias da Figura 24. A ANOVA indicou o efeito isolado do aditivo cristalizante estatisticamente significativo. No entanto, comparando-se a média de resistência à compressão de todos os concretos sem aditivo cristalizante com as médias dos concretos com o aditivo, não parece haver diferença em termos técnicos significativa de comportamento.

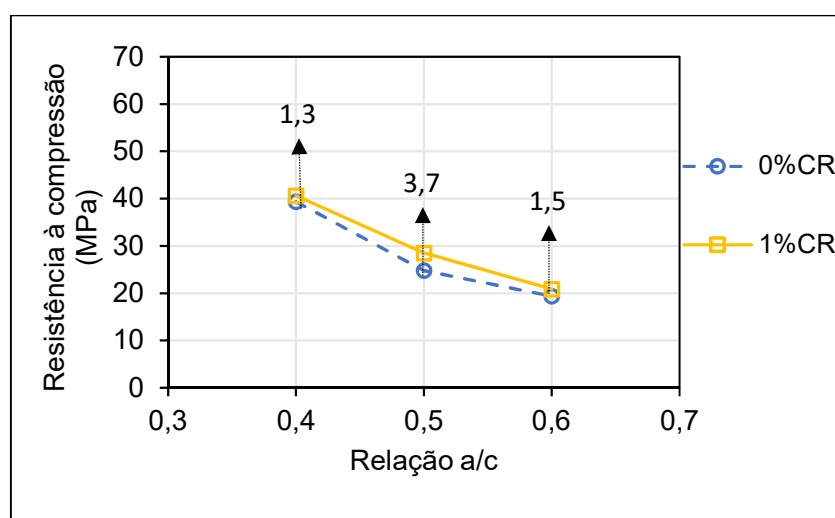
Figura 24 - Efeito isolado da variável de controle “aditivo cristalizante” na resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora

O efeito da interação entre relação a/c e aditivo cristalizante e “relação a/c” na resistência pode ser observado no gráfico de médias da Figura 25. Percebe-se que a tendência de comportamento dos concretos, com e sem aditivo é a mesma, ou seja, à medida que se aumenta a relação a/c, a tendência de comportamento é a mesma na diminuição da resistência à compressão. Contudo, os concretos com relação a/c 0,5 com aditivo cristalizante mostraram o dobro de aumento da resistência, quando comparado com as demais relações a/c.

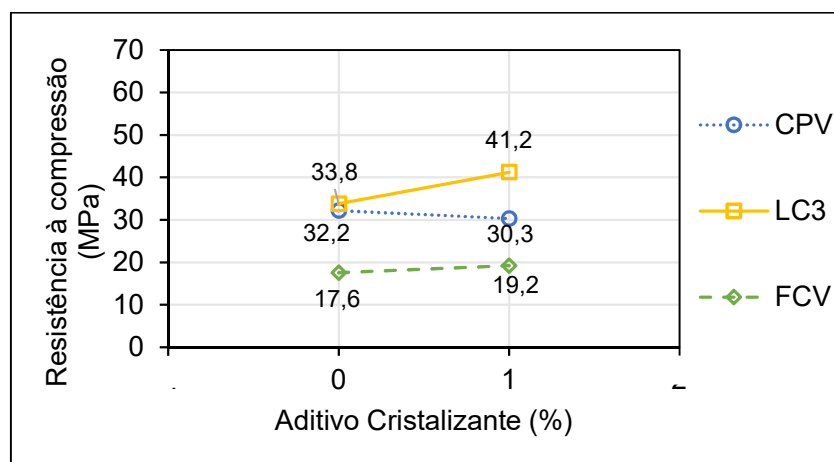
Figura 25 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “aditivo cristalizante” e “relação a/c” na resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora

O emprego do aditivo cristalizante contribui de forma significativa para o incremento da propriedade de resistência à compressão somente em alguns traços. Nesta pesquisa, as dosagens de concreto produzidas com aditivo cristalizante obtiveram uma resistência à compressão maior no concreto LC<sup>3</sup>CR quando comparadas às demais, como pode ser observado no gráfico de médias da Figura 26, que apresenta o efeito da interação entre aditivo cristalizante e tipo de cimento.

Figura 26 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “aditivo cristalizante” e “tipo de cimento” na resistência à compressão

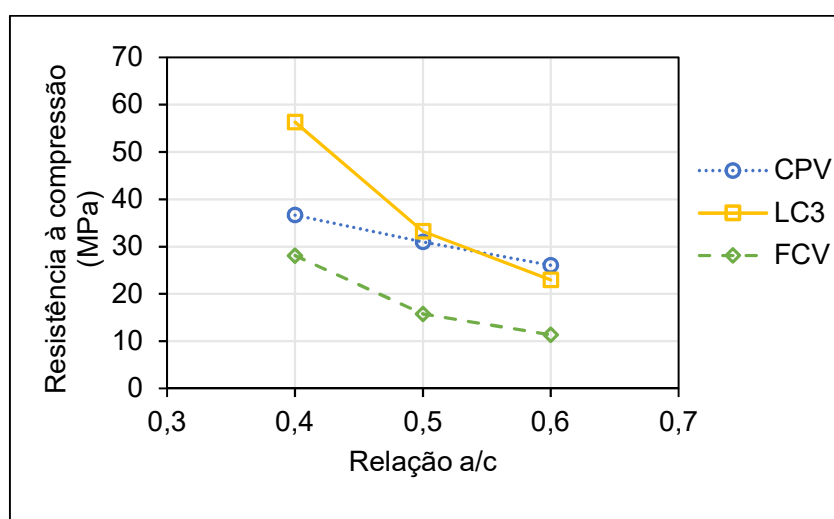


Fonte: Elaborado pela autora

Enquanto a adição do cristalizante nos concretos com cinza volante levaram a um aumento médio de 1,6 MPa, correspondendo à 9% de aumento de resistência, nos concretos com LC<sup>3</sup> esse aumento foi de 22%, representando um aumento de 7,4 MPa. Em analogia à classificação dos concretos quanto à classe de resistência, cujos níveis variam a cada 5 MPa, esse aumento corresponderia a mudança de uma classe C30 para uma classe C40.

O gráfico da Figura 27 apresenta as médias de resistência à compressão quando analisado o efeito da interação entre as variáveis de controle “relação a/c” e “tipo de cimento”.

Figura 27 - Efeito da interação entre as variáveis de controle “relação a/c” e “tipo de cimento” na resistência à compressão



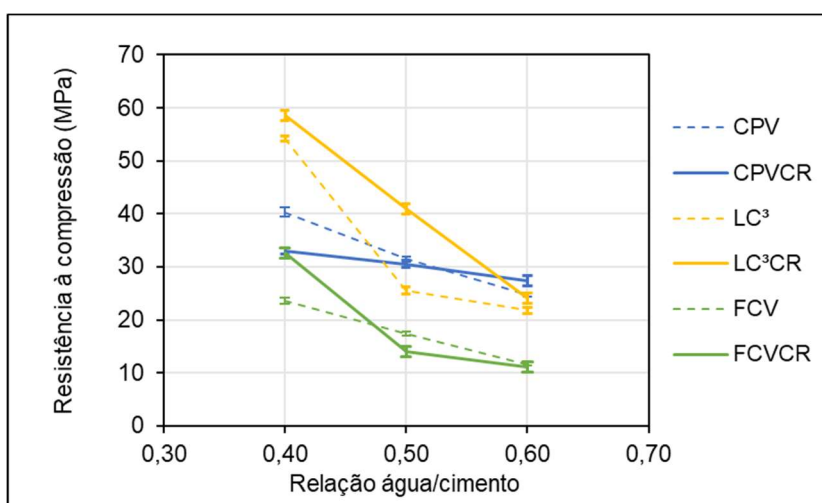
Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que as dosagens produzidas com a relação a/c 0,60 alcançaram valores de resistência à compressão mais baixos dos traços. Conforme esperado, os concretos com maiores relações a/c geram menores resistências à compressão. Analisando-se a interação entre tipo de cimento e relação a/c, percebe-se que, enquanto a variação de resistência entre a relação a/c 0,40 e a 0,60 é na ordem de 30%, nos concretos MCS ativos e fíler carbonático essa variação é na ordem de 60%.

Destaca-se ainda que, mesmo empregando os mesmos teores de pozolana e fíler, o cimento LC<sup>3</sup>, aos 28 dias, confere o dobro de resistência do que é obtido com o FCV. O somatório de sílica e alumina para o metacaulim, pozolana empregada no LC<sup>3</sup>, é de 89,2%, enquanto na cinza volante, componente do FCV, é de 84,6%, o que não retrata uma diferença significativa. No entanto, a diferença de finura, representada por d50 de 5,37 e 10,03  $\mu\text{m}$ , respectivamente para o metacaulim e a cinza volante, pode explicar o melhor desempenho do LC<sup>3</sup>. Além disso, esse melhor desempenho também pode ser explicado pelo aporte de alumina que cada pozolana confere ao sistema, sendo de 34,15% para o metacaulim e de 24,50% para a cinza volante, levando a uma maior reação com o fíler carbonático nos cimentos LC<sup>3</sup>. Uma terceira hipótese seria a maior ou menor presença de fase amorfa em cada uma das pozolanas. No entanto, esta caracterização não foi realizada, tendo em vista as delimitações do trabalho.

A Figura 28 apresenta o gráfico das médias de resistência à compressão obtidas no ensaio, podendo ser visualizado o efeito da interação das três variáveis de controle.

Figura 28 – Efeito da interação entre as três variáveis de controle na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias



Fonte: Elaborado pela autora.

A falta de “paralelismo” entre os segmentos das curvas retrata a o efeito significativo da interação entre tipo de cimento, cristalizante e a/c na resistência à compressão. Os traços que apresentaram as menores resistências à compressão foram os que utilizaram em sua composição a cinza volante, mesmo com a presença de filer carbonático que poderia estar formando mais fases AFm.

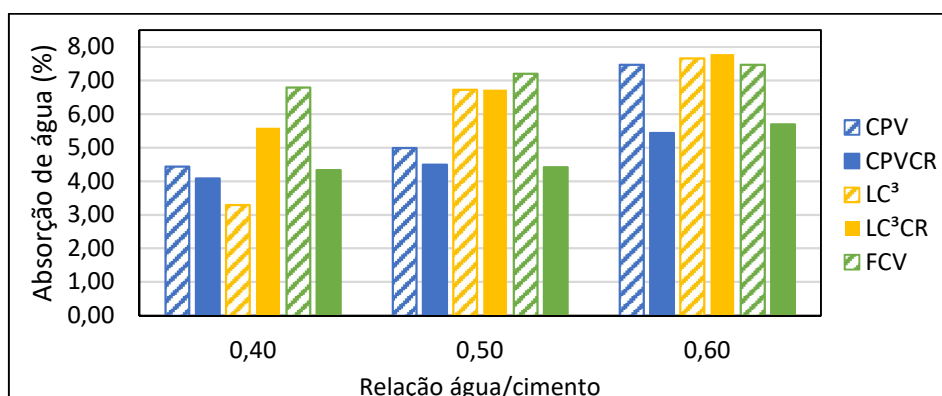
Os resultados também mostram que a adição do metacaulim com filer carbonático em substituição parcial do cimento Portland pode ser utilizado com intuito de reduzir custos e aumentar o desempenho mecânico de estruturas de concreto submetidas a esforços na compressão. Além disso, ocorre uma resistência superior no traço com LC<sup>3</sup>CR. Já os que mais apresentaram baixa resistência foram os traços FCV-060: 11,65 MPa e FCVCR-060: 11,05 MPa.

Comparando-se todas as dosagens, pode-se observar que os traços com LC<sup>3</sup>-0,40 e LC<sup>3</sup>CR-0,40 possuem uma resistência média à compressão muito superior quando comparada ao de referência com aditivo CPVCR-040. Pode-se observar que o traço com LC<sup>3</sup>-040 atingiu 54,10 MPa aos 28 dias, enquanto o traço de referência CPV-040 chegou a 40,33 MPa. O traço LC<sup>3</sup>CR-040 apresentou 58,55 MPa, possuindo a maior resistência entre os traços. No entanto, o traço FCV, contendo cinza volante apresentou a menor resistência de todos os traços comparados sem aditivo, somente tendo um aumento com adição do aditivo FCVCR-040.

## 4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados de Absorção de Água, apresentadas no gráfico da Figura 29, correspondem à média dos valores de absorção de água de concreto, ensaiados aos 84 dias de idade, após 72 horas de ensaio.

Figura 29 – Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral, conforme informações da Figura 29, verifica-se que os traços sem aditivo, apresentam valores de absorção capilar maiores que os demais que contém o aditivo, com exceção dos traços com LC<sup>3</sup>, possivelmente devido a uma maior densidade e compactação da microestrutura com esse cimento o aditivo não traz a mesma contribuição. Cappelleso *et al.* (2016) também constataram que o emprego do aditivo cristalizante reduz a absorção de água por capilaridade nos concretos, no entanto, a autora não trabalhou com LC<sup>3</sup>.

Como pode-se observar, os concretos, de todas as combinações de tipo de cimento e aditivo cristalizante, apresentaram uma relação direta entre os valores de relação a/c e absorção de água; ou seja, quanto menor a relação água/cimento, menor foi a absorção de água total média. Verificou-se o menor teor percentual de absorção de água nos concretos com o traço LC<sup>3</sup>-040, sendo menor até que o traço referência CPV-040. Também em relação aos traços com cimento tipo LC<sup>3</sup>, para as relações a/c 0,40 e 0,60 não há diferença relevante entre os concretos com e sem cristalizante.

Quando se empregou na composição do concreto o cimento FCV (cinza volante e filer calcário) associado ao aditivo cristalizante obteve-se, para todas as relações a/c, desempenho compatível com os concretos de traço CPVCR. Provavelmente ocorreu um tamponamento dos poros pela cinza volante potencializada pelo aditivo cristalizante. Contudo, isso não se refletiu na resistência, em função da forma de algumas partículas de CV, que são ocas.

Os resultados, quanto à relação água/cimento, apresentaram o desempenho esperado, ou seja, a resistência diminui à medida que a relação a/c aumenta. No gráfico de médias da Figura 22 é possível observar o efeito isolado da variável de controle “relação água/cimento” no comportamento dos concretos. A variabilidade foi maior nas resistências mais elevadas, conferidas pela relação a/c 0,40, em função da diferença na ordem de 35 MPa que ocorre entre as resistências obtidas para LC<sup>3</sup>CR e FCV, maior e menor média do conjunto analisado.

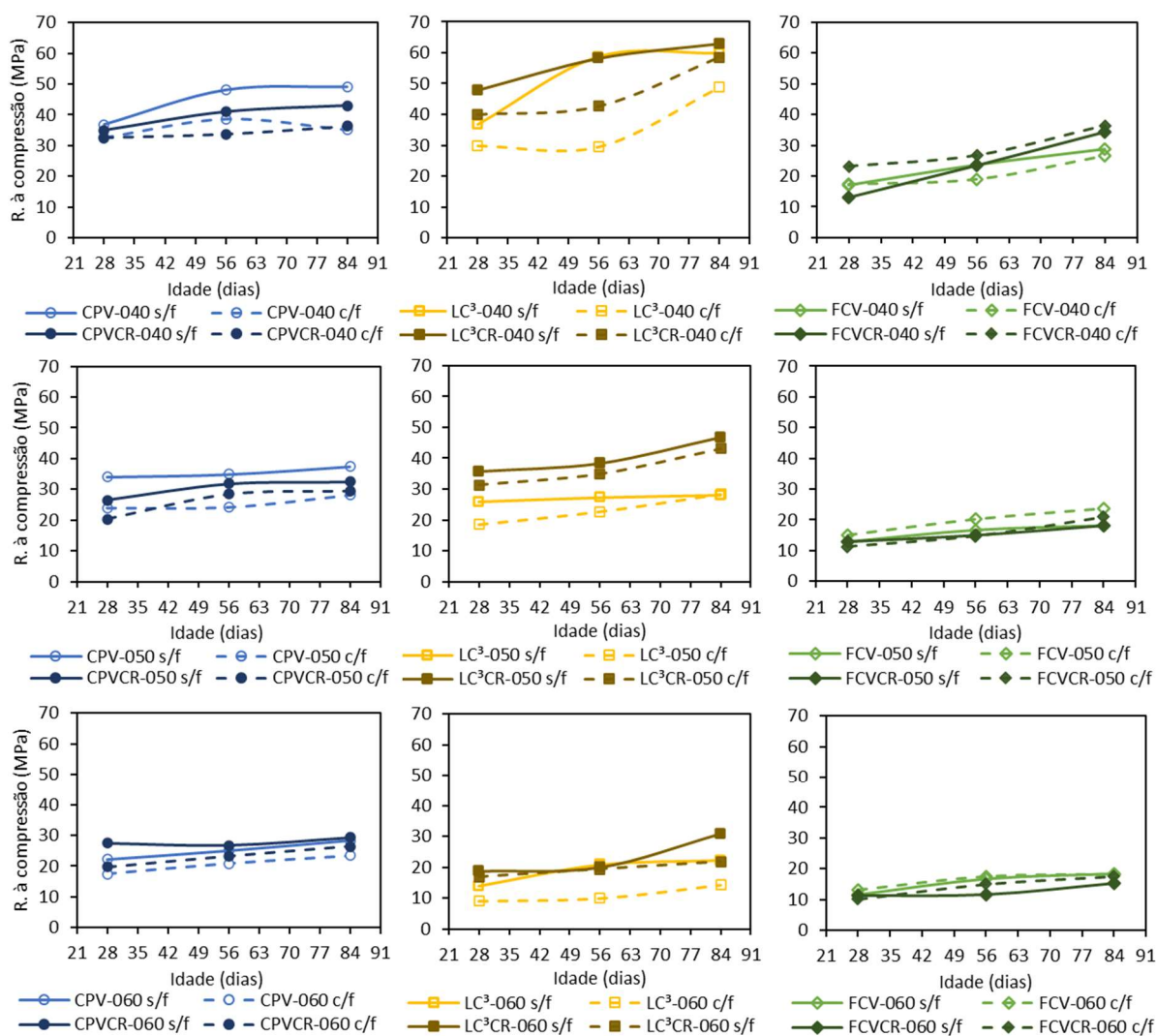
### **4.3 AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO**

Na sequência são apresentados os resultados e discussões acerca da ocorrência de autocicatrização relacionada à influência das variáveis de controle.

### 4.3.1 Índice mecânico de autocicatrização

O ensaio de resistência à compressão em corpos de prova prismático ao longo tempo, de concretos íntegros e fissurados, foi um dos métodos empregados para avaliar a autocicatrização, obtendo-se a partir da relação dos resultados o Índice Mecânico de Autocicatrização. Na Figura 30 apresenta-se a evolução da resistência entre 28 e 84 dias de idades.

Figura 30 – Resistência à compressão de concretos com e sem fissuras, ao longo do tempo.

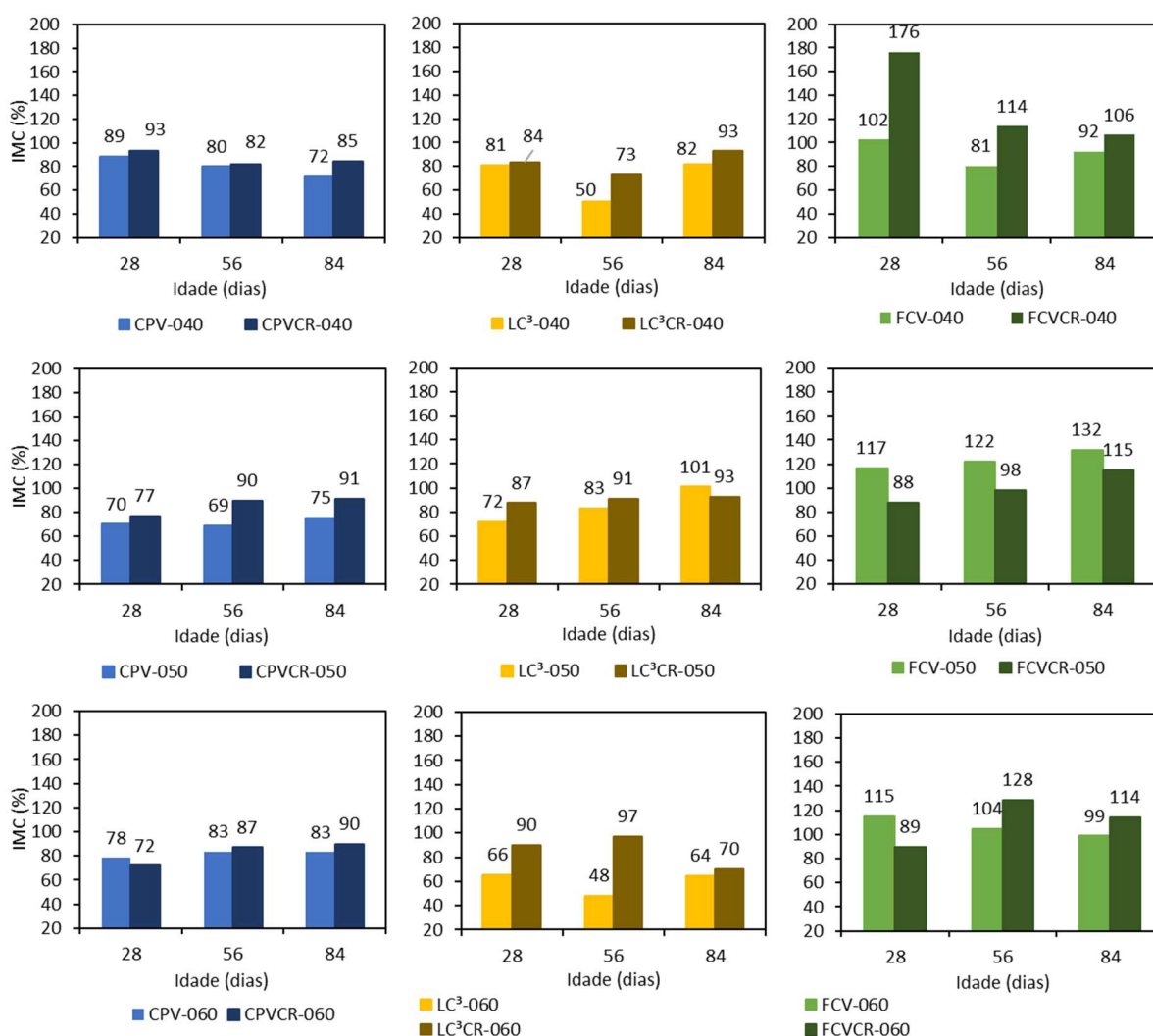


Fonte: Elaborado pela autora.

Ressalta-se que a variabilidade da resistência de corpos de prova fissurados e sujeitos a cicatrização pode ser grande, pois pode haver diferenças significativas da área fissurada em corpos de prova de uma mesma combinação de variáveis, bem como da quantidade de produtos depositados na fissura e consequente cicatrização.

Além disso esse índice não é um valor absoluto, pois ao fissurar o corpo de prova não se perde completamente a capacidade resistente do mesmo e não foi possível medir essa perda devida à fissuração. Assim, a análise apresentada na sequência é apenas uma de tendência de comportamento observada no escopo desse trabalho. Os concretos elaborados com metacaulim demonstraram um comportamento de resistência favorável, estando em acordo com os resultados apresentados por Zongjin Li et al. (2003), que concluem que a elevada reatividade do metacaulim, associado à sua finura, resulta em um refinamento da estrutura de poros. O concreto composto com a/c 040, LC<sup>3</sup> e aditivo cicatrizante teve um desempenho favorável quando submerso em água, o que induziu o fenômeno de autocicatrização, bem como favoreceu a hidratação, resultando em um melhor desempenho mecânico. Na Figura 31 apresenta-se o índice mecânico de cicatrização.

Figura 31 – Índice mecânico de cicatrização

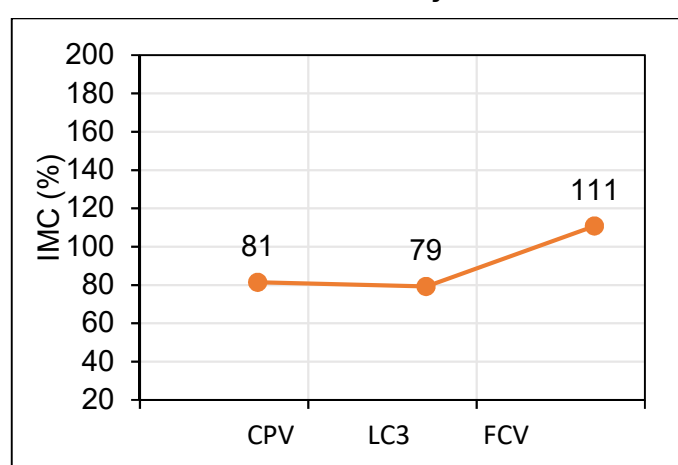


Fonte: Elaborado pela autora.



Os concretos produzidos com FCV, em geral, retornaram os maiores IMC comparando-se todo o conjunto de dados, destacando-se os traços sem cristalizante FCV-040, FCV-050, FCV-060 e o traço com cristalizante FCVCR-040. A Figura 32 apresenta as médias de IMC em função do tipo de cimento, onde percebe-se que a recuperação mecânica dos concretos fissurados CPV e LC<sup>3</sup> obtiveram valores em torno de 80% de IMC, enquanto os concretos fissurados FCV superaram, em média, a resistência dos concretos não fissurados.

Figura 32 – Médias em função da variável de controle “cimento” para Índice Mecânico de Cicatrização – IMC -



Fonte: Elaborado pela autora.

O IMC foi calculado com resistências medidas aos 28, 56 e 84 dias de idade, e em concretos que permaneceram em cura submersa. Dois fatos podem explicar os valores de IMC apresentados na Figura 32. O primeiro fato relaciona-se com o elevado grau de hidratação que cimentos CP V-ARI e cimentos LC<sup>3</sup> podem apresentar aos 28 dias, fazendo com que a presença de compostos anidros seja escassa nessa idade, dificultando a cicatrização em idades mais elevadas. Em contraponto, o segundo fato refere-se justamente à hidratação lenta conferida pela cinza volante associada à cura submersa ao longo do tempo, podem ter levado à um IMC para os concretos FCV que superaram a resistência dos concretos não fissurados, em alguns casos com contribuição mais efetiva do aditivo cristalizante ao longo do tempo.

No entanto, ressalta-se novamente, o aumento evidenciado com maior ênfase não significa que a recuperação das propriedades tenha ocorrido efetivamente. Somente traços com FCV apresentaram incremento na recuperação, atingindo ou ultrapassando 100% da resistência dos concretos não fissurados. Comportamento

similar foi observado por Hannesson *et al.* (2012), em que foram utilizados diferentes teores de cinza volante nas amostras, que relatam que as amostras com teores de até 25% de cinza volante, aos 56 dias, aumentaram a resistência devido ao tamanho das partículas. As menores taxas de recuperação de resistência foram observadas para o cimento LC<sup>3</sup>, com valores de 48 e 50% para LC<sup>3</sup>-60 e LC<sup>3</sup>40, respectivamente, aos 56 dias.

Para avaliação da recuperação das propriedades mecânicas com e sem fissura, foi realizado o teste ANOVA (Tabela 15) de medidas repetidas, pois têm-se três idades de análise, 28 dias, 56 dias e 84 dias. Dessa forma, avaliou-se a existência de diferença estatística significativa entre as médias dos resultados de Resistência (MPa) entre as três datas do ensaio entre os traços distintos usados.

Tabela 15 - ANOVA recuperação das propriedades mecânicas

Grupo	gL	MQ	F	p-valor	Significância
<b>Sem fissura</b>					
Teste entre sujeitos	2	447,14	31,22	0,000	Sim
Teste intra sujeitos	1	879,22	43,319	0,000	Sim
<b>Com fissura</b>					
Teste entre sujeitos	2	363,60	48,08	0,000	Sim
Teste intra sujeitos	2	712,27	73,25	0,000	Sim

gl: Graus de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: valor da estatística F; p-valor: valor p; Significância: Se existe diferença estatística entre os grupos.

Fonte: Elaborada pela autora.

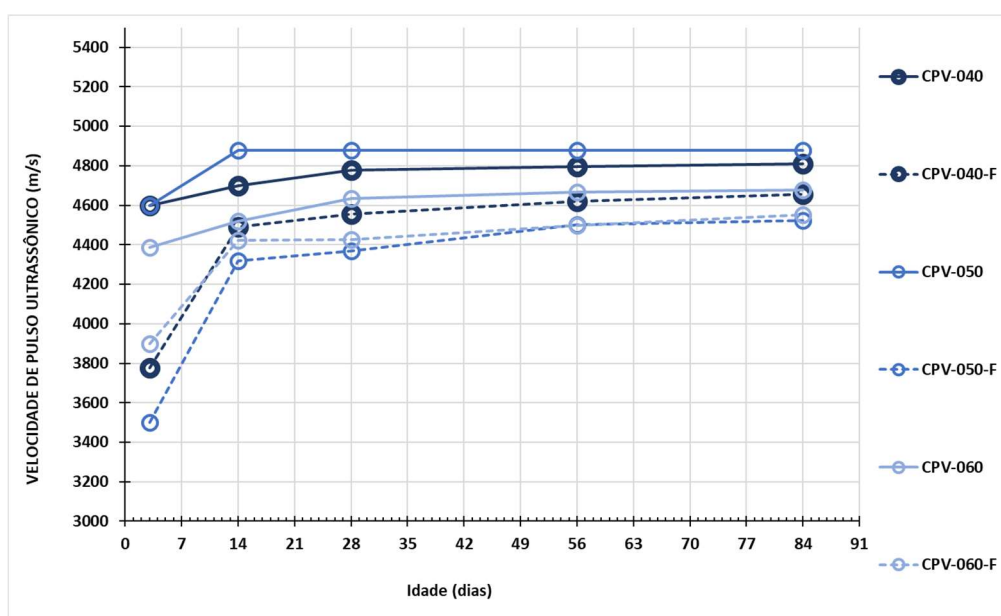
De acordo com os resultados da Tabela 15, pode-se verificar que existe diferença entre as três datas de ensaio e para todos os traços também existe diferença. Para ambas as idades de ensaio, a análise de variância indicou que tanto a relação água/cimento como o aditivo cristalizante com e sem fissura apresentam influência significativa na recuperação das propriedades mecânicas.

#### 4.3.2 Avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

A partir dos Tempos ( $\mu$ s) do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica obtidos, foram traçados os gráficos de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPOU) apresentados da Figura 33 à Figura 38 para que se pudesse comparar o fenômeno de autocicatrização. Os resultados foram separados conforme traço com e sem aditivo cristalizante, observando o comportamento das diferentes

relações água/cimento com e sem fissura em cada situação, aos 3, 14, 28, 56 e aos 84 dias. Diante da análise dos resultados apresentados, percebe-se que o ensaio de ultrassom é sensível e eficaz para detectar a presença de fissuras no concreto. Afinal, o tempo de propagação da onda é alterado na presença de fissuras, apresentando valor menor do que o observado na região íntegra do concreto.

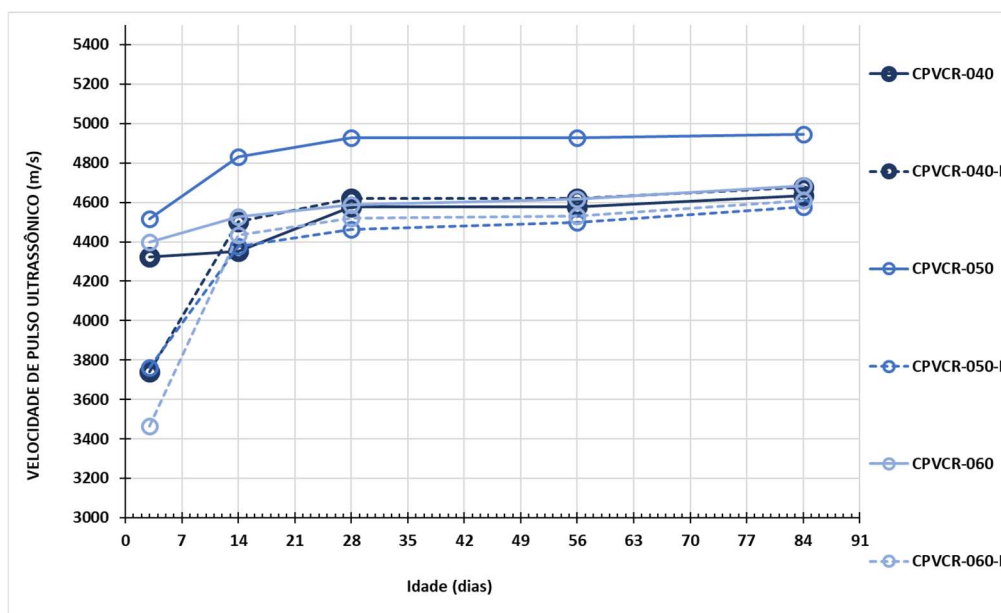
Figura 33 - Comparativo da VPOU entre traços CPV



Fonte: Elaborado pela autora.

Os concretos referência (CPV-040, CPV-050 e CPV-060) sem fissura após 28 dias alcançam quase a estabilidade, podendo estar relacionado ao traço CPV-ARI de alta resistência inicial, justificando pelo fato de as reações ocorrerem mais rapidamente. O comportamento dos resultados obtidos estão de acordo com Abo-Qudais (2005), apontando o mesmo aumento expressivo da VPOU nas primeiras idades, seguida de uma redução nos ganhos, com estabilização a partir dos 28 dias para uma grande variedade de traços de concreto. Por esse método de avaliação, percebe-se que os concretos CPV fissurados não recuperaram integralmente, ao longo do tempo, as características de compacidade dos concretos não fissurados

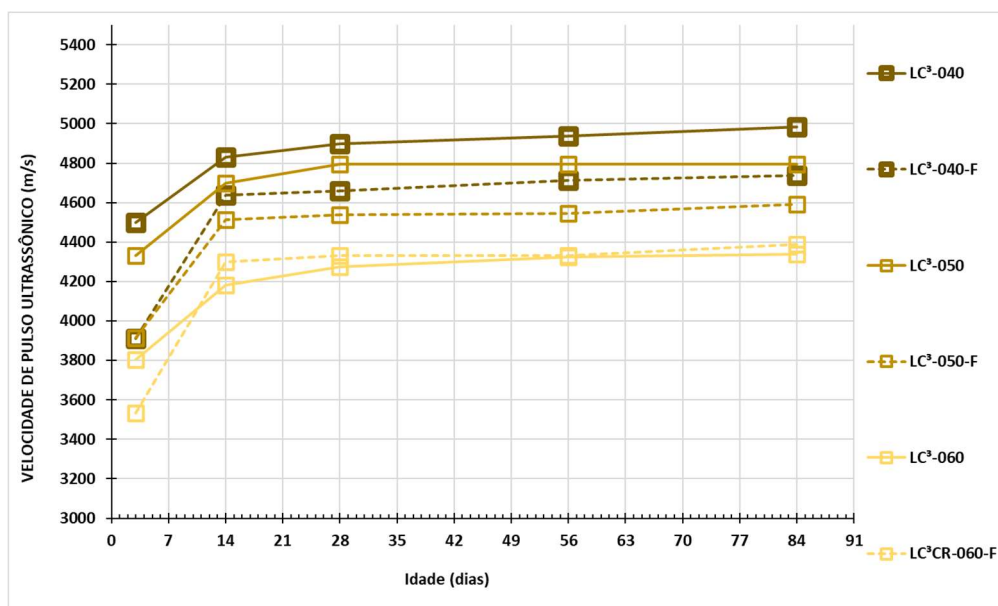
Figura 34 - Comparativo ultrassom entre traços CPVCR



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 34 observa-se a comparação entre os concretos fissurados e não fissurados para o traço CPVCR. A primeira leitura coincide com a data de indução das fissuras, que se realizou aos 3 dias de idade dos concretos. No ponto relativo à leitura aos 14 dias pode-se observar um incremento acentuado na VPOU. Ao final, aos 84 dias, a maioria dos concretos recuperou quase que integralmente a VPOU em relação aos corpos de prova íntegros. A partir dos 28 dias, até os 84 dias, parece haver uma estabilização na recuperação da estanqueidade, traduzida pela VPOU

Esse aumento no decorrer do tempo parece ser função da presença de cristalizante, uma vez que o comportamento é distinto dos traços CPV sem cristalizante. Esse aumento no decorrer do tempo pode estar relacionado à formação de produto autocicatrizante depositado nas fissuras, e estimulado pela presença constante de água, visto que até o momento do ensaio estavam submersos em água.

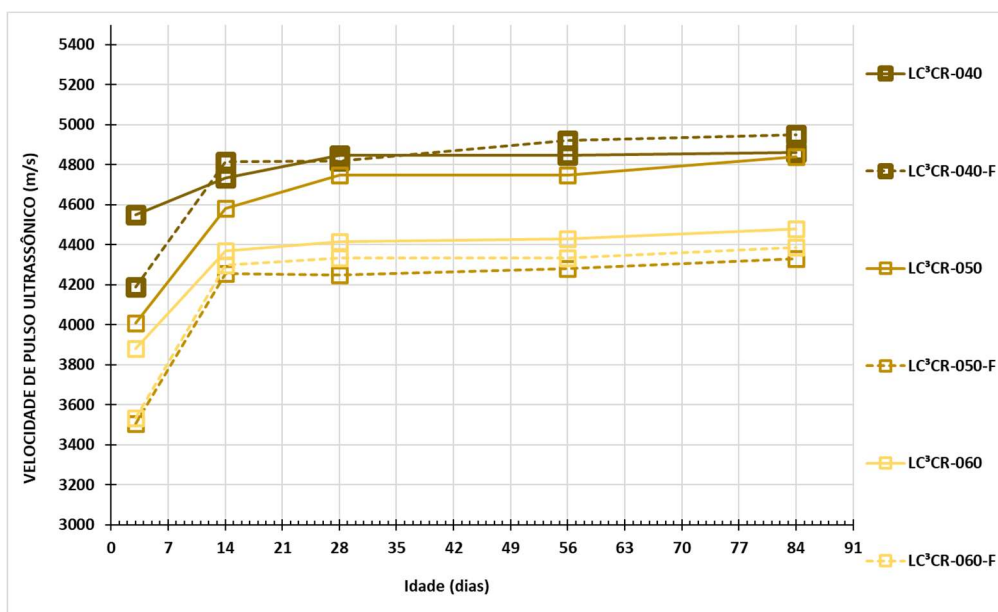
Figura 35 - Comparativo ultrassom entre traços LC<sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pela autora.

Para os traços LC<sup>3</sup>, composto com metacaulim e filer carbonático (Figura 35), é possível observar que os mesmos obtiveram um maior crescimento da VPOU, em comparação aos traços CPV, indicando recuperação da estanqueidade aos 28 dias, podendo ser influência da maior geração de produtos hidratados oriundos da reação do alumínio com o carbonato. Os corpos de provas fissurados em relação aos íntegros obtiveram uma recuperação de estanqueidade na ordem de 95% a 97%.

Figura 36 - Comparativo ultrassom entre traços LC<sup>3</sup>CR

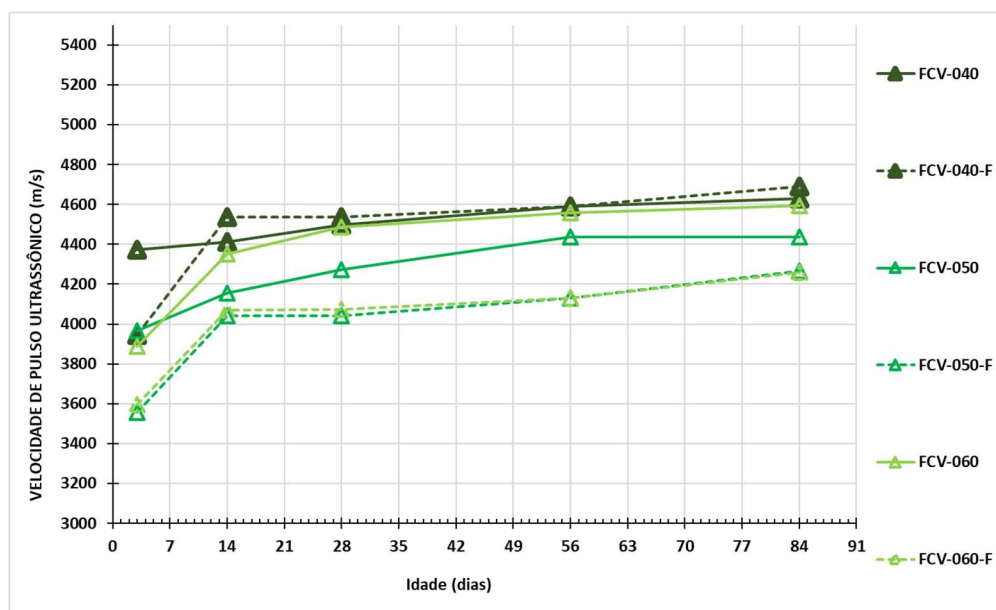
Fonte: Elaborado pel



a autora.

É possível observar que o traço LC<sup>3</sup>CR-040 obteve resultados superiores aos fissurados aos 84 dias em relação aos íntegros. Essa melhoria evidencia que o aditivo cristalizante pode ser benéfico para autocicatrização, parecendo haver uma interação com o LC<sup>3</sup> mais evidente do que para os cimentos CPV. Com isso, pode-se obter uma taxa de fechamento aos 14 dias de 100%.

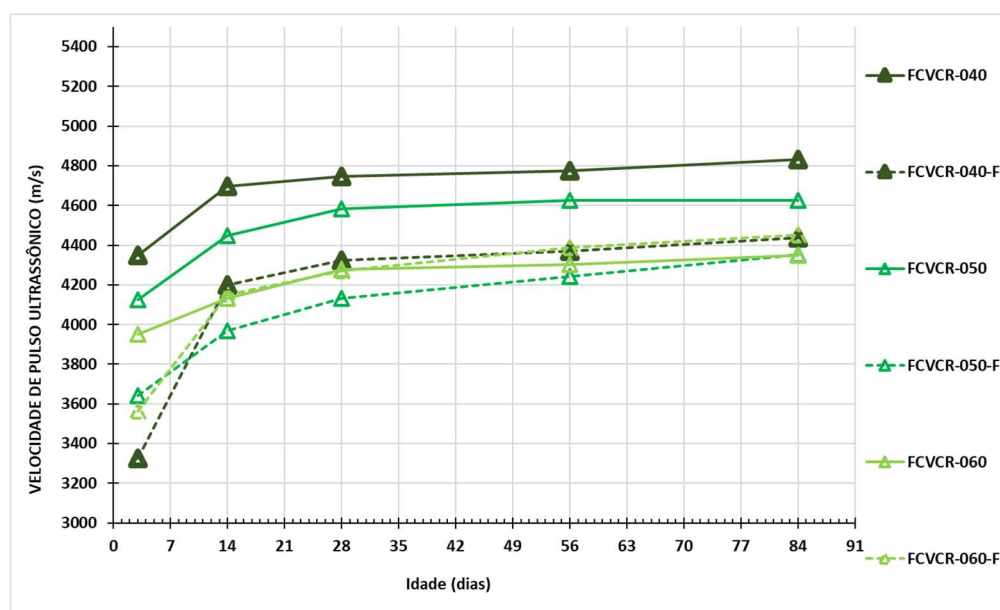
Figura 37 - Comparativo ultrassom entre traços FCV



Fonte: Elaborado pela autora.

Os corpos de prova com cinza volante (Figura 37) obtiveram bons ganhos na recuperação de estanqueidades aos 14 dias. O traço FCV-040-F permaneceu com o mesmo padrão de qualidade do concreto sem fissuras. Já os demais traços não atingiram 100% em relação aos íntegros, não havendo contribuição na densidade da matriz. Provavelmente o maior consumo de cimento no traço de relação água/cimento 0,40, associado à cura submersa, pode ter beneficiado a ação da cinza volante.

Figura 38 - Comparativo ultrassom entre traços FCVCR



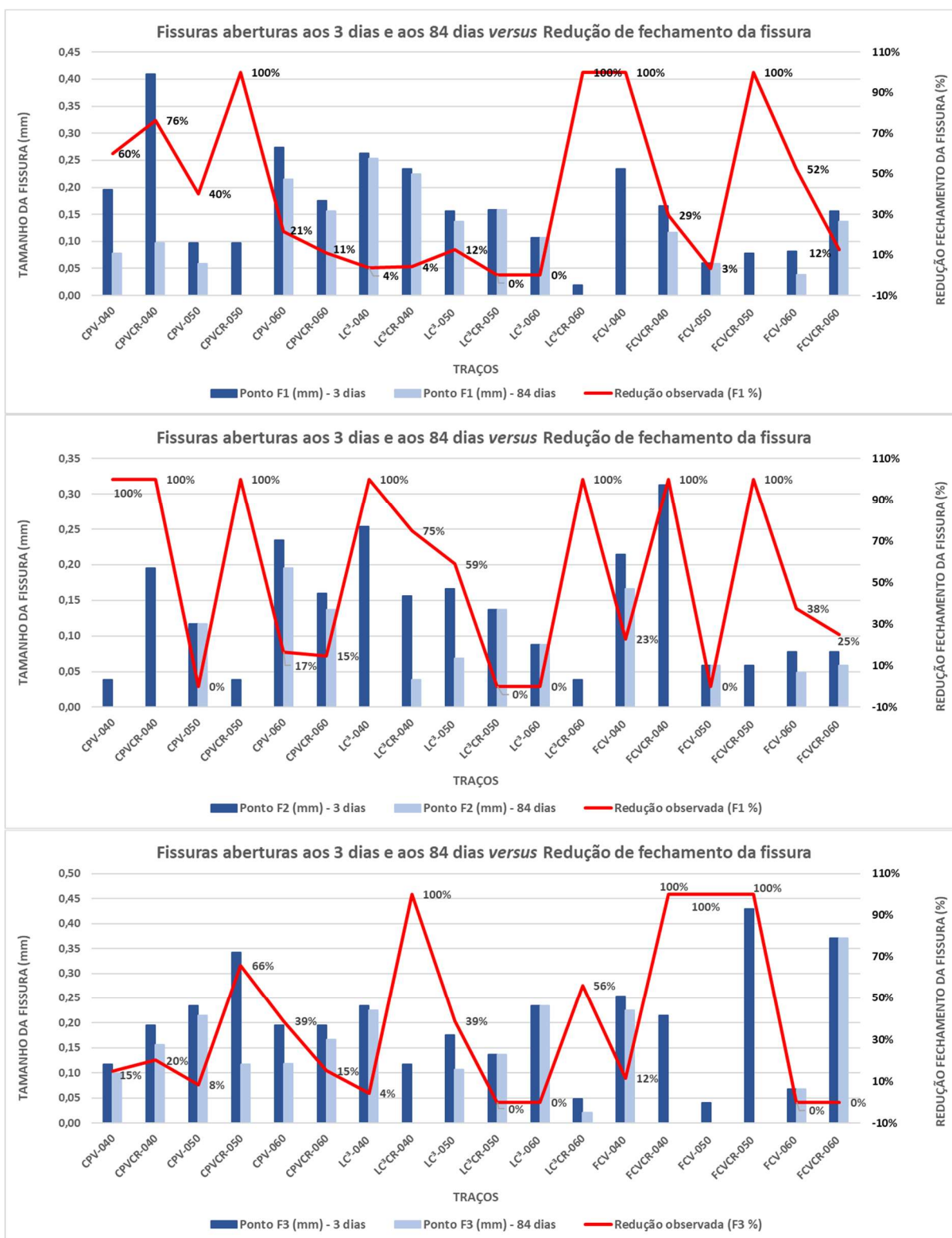
Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a recuperação de estanqueidade dos concretos com o aditivo cristalizante dos corpos de prova fissurados com FCV e cristalizante (Figura 38), pode-se observar reduções mais expressivas para concretos contendo cinzas volantes em relação aos demais traços analisados. De acordo com os estudos de Lam *et al.* (2000) e Esteves (2019), essa maior redução pode ser atribuída ao comportamento mais frágil do concreto contendo cinzas volantes nas idades estudadas: como a hidratação dos aglomerantes contendo pozolanas é mais lenta, espera-se que a pasta de cimento desses concretos contenha menos cristais resistentes nas primeiras idades. Já o traço FCVCR-060 aos 14 dias fugiu do padrão.

#### 4.3.3 Avaliação por análise de imagem obtida em estereomicroscópio

A visualização da autocicatrização das fissuras foi realizada por imagens obtidas de um estereomicroscópio para verificação macroscópica da evolução da autocicatrização. No 3º dia de idade, após indução das fissuras, foram registrados as fissuras, o tamanho e intensidade das fissuras. Aos 84 dias foi analisada a presença de produto de cicatrização, calculado o índice físico de autocicatrização e feita análise. Foram realizadas leituras em 3 pontos diferentes da fissura (F1, F2 e F3), escolhidos em função de apresentarem diferenciação visual em relação ao tamanho, para melhor análise no comportamento em cada espessura, conforme Figura 39.

Figura 39 - Fissuras abertas aos 3 dias e aos 84 dias **versus** redução de fechamento de fissura

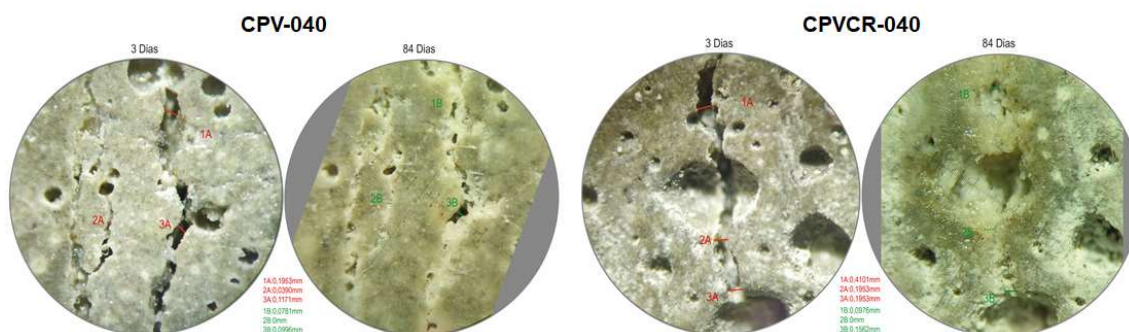


Fonte: Elaborado pela autora.



As imagens obtidas por estereomicroscópio das fissuras, antes e depois da cicatrização, com resolução de 52x são apresentadas da Figura 40 à Figura 48.

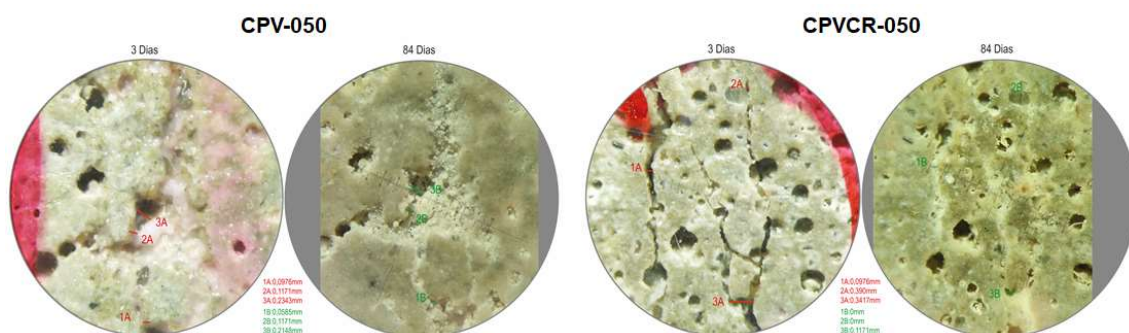
Figura 40 – Microscopia ótica nos traços e CPV e CPVCR a/c = 0,40



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 40, as fissuras aos 3 dias variaram de 0,20 a 0,41 mm para CPV-040 e de 0,04 a 0,20 mm para CPVCR-040. Esse fato pode ser evidenciado com a observação imagens compiladas ao longo dos três pontos aos 84 dias, em que há a selagem próxima de 100% entre os pontos 2B, para ambas as amostras. Já no ponto 1B, apenas 60% e 76% da abertura foi selada, respectivamente em CPV-040 e CPVCR-0,40, e no ponto 3B, também respectivamente, a fissura teve apenas 15% e 20% preenchida. Os dois traços tiveram comportamento semelhante nos três pontos.

Figura 41 – Microscopia ótica nos traços CPV e CPVCR a/c = 0,50

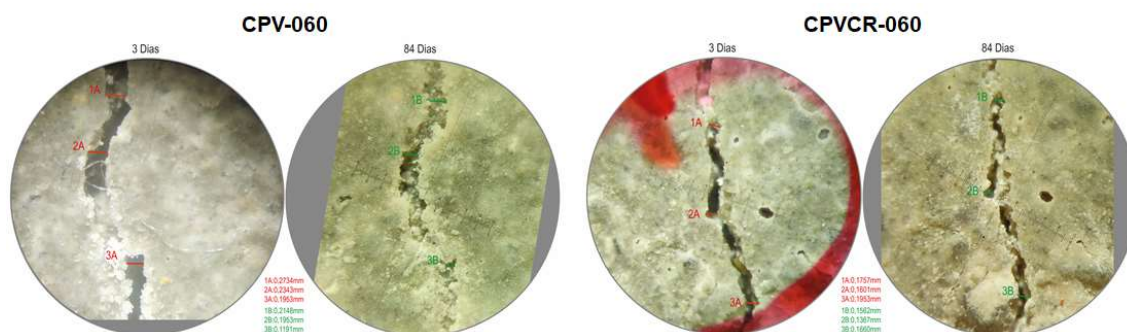


Fonte: Elaborada pela autora.

Verifica-se que para a relação a/c 0,50, na Figura 41, houve também um bom selamento das fissuras na relação a/c 0,50 no traço CPVCR-050 aos 84 dias, podendo ser verificado que ficou muito próxima de 100% de colmatação, possivelmente sendo resultado da carbonatação do hidróxido de cálcio que foi lixiviado da matriz cimentícia para a fissura. A utilização do aditivo cristalizante pode ser a justificativa mais provável para o selamento quase total. Evidencia-se esse fechamento muito parecido nos dois

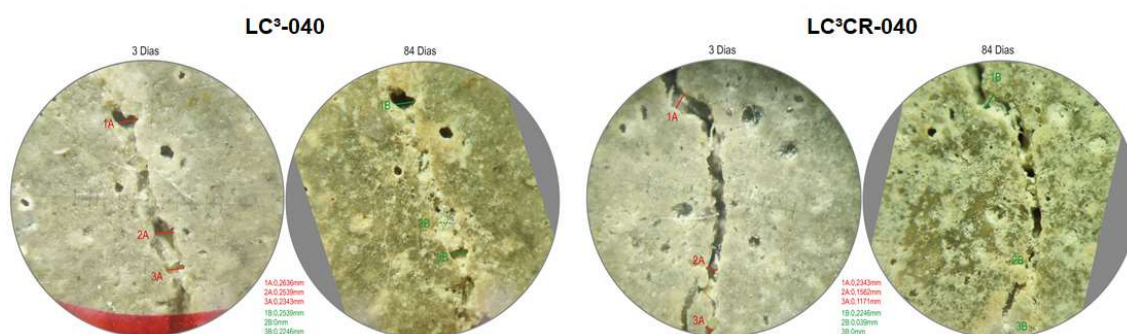
traços CPV-060 e CPVCR-060 (Figura 42) com menor selagem entre as três relações a/c, provavelmente em função do menor consumo de cimento.

Figura 42 – Microscopia ótica nos traços CPV E CPVCR a/c = 0,60



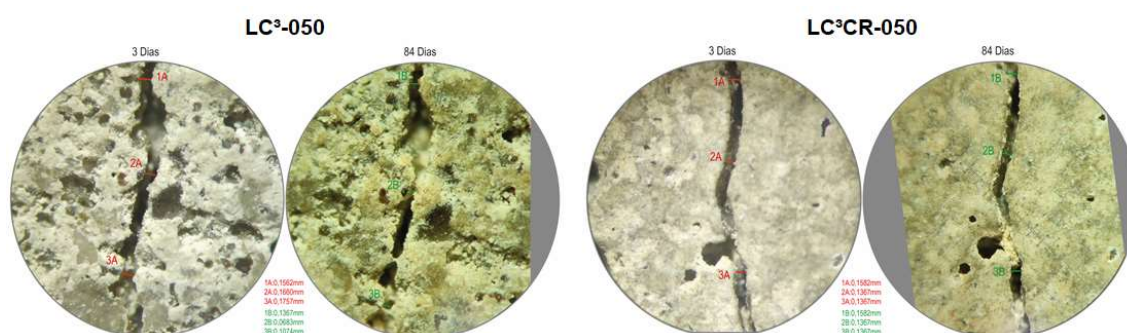
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 43 – Microscopia ótica dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,40



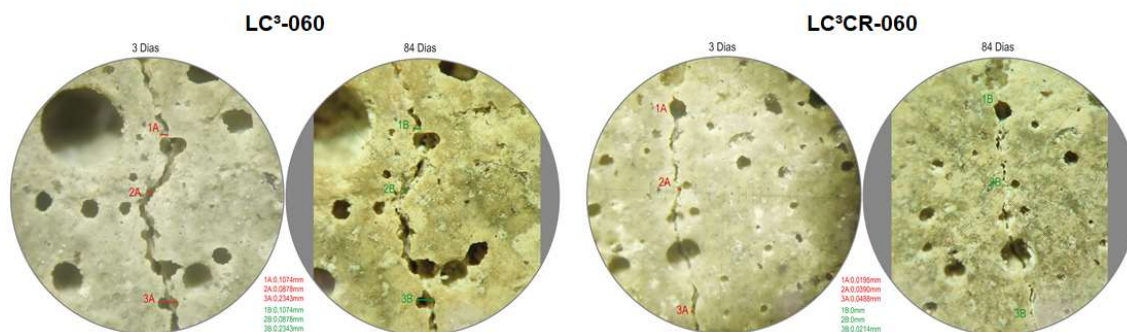
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 44 – Microscopia ótica dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,50



Fonte: Elaborada pela autora.

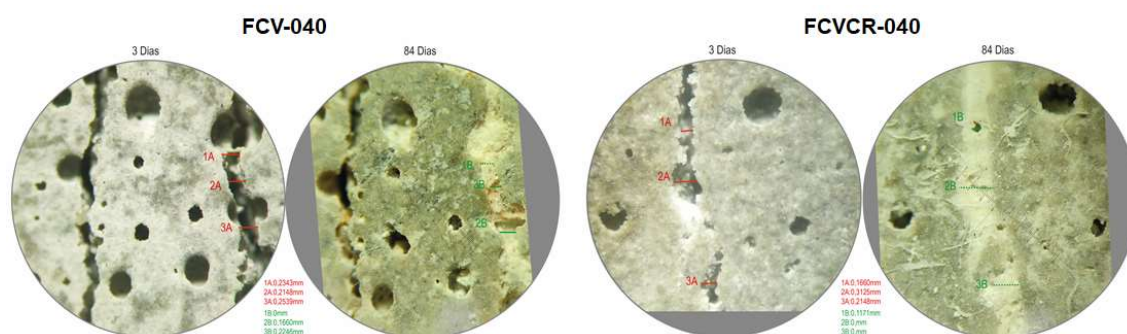
Figura 45 – Microscopia ótica dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,60



Fonte: Elaborada pela autora.

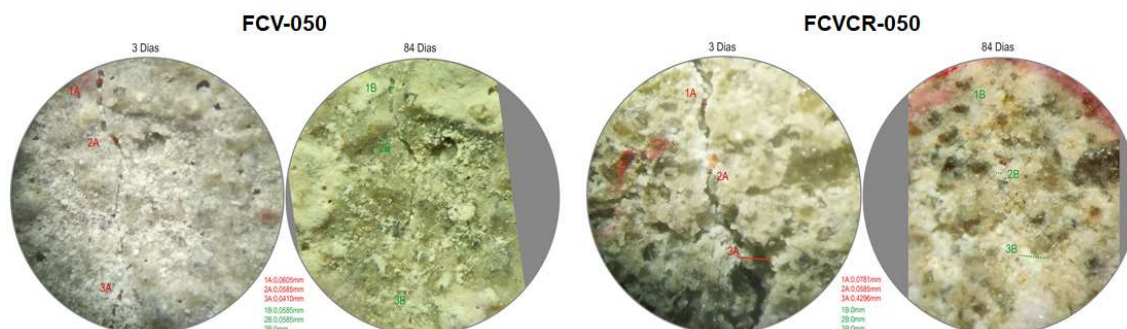
A Figura 43, a Figura 44 e a Figura 45 apresentam as amostras aos 3 e 28 dias compostas com LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR, com espessura média de 0,15 mm. Quando adicionado aditivo cristalizante, não se observa o mesmo comportamento de fechamento das fissuras observado para os traços com CPV, com e sem aditivo cristalizante, nem mesmo na faixa mais estreita da fissura. Esse aspecto provavelmente se deve pela maior fixação e estabilidade dos produtos de hidratação promovida pela presença de metacaulim e fíler calcário, diminuindo a disponibilidade de CH para migrar para a fissura, bem por promover um refinamento da estrutura de poros que pode impedir a mobilidade de componentes em direção à fissura. O traço LC<sup>3</sup>-040 apresenta o melhor desempenho de fechamento das fissuras, comparando-se as três relações a/c, com uma maior descontinuidade no preenchimento da fissura comparado ao CPV, contabilizando uma média de 36% de extensão preenchida em relação aos 3 dias.

Figura 46 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,40



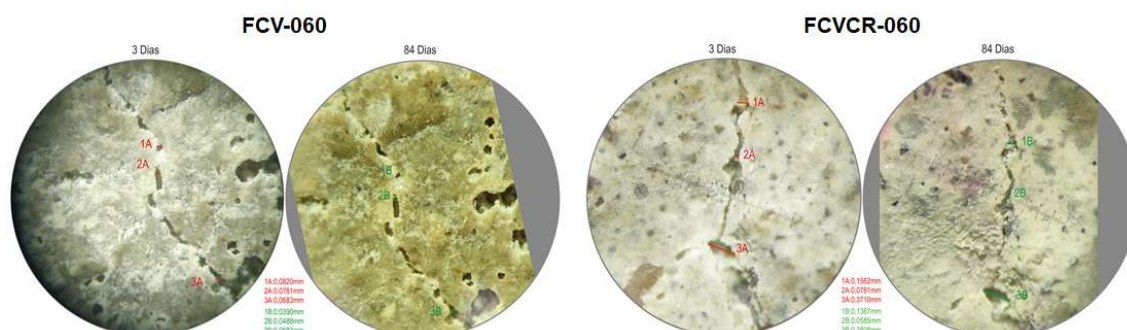
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 47 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,50



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 48 – Microscopia ótica dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,60



Fonte: Elaborada pela autora.

No caso das amostras contendo cinza volante (Figura 46, Figura 47 e Figura 48), houve um selamento parcial da fissura em FCV-040 e em FCV-050. Na amostra FCVCR-040 com aditivo cristalizante, a fissura fechou quase 100%, já na amostra FCVCR-050 com aditivo cristalizante a fissura fechou nos três pontos de observação 100%, conforme mencionado por Bertolini (2010), o aditivo cristalizante é classificado como um método de proteção que preenche os poros quando em contato com água. De acordo com o autor, a presença de substâncias a base de silicatos no produto permite uma reação com os produtos de hidratação presentes no concreto, especificamente com o hidróxido de cálcio. Essa reação resulta na formação de cristais, os quais são responsáveis por bloquear os poros.

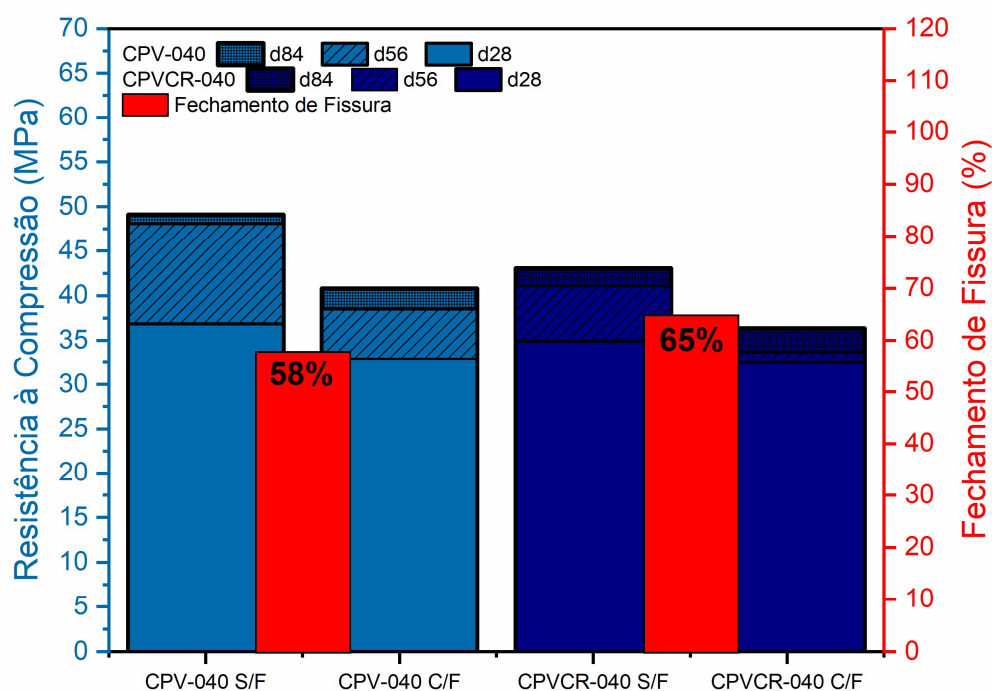
Na amostra FCVCR-050, mediu-se a abertura da fissura nos três pontos com 0,08, 0,06 e 0,04 mm aos 3 dias, e 0 mm aos 84 dias. A utilização do aditivo cristalizante pode ser a justificativa mais provável para o selamento acompanhado das fissuras ficarem menores que a amostra FCVCR-040 com 0,17, 0,31 e 0,22 mm aos 3 dias, e 0,12, 0 e 0 mm aos 84 dias. Nas amostras FCV-060 com aditivo cristalizante

não se observa o mesmo comportamento de fechamento das fissuras observado para os traços com relação a/c FCV-040 e FCV-050.

#### 4.3.4 Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação ao percentual de recuperação fechamento das fissuras.

A recuperação mecânica dos concretos em relação ao percentual médio de fechamento das fissuras é apresentada da Figura 49 à Figura 57, para que se pudesse comparar a autocicatrização com a determinação indireta pela resistência. Os resultados foram separados conforme recuperação mecânica dos concretos aos 28, 56 e 84 dias com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação ao percentual médio de fechamento das fissuras aos 84 dias.

Figura 49 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,40

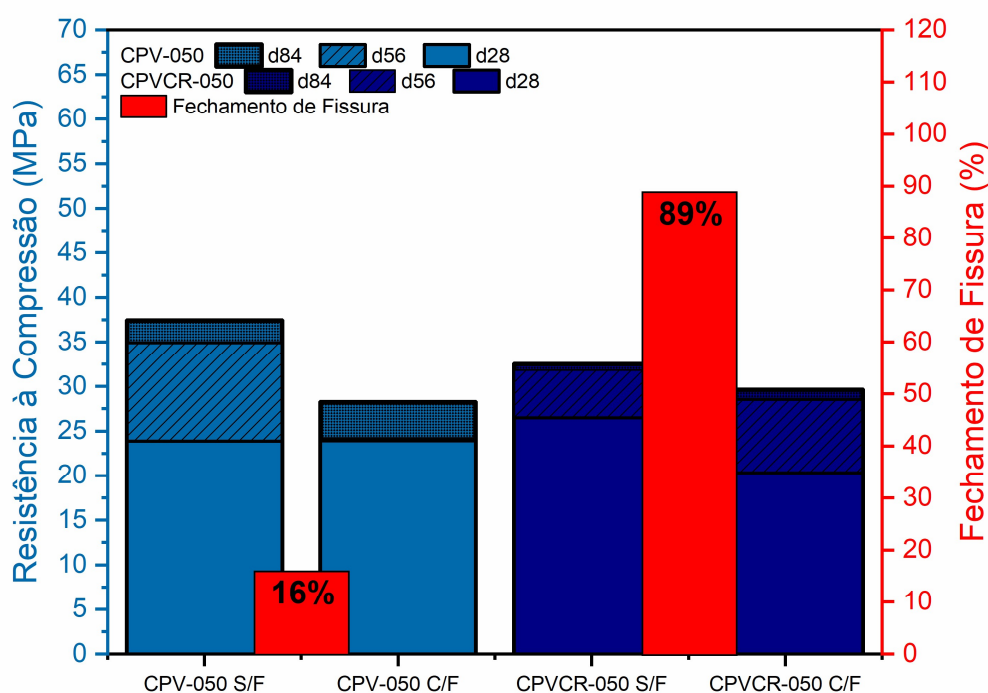


Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a Figura 49, o desempenho mecânico dos concretos para a relação a/c 0,40, com e sem aditivo apresentaram maior resistência acumulada em corpos de prova sem fissura ao longo dos três períodos de cura 28, 56 e 84 dias. Verifica-se a

diferença na recuperação entre corpos de prova com e sem fissuras foi mais expressivas para o traço referência CPV-040 em relação ao CPVCR-040. Observou-se que o traço CPVCR-040 apresentou um percentual de fechamento de fissuras médio mais elevado, correspondendo a 65%. Desta forma constata-se que o aditivo de cristalização adicionado ao traço de concreto pode melhorar o preenchimento dos poros e fissuras quando em contato com água. O referência CPV-040 correspondeu a 58% de fechamento de fissuras, apresentando a melhor resistência.

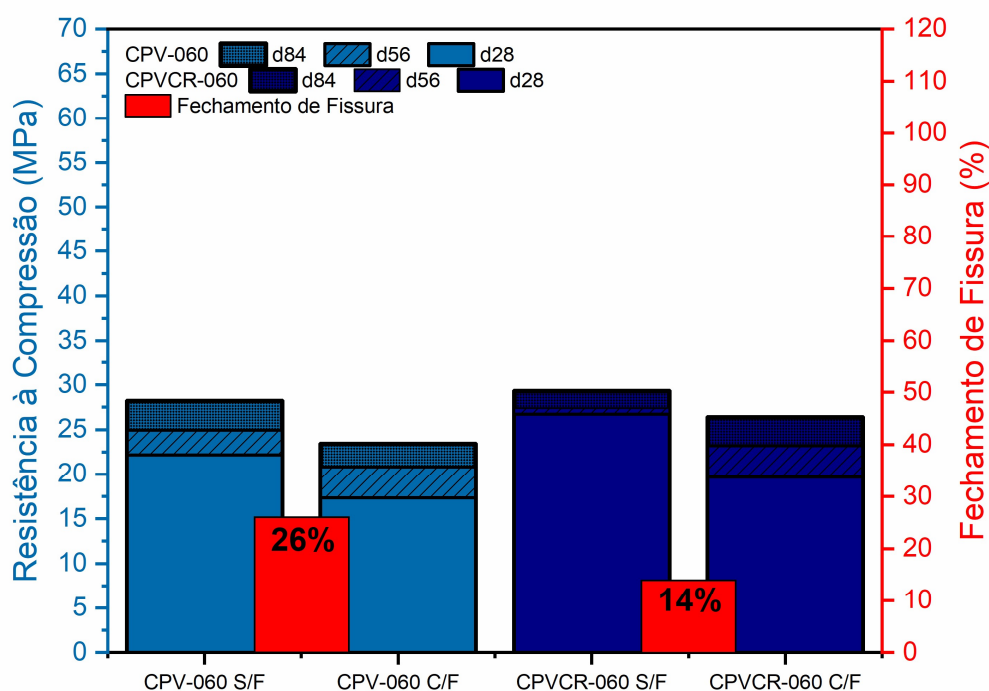
Figura 50 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,50



Fonte: Elaborada pela autora.

Já na Figura 50, referente a relação de a/c 0,50, a recuperação mecânica se comportou semelhante ao observado na Figura 49. O CPV-050 e o CPVCR-050 demonstraram maior resistência à compressão em corpos de prova sem fissuras, sendo a diferença menos acentuada no CPVCR-050. O percentual de fechamento de fissuras também foi maior no CPVCR-050, correspondendo a 89% em comparação ao CPV-050 que apresentou 16%.

Figura 51 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços CPV e CPVCR a/c = 0,60



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da Figura 51, é possível observar que o traço CPV-060 e CPVCR-060 apresentaram maior resistência à compressão em corpos de prova sem fissuras. O percentual de fechamento de fissuras foi maior no CPV-060, correspondendo a 26% em relação ao CPVCR-060 que apresentou 14%.

Ao comparar os materiais CPV e CPVCR dentro de cada relação de a/c, fica evidente que o CPV apresentou, de maneira geral, maior resistência à compressão nos corpos de prova, especialmente nos ensaios de 28 e 56 dias. Contudo, os concretos CPVCR demonstraram uma capacidade de equilíbrio mais próxima entre corpos de prova com e sem fissuras, destacando-se por apresentarem maiores percentuais de fechamento de fissuras em todas as análises realizadas.

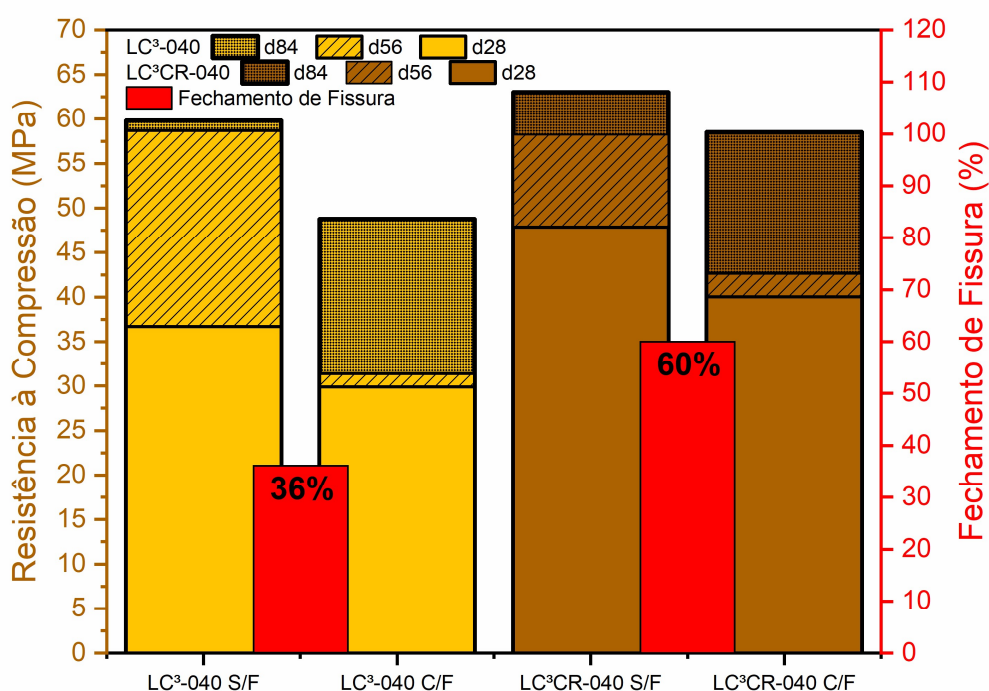
Dentro das mesmas relações a/c, também é possível comparar a evolução da resistência à compressão e do fechamento de fissuras ao longo dos três períodos de cura. Em ambos os traços, a resistência dos corpos de prova com fissuras foi mais pronunciada no período de 84 dias.

Em resumo, os resultados apontam que os concretos CPV e CPVCR apresentam comportamentos distintos em relação à resistência à compressão e ao fechamento de fissuras. O CPV se destaca pela maior resistência à compressão,

enquanto o CPVCR se destaca pela capacidade de equilíbrio entre corpos de prova com e sem fissuras, com maiores percentuais de fechamento de fissuras. Além disso, a relação água cimento influencia no comportamento dos concretos, afetando suas propriedades e desempenho. Essas conclusões fornecem subsídios essenciais para a escolha adequada de concretos em projetos de engenharia civil, visando a otimização da durabilidade e desempenho das estruturas de concreto.

A Figura 52 apresenta os resultados da recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissuras (S/F) em relação às médias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,40

Figura 52 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,40



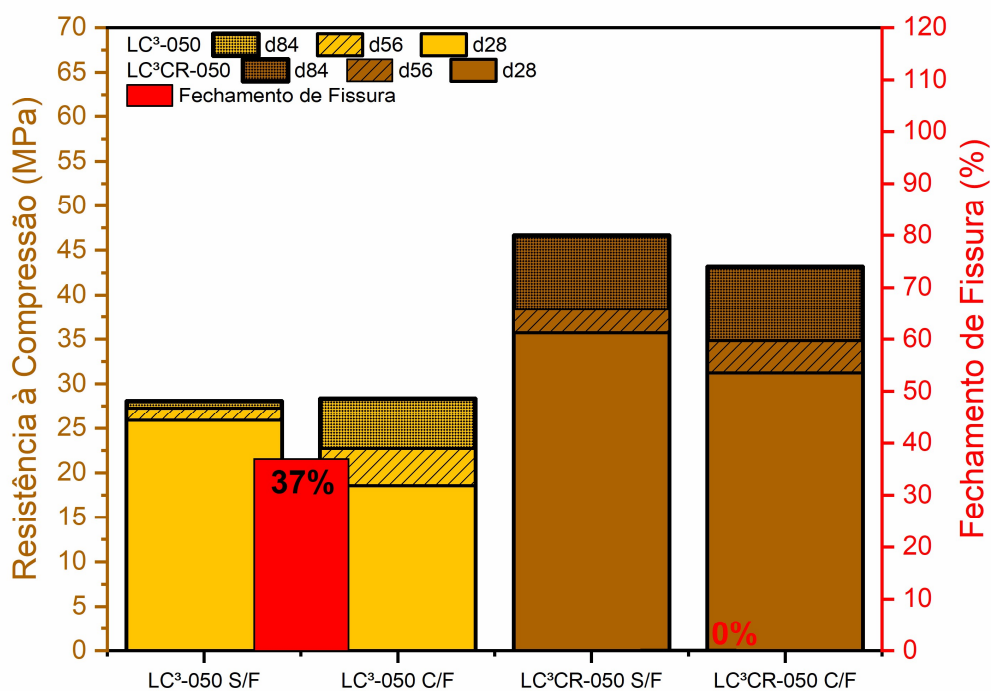
Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme demonstrado na Figura 52, os traços LC<sup>3</sup>-040 e os LC<sup>3</sup>CR-040 demonstraram maior resistência à compressão em corpos de prova sem fissuras, exibindo destaque na resistência aos 28 e 56 dias, enquanto o LC<sup>3</sup>CR-040 S/F apresentou maior resistência aos 84 dias. O fechamento de fissuras foi maior no LC<sup>3</sup>CR-040 de 60% e resistência 59,83MPa S/F e 48,79 MPa C/F, destacando o uso da combinação do aditivo cicatrizante com a substituição cimento Portland pela utilização do metacaulim e filler calcário, com a diminuição do calor de hidratação e



da fissuração de origem térmica. Já o traço LC<sup>3</sup>-040 teve uma cicatrização das fissuras de 36% sem aditivo.

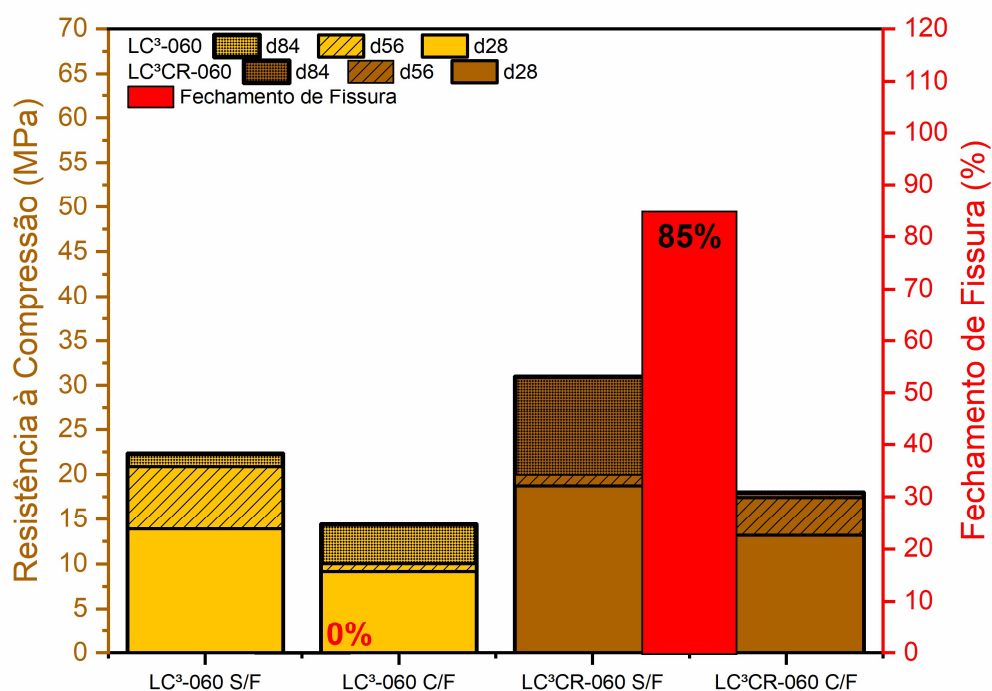
Figura 53 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às médias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,50



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 53 mostra que no caso da relação a/c 0,50, ambos os materiais apresentaram resistência à compressão quase igual similares entre corpos de prova com e sem fissuras, sendo que o LCR-050 se destacou em resistência aos 28 dias para corpos de prova sem fissuras e aos 56 e 84 dias para corpos de prova com fissuras. O fechamento de fissuras foi de 37% para o LC<sup>3</sup>-050 e 0% para o LC<sup>3</sup>CR-050. A Figura 54 demonstra o comportamento da recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissuras (S/F) em relação às médias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,60

Figura 54 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR a/c = 0,60



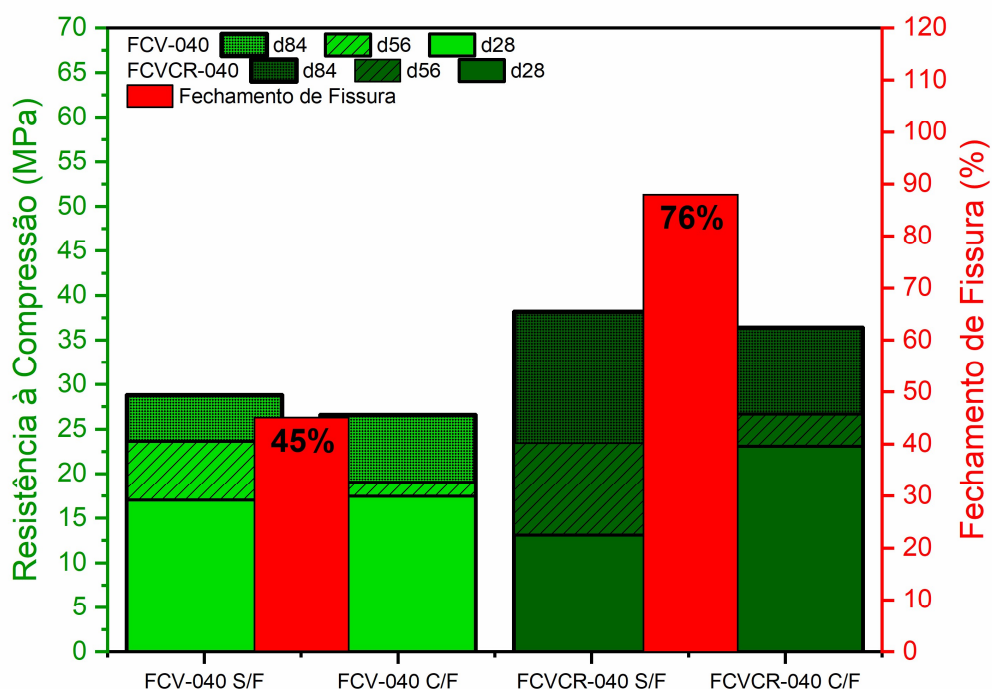
Fonte: Elaborada pela autora.

Já na relação a/c 0,60 verifica-se que o LC<sup>3</sup>CR demonstrou maior resistência acumulada em corpos de prova sem fissuras, com destaque para os períodos de 28 e 84 dias e incremento na resistência com a utilização do aditivo cristalizante para ambos os traços com e sem fissuras, além de maior porcentagem de fechamento das fissuras. Já o traço LC<sup>3</sup>-060 apresentou resistência à compressão de 14,38 MPa e quanto ao fechamento de fissuras foi de 0% na média.

Ao comparar os traços LC<sup>3</sup> e LC<sup>3</sup>CR dentro de cada relação a/c, observa-se que o LC<sup>3</sup>CR apresentou maior resistência à compressão e ainda se destacou por possuir uma maior capacidade de fechamento de fissuras em todas as relações a/c.

A Figura 55 demonstra os resultados da recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissuras (S/F) em relação às médias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,40

Figura 55 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,40

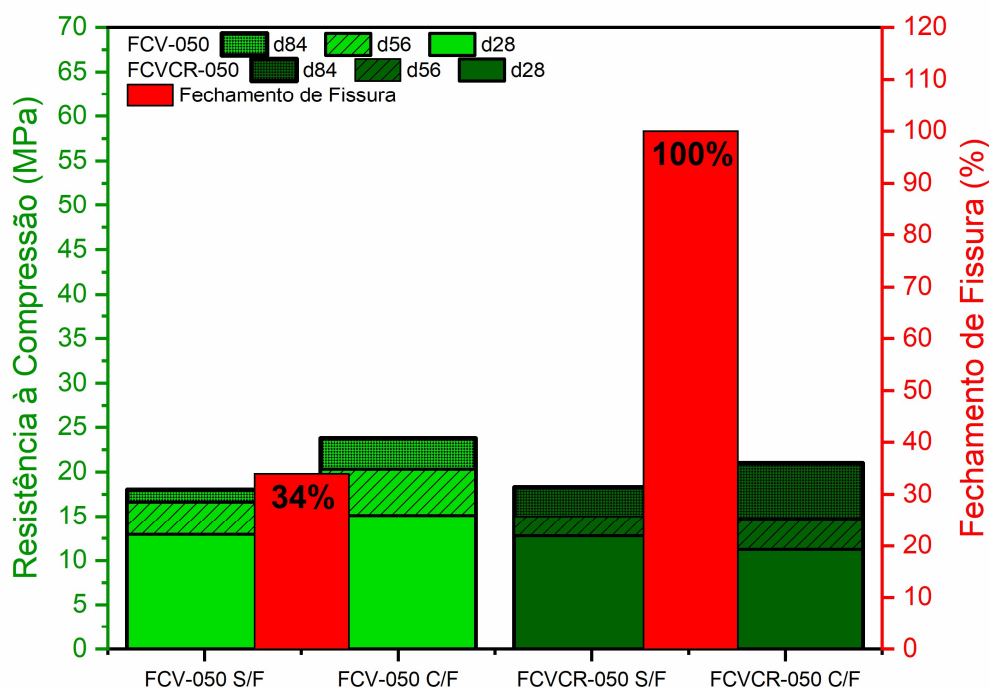


Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme os resultados da Figura 55, para a relação a/c 0,40 observou-se que a resistência à compressão do FCVCR-040 C/F é maior em relação ao traço com fissuras ao longo dos dois períodos de cura, aos 28 e 56 dias, mas ao final dos 84 dias, o traço S/F apresentou maior resistência, o que demonstra que para melhor análise dos benefícios de durabilidade da cinza volante e prevenção de formação de etringita tardia, é necessário maior período de cura para verificação das propriedades mecânicas em comparação aos outros traços desenvolvidos neste trabalho. Destaca-se que no caso do emprego de cinza volante, o percentual de fechamento fissuras foi de 76% com a combinação do aditivo cristalizante, e no caso sem o aditivo foi de 45%.

A Figura 56 ilustra os resultados da recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissuras (S/F) em relação às médias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,50.

Figura 56 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/c = 0,50

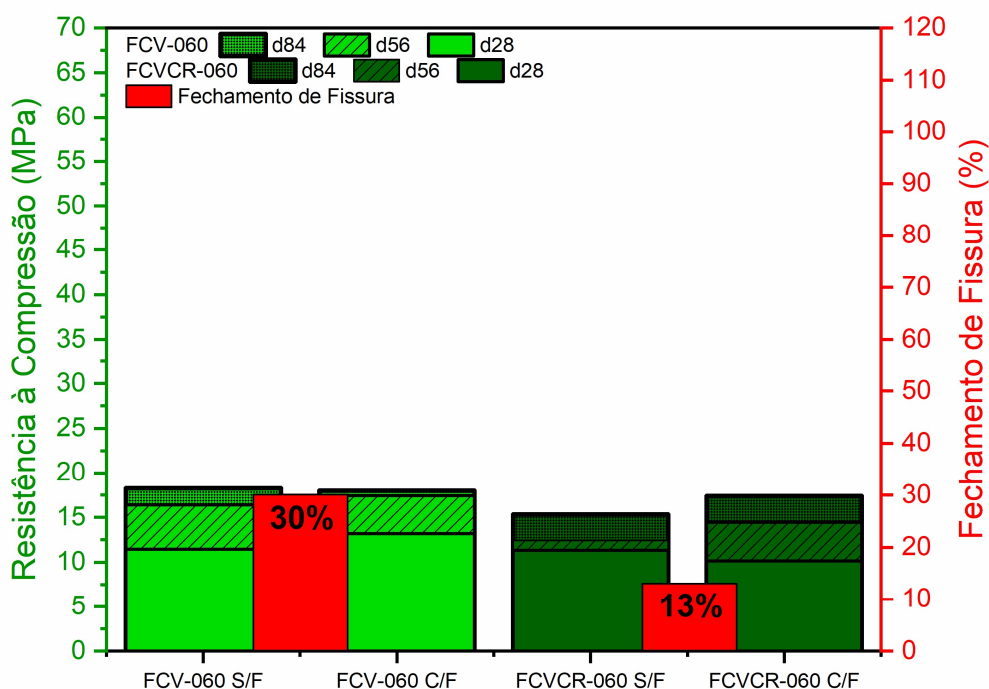


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 56, referente à relação a/c 0,50, notou-se que a resistência à compressão do FCV-050 C/F foi maior em relação ao sem fissuras ao longo dos três períodos de cura, o qual apresentou desenvolvimento diferente dos demais traços. O FCVCR-050, por sua vez, apresentou maior resistência à compressão para corpos de prova com fissuras ao longo de todos os períodos de cura, com um percentual de fechamento de fissuras de 100%, observando-se a evolução da autocatrização em ritmo mais acelerado, além de apresentar 100% de fechamento das fissuras em concretos com aditivo cristalizante.

A Figura 57 demonstra os resultados da Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissuras (S/F) em relação às médias do porcentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR a/= 0,60

Figura 57 - Recuperação mecânica dos concretos com (C/F) e sem fissura (S/F) em relação às medias do percentual de recuperação fechamento das fissuras dos traços FCV e FCVCR  $a/c = 0,60$



Na Figura 57, a relação  $a/c$  0,60 demonstrou o pior resultado quanto ao desempenho de durabilidade comparando com todos os traços, a maior resistência à compressão para corpos de prova FCV-060 S/F. O fechamento de fissuras foi de 30% para o traço FCV e 13% para FCVCR.

Comparando os concretos FCV e FCVCR, nota-se que os materiais FCVCR, em geral, apresentaram maiores resistências em corpos de prova com fissuras. Por outro lado, os materiais FCV tiveram desempenho superior para corpos de prova sem fissuras em alguns casos.

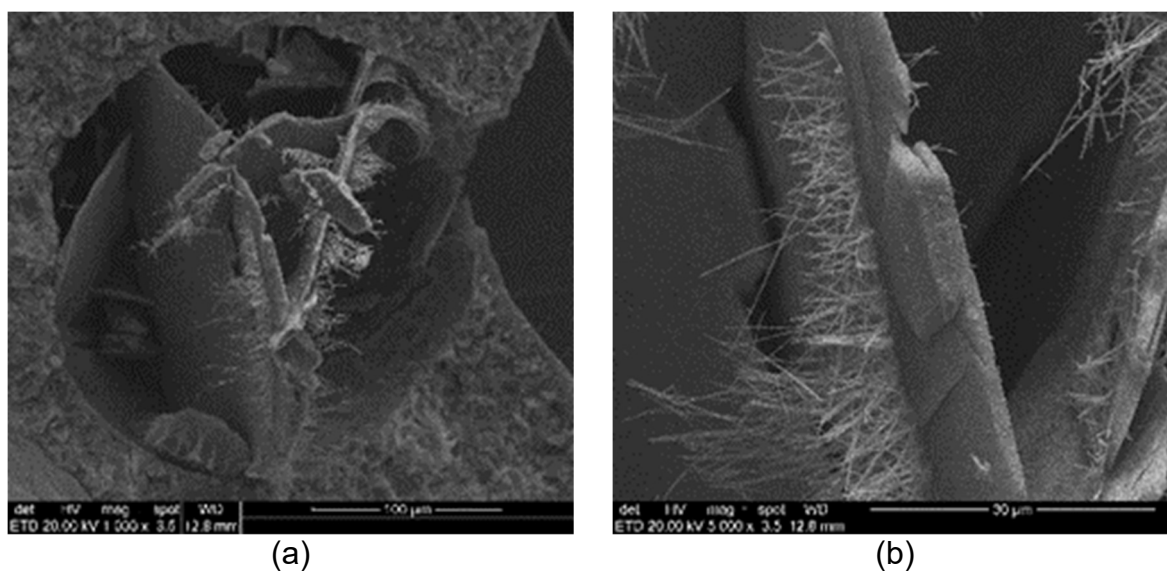
Em relação às diferentes relações  $a/c$ , observa-se que o aumento da relação  $a/c$ , geralmente, levou a maiores percentuais de fechamento de fissuras em ambos os materiais. Além disso, a relação  $a/c$  influenciou no comportamento da resistência à compressão, com os diferentes períodos de cura, afetando os resultados de maneira variada para cada tipo de concreto.

#### 4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitou observar alguns cristais presentes nas matrizes dos concretos compostos com os diferentes cimentos, com identificação de alguns deles por sua morfologia típica.

Também foi possível observar de forma qualitativa a porosidade de cada mistura que é um ponto importante no estudo da microestrutura, pois esta fase é o ponto fraco do concreto em relação à resistência mecânica. Foram analisadas amostras de concretos com relação a/c 0,40 produzidos com os diferentes cimentos e aditivo cristalizante. Essas imagens são apresentadas da Figura 58 à **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

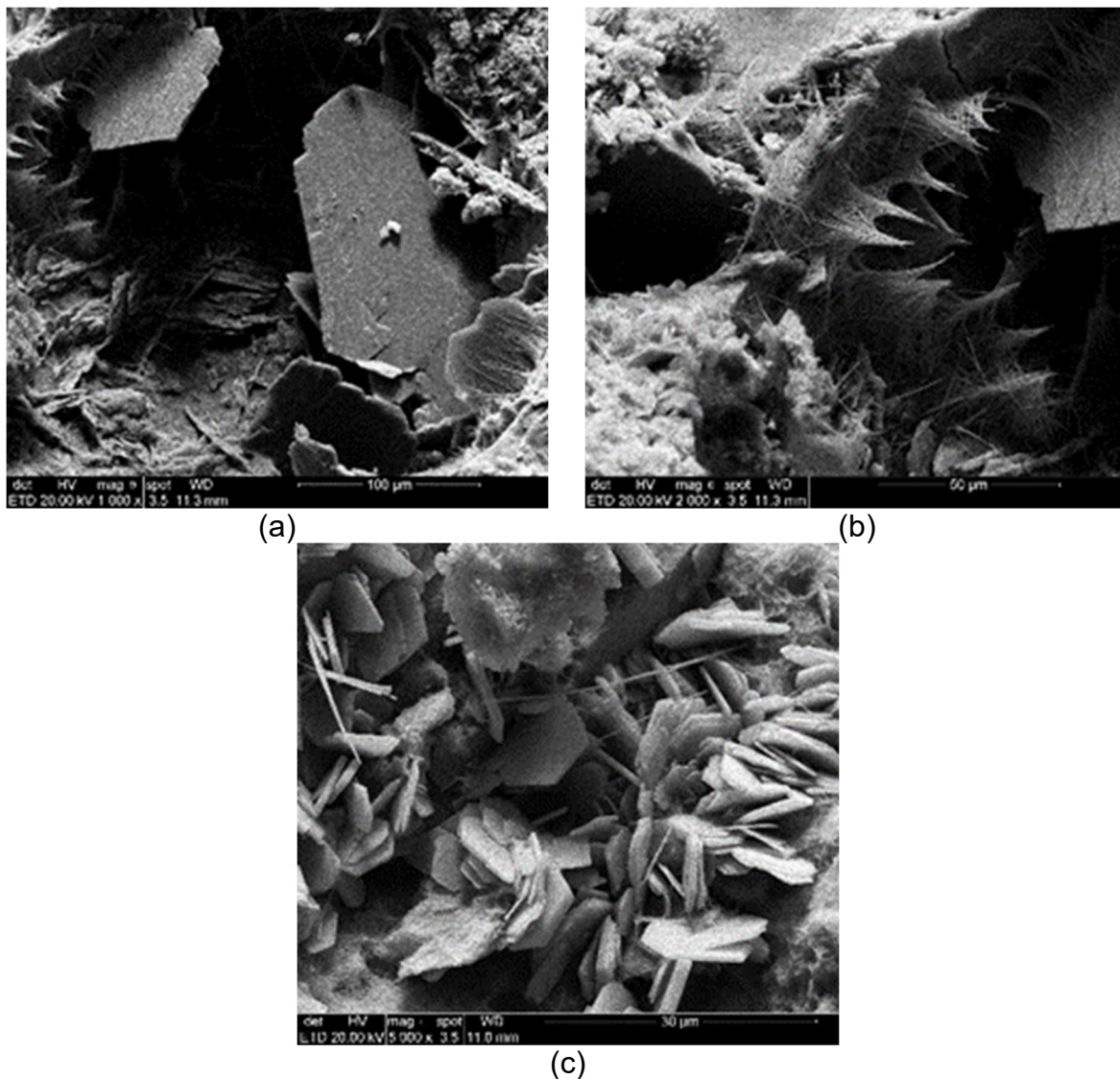
Figura 58 - Microestrutura do CPV-040 aos 84 dias: magnificação de (a) 1000x e (b) 5000x



Fonte: Elaborada pela autora.

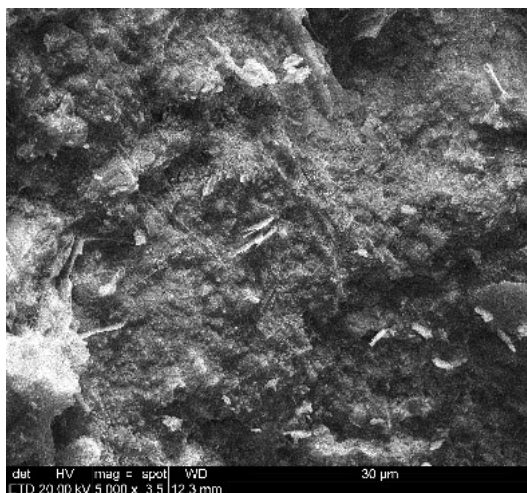
Na Figura 58, observa-se um segmento da microestrutura do concreto referência CPV-040, identificando-se a presença de grandes cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio), em um vazio de ar aprisionado, e cristais com formato de agulha crescendo que remetem à etringita. A idade desse concreto é 84 dias, na qual seria mais difícil a visualização desse produto de hidratação a partir de uma formação primária. No entanto, existe a possibilidade de ser uma etringita secundária ou outra formação do grupo Aft. Outra hipótese é a formação de carbonato de cálcio na forma de aragonita, cuja morfologia também é de finas agulhas. A primeira parece não ser possível, pois as amostras permaneceram em cura submersa em água saturada de cal. Somente uma análise por EDS nesses pontos poderia esclarecer essa formação.

Figura 59 – Microestrutura do CPVCR-040 aos 84 dias: magnificação de (a) 1000x, (b) 2000x e (c) 5000x



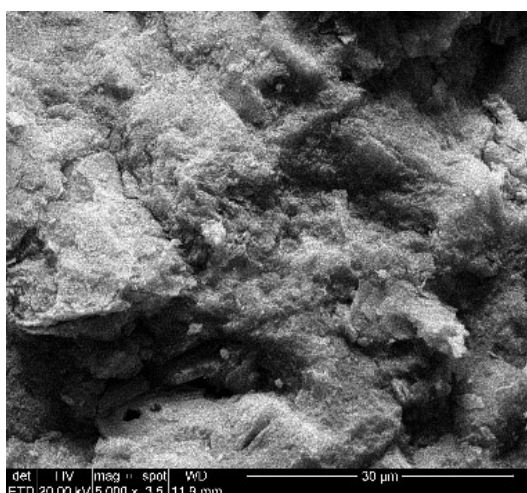
(c)  
Fonte: Elaborada pela autora.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, verifica-se a microestrutura do concreto CPVCR-040. Observa-se  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (cristais hexagonais de hidróxido de cálcio), da hidratação do cimento gel de C-S-H (silicato de cálcio Hidratado). Uma formação distinta das habitualmente observadas em pasta de cimento hidratada é a que aparece na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b), na forma de renda, provavelmente devida ao aditivo cristalizante.

Figura 60 – Microestrutura do LC<sup>3</sup>-040 aos 84 dias: magnificação de 5000x

Fonte: Elaborada pela autora.

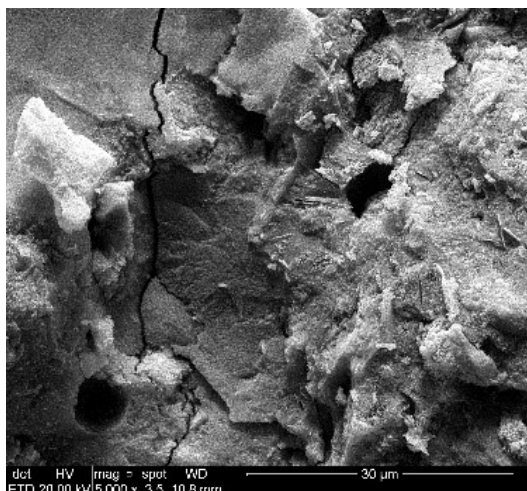
Na Figura 60, evidencia-se uma maior densidade e compactação em relação à microestrutura observada em CPV-040 e CPVCR-04. Essa maior compactação pode ser atribuída aos produtos formados nas reações do metacaulim com o CH da hidratação do cimento, bem como com os carbonatos do fíler calcário. As reações promovidas pelo metacaulim na microestrutura dos concretos também geram maior homogeneidade, o que justifica os benefícios técnicos normalmente obtidos com a utilização pozolanas na fabricação de concretos. Essa característica da microestrutura justifica o menor selamento das fissuras nos concretos com LC<sup>3</sup>. A mesma compactação e homogeneidade é observada na Figura 61, que apresenta a microestrutura do concreto LC<sup>3</sup>CR-040.

Figura 61 – Microestrutura do LC<sup>3</sup>CR-040 aos 84 dias: magnificação 5000x

Fonte: Elaborada pela autora.



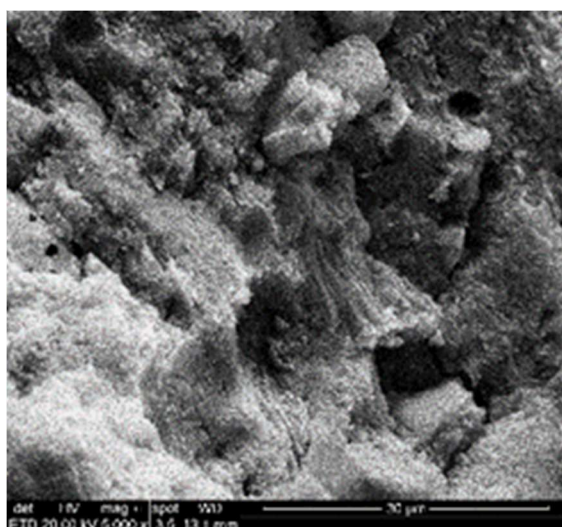
Figura 62 – Microestrutura do FCV-040 aos 84 dias: magnificação 5000x



Fonte: Elaborada pela autora.

Ao avaliar a microestrutura das amostras compostas com cinza volante (Figura 62) sem aditivo cristalizante, observou-se a presença de estrutura compacta, não sendo possível visualizar a presença de hidróxido de cálcio, indicando seu consumo pela CV. Porém, observa-se vazios circulares, que podem ser da própria microestrutura da cinza volante.

Figura 63 – Microestrutura do FCVCR-040 aos 84 dias: magnificação 5000x



Fonte: Elaborada pela autora.

É possível verificar, Figura 63, observa-se a microestrutura do traço FCVCR-040, com CV e cristalizante, observa-se uma microestrutura bastante compacta, a exemplo do LC<sup>3</sup>. Ou seja, a presença de pozolanas faz com que a disponibilidade de produtos para colmatar as fissuras seja menor, em função do consumo de CH.

## 5 CONCLUSÃO

Na sequência, apresenta-se as principais conclusões, resultantes das análises de dados dentro do escopo proposto para essa pesquisa, bem como sugestões para futuros trabalhos.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo buscou avaliar o comportamento de concretos na capacidade de autocicatrização de fissuras produzidos com diferentes materiais cimentícios suplementares. Nesse sentido, com base nos resultados obtidos e restrito aos escopos desse trabalho, pode-se tecer os comentários finais que seguem.

Quanto ao objetivo **“analisar a influência de traços com diferentes relações água/cimento e consumo de cimento na capacidade de autocicatrização dos concretos”**, é possível afirmar que o maior consumo de cimento presente nos concretos a medida que a relação água/cimento diminui proporciona índices de cicatrização maior, pois o aporte de produtos hidratados possíveis de migrarem para as fissuras é maior.

Em relação ao objetivo **“analisar o efeito da interação entre o aditivo cristalizante e diferentes materiais cimentícios suplementares com a relação água cimento na capacidade de autocicatrização dos concretos”**, observou-se que o seu efeito é maior nos concretos sem a presença de MCS ativos, bem como nos concretos de maior consumo de cimento. O aditivo cristalizante contribuiu, nessas condições de forma efetiva para a autocicatrização.

Respondendo ao objetivo **“avaliar as resistências mecânicas e a absorção de água dos concretos confeccionados com aditivo cristalizante e diferentes MCS”**, destaca-se que na relação água/cimento 0,40 os concretos, em média, apresentaram taxa de absorção capilar semelhantes, com exceção do LC<sup>3</sup> que retornou a menor taxa. O efeito combinado de cristalizante e LC<sup>3</sup>, em média, não altera o comportamento do LC<sup>3</sup>, exceto na relação a/c 0,5 em que a presença de cristalizante aumentou significativamente a taxa de absorção de água capilar. No caso da CV, sempre que há interação com o cristalizante as taxas de absorção diminuem. No que se refere à resistência à compressão, em geral o comportamento seguiu o esperado, havendo um aumento significativo de resistência, principalmente na relação a/c 0,40, quando se incorpora aditivo cristalizante. Esses aspectos indicam que o aditivo

cristalizante parece modificar a porosidade da matriz cimentícia, refletindo também na capacidade de cicatrização dos concretos.

O índice mecânico de cicatrização foi calculado a fim de responder ao objetivo **“avaliar a relação entre as propriedades mecânicas e a taxa de recuperação autocicatrização”**, e pode ser concluído, no escopo desse trabalho que, em geral, os melhores índices de cicatrização retornam os melhores índices mecânicos.

Este estudo permitiu **“analisar a viabilidade do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, para detectar a autocicatrização do concreto”** medindo a tendência de comportamento à cicatrização, sendo mais homogêneos os resultados aos 14 dias, em geral, e em concretos de menor porosidade, como é o caso dos concretos com relação a/c 0,40.

Em relação as imagens obtidas para **“analisar a estrutura formada nos concretos pela microscopia eletrônica de varredura (MEV)”** com auxílio do equipamento possibilitou observar desenvolvimento de produtos de hidratação a partir de uma formação primária dos cristais no traço referência CPV-040, no traço CPVCR-040 com aditivo cicatrizante observa cristais hexagonais de hidróxido de cálcio. Já no traço ternário com metacaulim LC<sup>3</sup> apresentou uma estrutura compacta e LC<sup>3</sup>-040 menor absorção de água por capilaridade e LC<sup>3</sup>CR-040 maior resistência à compressão. Já no traço composto com cinza volante e aditivo cicatrizante FCVCR-040 também apresentou microestrutura compacta e se destacando redução no fechamento da fissura na FCVCR-050.

Por fim, esse trabalho permitiu analisar a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos com cimento CPV-ARI, com substituições de MCS, sem e com aditivos cristalizantes, e três relações a/c (0,40, 0,50 e 0,60), apresentando evidências positivas por conta dos resultados obtidos, com destaque para o aditivo cristalizante. Para os concretos com LC<sup>3</sup>, apesar da menor taxa de cicatrização, observou-se uma maior compactidade, o que pode ser benéfico para a durabilidade de concretos com fissuras.

## 5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as lacunas identificadas ao longo do estudo, sugere-se para estudos futuros:

- a) realizar estudos comparativos entre outros tipos de cimentos, com outros teores de aditivo cristalizante;
- b) aprofundar o estudo na microestrutura do concreto contendo aditivo cristalizante e MCS;
- c) avaliar a influência de diferentes tipos de cura em concretos submetidos ao pré-carregamento;
- d) repetir os mesmos traços e usar outros tipos de ensaio para avaliação da autocicatrização;
- e) aprofundar o estudo em concretos com consumo de cimento menor do que o estudado nesta pesquisa, para obter o limite inferior onde o concreto ainda possa ser considerado durável.

## REFERÊNCIAS

- ABO-QUDAIS, S. A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and building materials**, v. 19, n. 4, p. 257-263, 2005.
- AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today; concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, 2000.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 201**: guide to durable concrete. Farmington Hills: ACI, 2008
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 212**: report on chemical admixtures. Farmington Hills: ACI, 2010. cap. 15.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 318**: building code requirements for structural concrete. Michigan: ACI, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM C618**: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Filadélfia: ASTM, 2019.
- AQEL, M.; PANESAR, D. K. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 359-368, 2016.
- ARVANITI, E. C. *et al.* Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, p. 3687-3701, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142**: Concreto — determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Material pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13956**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916**: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16917**: Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16973**: Agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9479**: Argamassa e concreto – câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833**: Concreto — concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 18**: Cimento Portland – análise química – determinação de perda de fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 248**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland limestone cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 17–31, 2019.
- BADOGIANNIS, E. G. *et al.* Durability of metakaolin self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 133-141, 2015.
- BARBALHO, E. A.; SILVA, E. F.; RÊGO, J. H. S. Estudo da proporção de argila calcinada e fíler calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. **Revista Matéria**, v. 25, 2020.
- BARSI, A. D. S.; TREZZA, M. A.; IRASSAR, E. F. Comparison of dolostone and limestone as fíler in blended cements. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 25, p. 243-253, 2020.
- CAMPS, J. P.; LAPLANCHE, A.; AL RIM, K. Corrosion of concrete by sequestering agents of detergents. In: **Protection Of Concrete, 1990**. Proceedings... Dundee: University of Dundee, 1990. 1 v., p. 63-73.
- CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CAVALCANTI, D. J. D. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- CECEL, R. T. **Influência do uso de fíler calcário como material cimentício suplementar nas propriedades de fratura de pastas de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- CEN - European Committee for Standardization EN 197-1 **Cement - Part 1: Composition**, specifications and conformity criteria for common cements.
- CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos e dispersantes em pastas de geopolímeros produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- ÇOPUROĞLU, O. *et al.* **Experimental techniques used to verify healing** – state-of-the-art report of RILEM. Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material, 2013.

COSTA JUNIOR, M. P.; PINHEIRO, S. M. Durability analysis of reinforced concrete with loading induced cracks. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 17-37, 2021.

COURARD, L.; MICHEL, F.; PIERARD, J. Influence of clay in limestone fillers for self-compacting cement based composites. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1356-1361, 2011.

CREMONINI, R. *et al.* Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 1998, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: IBRACON, 1998.

DE BELIE, N. *et al.* A review of self-healing concrete for damage management of structures. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1-28, 2018.

DE ROOIJ, M. *et al.* **Self-healing phenomena in cement-based materials**. 1. ed. Holanda: Springer, 2013.

DHANDAPANI, Y. *et al.* Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 136-151, 2018.

EDVARDESEN, C. K. **Water permeability and self-healing of through-cracks (in German)**. Berlim, Alemanha: DAfStb Bull, 1996.

ELSALAMAWY, M. *et al.* Performance of crystalline forming additive materials in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.

ESTEVEZ, I. C. **Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade de concretos convencionais fissurados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. Characterization of fly ashes: potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

FERRARA, L. *et al.* Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: a state of the art report by COST Action SARCOS WG2. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 115-142, 2018.

FERRARA, L. Self-healing cement-based materials: an asset for sustainable construction industry. **Materials Science Edition**, v. 442, n. 1, 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **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. **Smart Materials and Structures**, v. 25, p. 1-17, 2016.



FERRARIS, C. F.; KARTHIK, H. O.; RUSSELL, H. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 245-255, 2001.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana de casca do arroz, filler calcário e adição de cal hidratada**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769-781, 2016.

GARCIA, E. *et al.* Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 251-258, 2015.

GATO, M. C. S. *et al.* Self-regeneration of cracks in concrete from a bacteria culture. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021.

GCCA - GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION **Cement and Concrete Industry: 2050**

GORNINSKI, J. P.; DAL MOLIN, D. C. C., KAZMIERCZAK, C. S., Strength degradation of polymer concrete in acidic environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 8, p. 637-645, 2007.

GORNINSKI, J. P.; KAZMIERCZAK, C. S., Avaliação da resistência química de concretos poliméricos em ambientes agressivos. **Ambiente Construído**, v. 8, n.1, p. 105-113, 2008.

GRANDCLERC, A. *et al.* Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 105, p 126-133, 2018.

GUZLENA, S.; SAKALE, G. Self-healing concrete with crystalline admixture – a review. **Materials Science and Engineering**, v. 34, n. 5, p. 1143-1154, 2019.

HAN, F. *et al.* Hydration heat of slag or fly ash in the composite binder at different temperatures. **Thermochimica Acta**, 655, p. 202-210, 2017.

HASUI, Y. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Editora Beca Especial, 2013.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 168-177, jun. 2015.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

IKUMI, T. Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. **Materials and Design**, v. 89, p. 1147-1160, 2016.

JCI – TC075B. State-of-the-art report of the JCI technical committee TC-075B: autogenous healing in cementitious materials. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS: PERFORMANCE, INNOVATIONS AND STRUCTURAL IMPLICATIONS – CONMAT'09, 4., Nagoya, Japão, 2009. **Anais** [...]. Nagoya: [s.n.], 2009. p. 89-96.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 57, p. 116-127, 2015.

KANG, S. H.; HONG, S. G.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-highperformance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 389-400, 2019.

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 541-549, 2004.

KAVITHA, O. R. *et al.* Fresh, micro-and macrolevel studies of metakaolin blended selfcompacting concrete. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 370-374, 2015.

KAZMIERCZAK, C. S. Avaliação da resistência química de concretos poliméricos em ambientes agressivos. **Ambiente Construído**. v. 8, n. 1, p. 105-113. 2008.

KOÇAK, Y. Effects of metakaolin on the hydration development of Portland–composite cement. **Journal of Building Engineering**, v. 31, 2020.

KOU, S. C.; POON, C. S.; AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 788-795, 2011.

KRISHNAN, S. *et al.* Industrial production of limestone calcined clay cement: experience and insights. **Green Materials**, v. 7, n. 1, p.15-27, 2019.

KULAKOWSKI, M.P.; VIEIRA, F.P.; DAL MOLIN, D.C.C. **Relatório Convênio Camargo Correa Industrial**. Porto Alegre: NORIE/CPGEC/UFRGS, 1997.

LAM, L.; WONG, Y. L.; POON, C. S. Degree of hydration and gel/space ratio of highvolume fly ash/cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 747- 756, 2000

LE, H. T.; LUDWIG, H. M. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, v. 89, p. 156-166, 2016.

LEFEVER, G. *et al.* Self-healing assessment of cementitious mortars through ultrasonic monitoring. **Cement and Concrete Composites**, v. 133, p. 104683, 2022.

LINS, D. N. **Análise da resistência à compressão do cimento LC<sup>3</sup> e a influência das adições minerais em seu desempenho**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LIU, Y. *et al.* Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin. **Applied Clay Science**, v. 143, p. 159-167, 2017.

MADANDOUST, R.; MOUSAVI, Y. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 752-760, 2012.

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

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo, BARRETO, Richard Rodrigues, JUNIOR, Paulo Roberto Ribeiro Soares, PINHEIRO, Ivete Peixoto e BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. **Rejeito da indústria de magnésio metálico para substituição parcial do cimento Portland**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v. 13, n. 6, p. 1-9, 2020.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Resíduo de cerâmica vermelha e filer calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação alcalisilica. **Matéria**, v. 21, n. 2, p. 282-300, 2016.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

RILEM 221-SHC: Self-healing phenomena in cement-based materials. (2013). **Materials and Structures**. Vol 1, 256 p.

MOHAMMED, S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: a review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10-19, 2017.

MORAES, R. C. Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

MOREIRA, C.; RÊGO, J. H. S. Effect of gypsum content on the compressive strength of LC<sup>3</sup> Cement. *In*: MARTIRENA, J.; ALUJAS, A.; AMADOR, M. (eds). Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete. 1 ed. **RILEM Bookseries**, v. 22, p. 133-139, 2019.

MOREIRA, M. *et al.* Uso de aditivo redutor de permeabilidade em lajes de subpressão – caso Habitar – DF. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES – CBPAT, NÚMERO DA EDIÇÃO, 2016, Belém. Anais [...].* Belém: ALCONPAT, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

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

OLIVEIRA, F. T. *et al.* Influence of the limestone type on the compression strength of LC<sup>3</sup> cements. *In: MARTIRENA, J.; ALUJAS, A.; AMADOR, M. (eds). Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete*. 1. ed. **RILEM Bookseries**, v. 22, p. 39-45, 2019.

OLIVEIRA, I.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 43, p. 95-104, 2013.

PANESAR, D. K.; ZHANG, R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: limestone fillers and supplementary cementing materials – a review. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 01-15, 2020.

PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK T. H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 5, p. 842-849, 2005.

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete – application for precast industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 50-57, 2013.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou da substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Materiais e estruturas), Universidade Federal do Paraná, 2015.

RAVITHEJA, A.; REDDY, T. C. S.; SASHIDHAR, C. Self-healing concrete with crystalline admixture – a review. **Materials Science Edition**, v. 34, p. 1143-1154, 2019.

REGATTIERI, C. E. X.; SILVA, M. G.; HELENE, P. Influência do tipo de cimento na resistência, na absorção capilar e na difusão de cloretos dos concretos plásticos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. Anais [...].* São Paulo: ABCP, 1999.

REINHARDT, H. W. *et al.* **Recovery against environmental action** – state-of-the-Art Report of RILEM. *In*: RILEM TC 221 SHC. **Self-healing phenomena in cement-based materials**. [S.l.]: Springer, 2013.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability – concrete durability – an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 32, n. 4, p. 174-179, 1999.

RILEM TC 221 SHC. **Self-healing phenomena in cement-based materials**. Londres: Springer, 2013.

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

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

ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 11, p. 1033-1043, 2009.

SCRIVENER, K. *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49-56, 2018.

SCRIVENER, K. L. **Options for the future of cements**. The Indian Concrete Journal. Vol. 88, pag. 11–21, 2014

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 121-129, 2014

SHIMA, B. K. *et al.* Cementitious materials for crack self-healing concrete. **Journal of Ceramic Processing Research**, v. 16, p. 01-13, (2015).

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary cement materials**. Nova York: Springer, 2011.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Is concrete healing really efficient? – a review. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 257-273, 2019.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVA, P. R.; BRITO, J. Experimental study of the porosity and microstructure of selfcompacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 101-112, 2015.

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

STAATS, V. **Avaliação da durabilidade de concretos de alto desempenho frente ao ataque químico com vistas ao ambiente de ETE**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

SULEIMAN, A. R.; NEHDI, M. L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 111, p. 197-208, 2018.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; VIDAL, T. Durability of the ultra high performance concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 980-987, 2016.

TAKAGI, E. M.; ALMDEIRA, W. J.; OLIVEIRA, F. S. **Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2007, Florianópolis. Anais Florianópolis, Ed. IBRACON, 2007.

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

TAYEBANI, B.; MOSTOFINEJAD, D. Self-healing bacterial mortar with improved chloride permeability and electrical resistance. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 75-86, 2019.

TERMKHAJORNKIT, P. *et al.* Self-healing ability of fly ash-cement systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 195-203, 2009.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de cloretos**. 2011. 198 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 2015.

VAN MULLEM, Tim *et al.* Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: an inter-laboratory study on concrete with macrocapsules. **Science And Technology Of Advanced Materials**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 661-682, 31 jan. 2020.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Autogenous healing of cracks in cementitious materials with varying mix compositions. *In: International Conference On Self-Healing Materials*, 2., 2009, Chicago, IL, USA, 2009.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BIELE, N. Self-healing in cementitious materials – a review. *Materials*, v. 6, p. 2182-2217, 2013.

VEJMELOVÁ, E. *et al.* Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 3, p. 1325-1331, 2011.

VENQUIARUTO, S.D. **Influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 133p.

VIEIRA, S. P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo. ROADMAP tecnológico do cimento: **Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, v. 64, p. 2019, 2019.

WANG, D. *et al.* A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 659-672, 2018.

WANG, K. *et al.* F. Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 27, p. 381-393, 1997.

WANG, X. F. *et al.* Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: a review. *Construction and Building Materials*, v. 212, p. 400-421, 2019.

WEI, J.; GENCTURK, B. Hydration of ternary Portland cement blends containing metakaolin and sodium bentonite. *Cement and Concrete Research*, v. 123, p. 105-772, 2019.

YU, J.; WU, H.; LEUNG, C. K. Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength engineered cementitious composites (ECC). *Journal Of Cleaner Production*, v. 262, p. 01-11, 2020.

YUAN, L. *et al.* Research on the improvement of concrete autogenous self-healing based on the regulation of cement particle size distribution (PSD). *Materials*, v. 12, p. 01-20, 2019.

ZHANG, J. *et al.* Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 610-617, 2017.

- ZHANG, Q. *et al.* Effects of different catalysts on the structure and properties of polyurethane/water glass grouting materials. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, p. 01-11, 2018.
- ZHANG, W. *et al.* Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. **Composites Part B: Engineering**, v. 189, p. 01-28, 2020.
- ZHANG, W.; WANG, D.; HAN, B. Self-healing concrete-based composites. **Self-Healing Composite Materials**, v. 15, p. 259-284, 2020.
- ZHANG, Z.; QIAN, S.; MA, H. Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 17-23, 2014.
- ZONGJIN LI ZHU DING. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 579-584, 2003.