

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

LEONARDO MASIERO GIL

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS CONTENDO
CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³: DESENVOLVIMENTO E IMPACTO NA
DURABILIDADE**

**São Leopoldo
2025**

LEONARDO MASIERO GIL

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS CONTENDO
CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³: DESENVOLVIMENTO E IMPACTO NA
DURABILIDADE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof.^a Dra. Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pacheco

São Leopoldo
2025

G463a Gil, Leonardo Masiero.
Avaliação da autocicatrização em concretos contendo cimentos ternários do tipo LC³ : desenvolvimento e impacto na durabilidade / Leonardo Masiero Gil. – 2025.

162 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.
“Orientadora: Prof.^a Dra. Marlona Piva Kulakowski
Coorientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Pacheco”.

1. Cimento ternário do tipo LC³. 2. Fissura. 3. Autocicatrização.
4. Durabilidade. 5. Concreto. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

LEONARDO MASIERO GIL

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS CONTENDO
CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³: DESENVOLVIMENTO E IMPACTO NA
DURABILIDADE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovado em 10 de junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Geilma Lima Vieira – PPGEC/UFES

Prof. Dr. Maurício Mancio – PPGEC/Unisinos

Prof. Dra. Fernanda Pacheco – itt Performance/Unisinos

Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski – PPGEC/Unisinos

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Dedico esse trabalho ao Leonardo de 20 anos atrás, que se escondia por ser diferente e por isso tinha medo de não ser capaz de conquistar seus sonhos. Você está alcançando muito mais do que imaginou.

AGRADECIMENTOS

Em momentos de grandes desafios e várias incertezas, como na trajetória de uma dissertação de mestrado, a presença de certas pessoas possibilitou maior leveza e segurança para trilhar esse caminho. Acredito que sou privilegiado de dispor de uma rede de pessoas que me apoiam nas diversas decisões que eu tomo, sendo assim gostaria de expressar em palavras a minha gratidão à essas pessoas.

Gostaria de começar agradecendo meus pais, Maxemina e Raul, que durante toda a minha vida lutaram para me proporcionar as melhores oportunidades na vida. Agradeço também por todos os ensinamentos, amor e apoio emocional, me ajudando a manter a calma em momentos decisivos, além da ajuda na execução do programa experimental. Concomitantemente, agradeço ao meu irmão Augusto, colega de profissão, que sempre me ajudou com conselhos e experiências de alguém que já passou por momentos semelhantes.

Às minhas orientadoras Profª. Dra. Marlova e Profª. Dra. Fernanda, por acreditarem no meu potencial para execução do trabalho e por todo o conhecimento compartilhado ao longo dessa trajetória. Vocês são pesquisadoras incríveis que admiro muito e utilizo como espelho para o meu futuro. Obrigado também por escutarem e me auxiliarem em momentos de insegurança, me guiando para as soluções.

Aos meus colegas da Votorantim Cimentos (os quais não conseguirei citar todos pois são muitos) por além de serem profissionais esplêndidos e inspirações, serem ótimos amigos, tornando a rotina mais leve e descontraída, me incentivando a vencer os desafios e escutando alguns dos meus desabafos. Gostaria de agradecer especialmente aos meus gestores Maurício Bianchini e João Ramos, que me incentivaram muito nessa trajetória e não mediram esforços para me apoiar.

Aproveito para também agradecer à Julia Costa e ao João Borowski do Núcleo Orientado para a Inovação da Construção (NORIE) pela simpatia, bondade e conhecimentos compartilhados, além das orientações na execução dos ensaios realizados dentro da UFRGS.

Aos meus amigos, Nathália Bangel, Jéssica de Moraes, Brenda Hencker, Isadora Müller, Rodrigo Ebling, Eduarda Foscarini, Igor Bernardes e Laura Arbo, que estão presentes em grande parte da minha vida e sempre entenderam minha

ausência, me ajudando a descontrair durante os momentos de grande insegurança e ansiedade.

À Pozolana, minha filha de quatro patas, que me escolheu para ser seu tutor no momento mais conturbado do estado do Rio Grande do Sul, durante as enchentes. O que era para ser temporário se tornou definitivo, e ela foi responsável por tornar minha casa em um lar, me dando amor e carinho mesmo em dias com temperatura de 40ºC.

Por fim, agradeço a empresa Votorantim Cimentos, Chryso e Metacaulim Brasil pela disponibilização dos materiais empregados na pesquisa.

*"Cause there were pages turned with the bridges burned
Everything you lose is a step you take
So make the friendship bracelets, take the moment and taste it
You've got no reason to be afraid
You're on your own, kid
Yeah, you can face this
You're on your own, kid
You always have been"*

(SWIFT, 2022).

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o fenômeno de autocicatrização, bem como seu impacto na durabilidade, de concretos contendo cimentos ternários do tipo LC³. Para tanto desenvolveu-se traços de concreto com três relações água/cimento diferentes empregando, além do cimento LC³, o cimento CPV ARI, de forma a proporcionar um comparativo entre ambos. A fissuração das amostras foi feita pelo ensaio de compressão diametral, com dispositivo limitador de abertura, na idade de 7 dias e o procedimento de cura adotado foi submerso em água por um período de 42 dias. A autocicatrização foi avaliada através da análise de imagem das fissuras por microscopia, do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica e do ensaio de penetração de água sob baixa pressão. Todos os traços de concreto também tiveram corpos de prova moldados destinados ao ensaio de resistência à compressão. Para a análise de durabilidade, além do estudo da penetração de água, identificou-se a quantidade de material presente na fissura, antes e após ensaio, buscando entender sua capacidade de permanência. O material formado na superfície das fissuras foi coletado e caracterizado quanto sua mineralogia através do ensaio de difração de raios-x (DRX). O cimento ternário do tipo LC³ dispõe de capacidade autocicatrizante, entretanto num patamar menor quando comparado ao cimento CPV ARI, nas condições desse trabalho. A cicatrização máxima alcançada por traços com LC³ foi de 64,5% e para o cimento CPV ARI 76,9%. Grande parte do material formado nas fissuras cicatrizadas permaneceu após a ação da água, para ambos os cimentos analisados, indicando sua provável contribuição para a durabilidade. Nos produtos de cicatrização foi identificado a presença de C-S-H, Ca(OH)₂ e CaCO₃ para o cimento CPV ARI, e as mesmas fases cristalinas para o LC³, entretanto com a presença também de C-A-S-H e AFm. Referente à resistência à compressão visualizou-se um desempenho superior do cimento LC³. Tais comportamentos encontrados no trabalho provavelmente estão atrelados ao fato de que o cimento ternário do tipo LC³ culmina na formação de produtos de hidratação mais estáveis e uma matriz cimentícia mais densa, o que dificulta a migração e percolação desse material até as fissuras analisadas, e beneficia o desenvolvimento de resistência à compressão.

Palavras-chave: cimento ternário do tipo LC³; fissura; autocicatrização; durabilidade; concreto.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the self-healing phenomenon and its impact on the durability of concretes containing ternary cements of the LC³ type. For this purpose, concrete mixes with three different water/cement ratios were developed, using, in addition to the LC³ cement, the CPV ARI cement, in order to provide a comparison between both. The cracking of the samples was made by the diametrical compression test, with an opening limiter device, at the age of 7 days, and the curing procedure adopted was submerged in water for a period of 42 days. Self-healing was evaluated through the analysis of crack images by microscopy, the ultrasonic wave propagation velocity test and the low-pressure water penetration test. All concrete mixes also had molded specimens intended for the compressive strength test. For the durability analysis, in addition to the study of water penetration, the amount of material present in the crack was identified, before and after the test, in order to understand its permanence capacity. The material formed on the surface of the cracks was collected and characterized in terms of its mineralogy through the X-ray diffraction (XRD) test. Ternary cement of the LC³ type has self-healing capacity, although at a lower level when compared to CPV ARI cement, under the conditions of this study. The maximum healing achieved by mixtures with LC³ was 64.5% and for CPV ARI cement it was 76.9%. Much of the material formed in the healed cracks remained after the action of water, for both cements analyzed, indicating its probable contribution to durability. The presence of C-S-H, Ca(OH)₂ and CaCO₃ was identified in the healing products for CPV ARI cement, and the same crystalline phases for LC³, however with the presence also of C-A-S-H and AFm. Regarding compressive strength, a superior performance of LC³ cement was observed. Such behaviors found in the study are probably linked to the fact that ternary cement of the LC³ type culminates in the formation of more stable hydration products and a denser cementitious matrix, which hinders the migration and percolation of this material to the cracks analyzed, and benefits the development of compressive strength.

Key-words: ternary cement of LC³ type; crack; self-healing; durability; concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção anual mundial dos principais empregados pela construção civil	25
Figura 2 – Emissão mundial de CO ₂ da indústria cimenteira	26
Figura 3 – Emissões de gases de efeito estufa associados a produção do concreto	27
Figura 4 – Número de publicações acerca da autocicatrização ao longo dos anos ..	31
Figura 5 – Avanço do mecanismo de corrosão nas estruturas de concreto armado ..	36
Figura 6 – Principais processos relacionados ao mecanismo autogênico da autocicatrização	41
Figura 7 – Principais componentes formados na cicatrização e influência da maior disponibilidade de íons Ca ²⁺ na mineralogia dos produtos formados.....	43
Figura 8 – Representação do mecanismo de precipitação do CaCO ₃ na autocicatrização	44
Figura 9 – Metodologia adotada por Cappellessi (2018) na fissuração do corpo de prova	48
Figura 10 – Metodologia adotada por Xiao <i>et al.</i> (2023) para a determinação do coeficiente de permeabilidade.....	49
Figura 11 – Representação da metodologia adotada por Tsangouri <i>et al.</i> (2022) para a determinação do coeficiente de velocidade de propagação do ultrassom	50
Figura 12 – Metodologia adotada por Tsangouri <i>et al.</i> (2022) para a determinação do coeficiente de permeabilidade de água.....	51
Figura 13 – Metodologia empregada por Huang, Ye e Damidot (2013) para caracterização dos produtos de cicatrização.....	55
Figura 14 – Aplicação da metodologia desenvolvida por Huang, Ye e Damidot (2013) por Namnoum <i>et al.</i> (2021).....	56
Figura 15 – Ilustração do procedimento prescrito pela ASTM C1202	58
Figura 16 – Ilustração do procedimento prescrito pela DIN 1048.....	59
Figura 17 – Ilustração do procedimento adotado por Anglani <i>et al.</i> (2022) em seu estudo	60
Figura 18 – Metodologia empregada por Ma, Qian e Zhang (2014).....	61
Figura 19 – Ilustração do procedimento adotado por Cuenca, Postolachi e Ferrara (2023)	62

Figura 20 – Comparativo entre emissões de CO ₂ do cimento ternário LC ³ -50 e os demais cimentos brasileiros	66
Figura 21 – Cinética da reação das fases do clínquer ao longo do tempo	70
Figura 22 – Calorimetria típica de um cimento LC ³ comparado com um cimento referência	72
Figura 23 – Resultados de porosidade e absorção de composições binárias contendo argila calcinada	73
Figura 24 – Porosidade de composição de LC ³ composta por metacaulim com diferente quantidade de calcinação em (a) 1 dia e (b) 7 dias	74
Figura 25 – Resultados de resistência à compressão de diferentes tipos de LC ³ comparados ao cimento referência	75
Figura 26 – Coeficiente de carbonatação para diferentes quantidades de CaO em mistura com LC ³ -50, cimento Portland (CP) e cimento Portland Pozolânico (PPC)..	76
Figura 27 – Potencial mitigador da reação álcali-agregado do cimento LC ³	77
Figura 28 – Resultados de teor de cloretos do cimento LC ³	78
Figura 29 – Resistência à compressão do estudo executado por Antoni <i>et al.</i> (2012)	79
.....	
Figura 30 – Resistência à compressão do LC ³ -50 com diferentes quantidades de caulinita	81
Figura 31 – Impacto do teore de caulinita da argila no teor de cloretos presentes em matriz composta com LC ³ em (a) 6 meses e (b) 18 meses	81
Figura 32 – Relação do cimento LC ³ e o cimento referência com diferentes teores de gipsita	83
Figura 33 – Análise em microscópio da matriz cimentícia contendo o cimento LC ³ do estudo realizado por Zhu <i>et al.</i> (2020).....	85
Figura 34 – Fluxograma do programa experimental proposto.....	87
Figura 35 – Cronologia de execução dos ensaios do programa experimental	88
Figura 36 – Contabilização dos corpos de prova necessários para a execução do estudo em questão.....	88
Figura 37 – Curva de distribuição granulométrica: (a) Areia Natural e (b) Areia de Britagem	92
Figura 38 – Curva de distribuição granulométrica da mescla de agregados miúdos	93
Figura 39 - Representação gráfica da composição granulométrica do agregado graúdo	94

Figura 40 – Resultados de consistência dos traços de concreto executados	97
Figura 41 – Corte dos corpos de prova em discos para análise da autocicatrização	98
Figura 42- Delimitação das diferentes seções para microscopia	98
Figura 43 – Procedimento de (a) fissuração do corpo de prova e (b) verificação da espessura máxima da espessura da fissura	100
Figura 44 – Registro do (a) ensaio de microscopia executado nos corpos de prova e (b) esquema ilustrativo da forma de em que ocorreram a captura das imagens.....	101
Figura 45 – Sistema de nomenclatura utilizada para facilitar o entendimento dos resultados.....	101
Figura 46 – Registros da (a) execução do ensaio de propagação ultrassônica e das (b) marcações realizadas no corpo de prova para as leituras	102
Figura 47 – Aparato desenvolvido por Costa (2024) para o ensaio de penetração de água sob baixa pressão	104
Figura 48 – Procedimento de retirada dos produtos de cicatrização para análise de DRX.....	105
Figura 49 – Resultados do ensaio de resistência à compressão	107
Figura 50 – Curvas de Abrams elaboradas a partir dos resultados de resistência à compressão.....	108
Figura 51 – Correlação entre o consumo de clínquer+gesso e resistência à compressão.....	109
Figura 52 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos com a análise de imagem das amostras	128
Figura 53 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtido com a análise de imagem das amostras.....	129
Figura 54 – Relação entre taxa de autocicatrização, obtida por análise de imagem, e consumo de clínquer+gesso	130
Figura 55 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos com o ensaio de velocidade de propagação ultrassônica	132
Figura 56 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtido com o ensaio de velocidade de propagação ultrassônica em função da relação a/c	132
Figura 57 – Relação entre a taxa de autocicatrização, obtida através do ensaio de velocidade de propagação ultrassônica, e o consumo de clínquer+gesso.....	133
Figura 58 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos pelas análises do ensaio de penetração de água sob baixa pressão das amostras.....	135

Figura 59 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtidas pelas análises do ensaio de penetração de água sob baixa pressão das amostras	135
Figura 60 – Difratograma de raios-x dos produtos de autocicatrização formados nos traços com a/c de 0,4	140
Figura 61 – Formação de produto de autocicatrização de coloração banca e em forma de estalactite	141
Figura 62 – Difratograma de raios-x dos produtos de autocicatrização formados nos traços com a/c de 0,6	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Mecanismos que podem gerar a autocicatrização das estruturas.....	33
Quadro 2 – Revisão acerca dos diferentes agentes de autocicatrização	34
Quadro 3– Limite de abertura de fissuras conforme NBR 6118 (ABNT, 2023)	38
Quadro 4 – Especificações de classe de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023)	38
Quadro 5 – Técnicas empregadas no encapsulamento de agentes cicatrizantes	40
Quadro 6 – Fatores que podem influenciar na autocicatrização	45
Quadro 7 – Classificação de diferentes aspectos que impactam na autocicatrização	45
Quadro 8 - Levantamento de ensaios utilizados para indução de fissuras em concreto	47
Quadro 9 – Visão geral das principais metodologias empregadas para acompanhar o processo de cicatrização e recuperação de propriedades mecânicas	53
Quadro 10 – Principais técnicas empregadas para análise dos produtos de cicatrização e seu objetivo	57
Quadro 11 – Visão geral das principais metodologias empregadas para avaliar a durabilidade de matrizes autocicatrizadas	63
Quadro 12 – Compostos envolvidos na hidratação do cimento Portland	67
Quadro 13 – Compilado da nomenclatura das fases cristalinas identificadas através do ensaio de DRX	139
Quadro 14 – Compilado da nomenclatura das fases cristalinas identificadas através do ensaio de DRX	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade no estudo de Gil (2022).....	85
Tabela 2 – Resultados de FRX do cimento e MCS empregados na pesquisa	90
Tabela 3 – Resultados da caracterização física do cimento e MCS utilizados na pesquisa	91
Tabela 4 – Composição granulométrica dos agregados miúdos empregados no estudo	92
Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos de caracterização dos agregados miúdos	92
Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo empregado no estudo	93
Tabela 7 – Resultados dos ensaios físicos de caracterização do agregado graúdo .	94
Tabela 8 – Traços utilizados para a confecção dos concretos analisados	95
Tabela 9 – Teor de aditivo utilizado para atingir a consistência desejada em cada traço	96
Tabela 10 – Compilado dos resultados de resistência à compressão.....	106
Tabela 11 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,4	110
Tabela 12 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,5	112
Tabela 13 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,6	114
Tabela 14 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,4	117
Tabela 15 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,5	120
Tabela 16 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,6	123
Tabela 17 – Resumo dos resultados obtidos com a análise de imagem.....	128
Tabela 18 – Resultados obtidos com a avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	131
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de penetração de água sob baixa pressão	134
Tabela 20 – Material mantido na fissura após ensaio de penetração de água a baixa pressão	136
Tabela 21 – Tabela com síntese dos resultados obtidos com a análise de autocicatrização das matrizes cimentícias	138
Tabela 22 – Resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão	160

Tabela 23 – Análises relacionadas ao ensaio de resistência à compressão.....	160
Tabela 24 – Quantificação da área das fissuras com base nos dados obtidos com a análise de imagem por microscopia	162
Tabela 25 – Resultados obtidos com o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos corpos de prova fissurados	163
Tabela 26 – Resultados obtidos com o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos corpos de prova íntegros	164
Tabela 27 – Resultados ensaio de penetração de água sob baixa pressão	165

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFm	<i>Aluminate ferrite mono</i>
AFt	<i>Aluminate ferrite tri</i>
C ₂ S	Silicato dicálcico ou belita
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico ou alita
C ₄ AF	Ferroaluminato tricálcico
C-A-S-H	Sílico aluminato de cálcio hidratado
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio ou Portlandita
CO ₂	Dióxido de carbono
CPI	Cimento Portland Comum
CPII E	Cimento Portland Composto com Escória
CPII F	Cimento Portland Composto com Fíler
CPIV	Cimento Portland Pozolânico
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
Hc	Hemicarboaluinato
K ₂ SO ₄	Sulfato de potássio
LC ³	<i>Limestone Calcined Clay Cement</i>
Mc	Monocarboaluminato
MCS	Material Cimentício Suplementar
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgSO ₄	Sulfato de magnésio
MPa	Megapascal
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NORIE	Núcleo Orientado para a Inovação da Construção
PIB	Produto Interno Bruto

UNISINOS Universidade do Vale do Rio dos Sinos
URFGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul
W_k Abertura característica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 JUSTIFICATIVA	24
1.2 OBJETIVOS	28
1.2.1 Objetivo geral	28
1.2.2 Objetivos específicos.....	28
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO.....	31
2.1.1 Origem das fissuras em matrizes cimentícias.....	35
2.1.2 Autocicatrização autônoma.....	39
2.1.3 Autocicatrização autógena.....	41
2.1.4 Metodologias relacionadas à verificação da autocicatrização.....	46
2.1.4.1 Métodos de fissuração e avaliação da autocicatrização de corpos de prova	47
2.1.4.2 Métodos de avaliação de produtos de hidratação formados em fissuras	55
2.1.4.3 Métodos de avaliação da durabilidade de matrizes autocicatrizadas	57
2.2 CIMENTO TERNÁRIO DO TIPO LC ³	65
2.2.1 Reações de hidratação	67
2.2.1.1 Cimento Portland.....	67
2.2.1.1 Cimento LC ³	70
2.2.1.1.1 Reação entre o hidróxido de cálcio e a argila calcinada.....	72
2.2.1.1.2 Reação entre argila calcinada e o carbonato de cálcio moído	73
2.2.2 Desempenho mecânico e durabilidade do cimento LC³	75
2.2.3 Fatores que impactam no desempenho do cimento LC³	79
2.2.3.1 Teor de clínquer na composição	79
2.2.3.2 Proporção entre argila calcinada e calcário.....	80
2.2.3.3 Teor de caulinita da argila calcinada	80
2.2.3.4 Finura dos elementos	82
2.2.3.5 Teor de gipsita.....	83
2.2.4 Estudos prévios indicando o potencial de cicatrização do cimento ternário do tipo LC³	84
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	87

3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA	89
3.2 MATERIAIS	90
3.2.1 Cimentos e materiais cimentícios suplementares	90
3.2.2 Agregado miúdo	91
3.2.3 Agregado graúdo	93
3.2.4 Aditivo	94
3.2.5 Água	95
3.3 MÉTODOS	95
3.3.1 Especificação dos traços	95
3.3.2 Produção das misturas de concreto.....	96
3.3.3 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test).....	96
3.3.4 Moldagem e preparação dos corpos de prova para análise mecânica e de autocicatrização	97
3.3.5 Cura dos corpos de prova	99
3.3.6 Ensaio de resistência à compressão.....	99
3.3.7 Fissuração dos corpos de prova	99
3.3.8 Avaliação da autocicatrização	100
3.3.8.1 Análise de imagem através de microscopia	100
3.3.8.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	102
3.3.9 Avaliação da durabilidade	Erro! Indicador não definido.
3.3.9.1 Penetração de água sob baixa pressão	Erro! Indicador não definido.
3.3.10 Caracterização dos produtos de hidratação.....	105
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	106
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	106
4.2 AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO.....	109
4.2.1 Análise de imagem através de microscopia	109
4.2.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica	131
4.3 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA MATRIZ CICATRIZADA.....	134
4.3.1 Penetração de água sob baixa pressão	Erro! Indicador não definido.
4.4 SÍNTSE E ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO.....	137
4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO	139
5 CONCLUSÕES	145

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	148
REFERÊNCIAS.....	149
ANEXO A – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	160
ANEXO B – QUANTIFICAÇÃO DA ÁREA DAS FISSURAS	162
ANEXO C – RESULTADOS DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA.....	163
ANEXO D – RESULTADOS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO.....	165
ANEXO E – BASE DE DADOS UTILIZADA PARA INTERPRETAÇÃO DOS DIFRATOGRAMAS	166

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência da grande utilização do concreto na construção civil, em cerca de 80% das estruturas, surge a necessidade constante de produzir obras cada vez mais duráveis e sustentáveis. Assim sendo, a comunidade científica desenvolve constantes estudos buscando novas tecnologias com o intuito de possibilitar a fabricação de materiais com elevada durabilidade, menor impacto ambiental possível e de custo cada vez mais reduzido (MARQUES *et al.*, 2020; VAN WYlick, 2022).

A preocupação acerca do impacto ambiental gerado pela indústria da construção civil vem sendo um tópico cada vez mais abordado no âmbito mundial, pois os volumes de extração recursos naturais não renováveis e de emissões de gases de efeito estufa são significativos. Destaca-se a indústria cimenteira, principalmente no que tange às emissões de dióxidos de carbono (CO₂), sendo a responsável por cerca de 7% de tais emissões. Assim sendo, várias soluções estão sendo estudadas e metas sendo estabelecidas, como por exemplo a redução de 25% das emissões de CO₂ proposta pela *Global Cement and Concrete Association* no acordo “Concrete Net Zero em 2050” que busca zerar as emissões de CO₂ geradas pela indústria do cimento até o ano de 2050 (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

Seguindo na linha de materiais mais eco-eficientes, pode-se citar os cimentos ternários do tipo LC³. Zunino, Martirena e Scrivner (2021) classificam o LC³ como uma família de cimentos, compostos de argila calcinada e calcário, em substituição a parte do clínquer. Lin, Han e Wang (2021) destacam que o emprego do cimento LC³ permite produzir concretos com resistências elevadas em idades avançadas, excelente durabilidade à penetração de cloreto e reação álcali-sílica e baixa emissão de CO₂. Os autores ainda destacam que o interesse em relação a esse tipo de cimento está, principalmente, atrelado ao fato de contar-se com elevada disponibilidade de jazidas de calcário e argila calcinada, que podem substituir até 50% do clínquer.

Embora o concreto seja preferencialmente utilizado para a construção de estruturas urbanas e obras de arte, ele possui algumas deficiências intrínsecas. Entre elas destaca-se a baixa resistência à tração, que ocasiona a necessidade do emprego de armaduras. Mesmo contendo esse reforço em sua composição, o concreto é submetido a condições de serviço e, principalmente, a ações do ambiente que podem culminar na formação de fissuras e microfissuras em sua estrutura. Além de acarretar

a perda de desempenho mecânico, as fissuras se tornam caminhos preferenciais para a penetração de agentes agressivos que podem ocasionar a deterioração da armadura (CAPPELLESSO *et al.*, 2023b).

Tendo esse cenário em vista, estudos relacionados à autocicatrização, em especial o mecanismo autogênico, tornam-se de grande valia. O interesse em relação ao assunto se deve ao fato de que o comportamento de autocicatrização autógena ocorre sem a necessidade de nenhuma intervenção externa. No fenômeno autogênico não há necessidade de incorporar nenhum material que irá agir propositalmente para este fim, uma vez que os produtos de hidratação dos materiais cimentantes do concreto contribuirão para a cicatrização (GHOSH, 2009; RILEM 221-SHC, 2013). De acordo com o levantamento realizado pela *Mordor Intelligence*, com base no período de 2018 a 2023, estima-se que para o ano de 2025 serão gastos cerca 2,52 bilhões de dólares com atividades relacionadas à reparos de concretos e argamassas, com previsão de atingir o valor de 3,3 bilhões de dólares no ano de 2030. Neste cenário de elevados gastos com reparos é possível entender o impacto positivo que a autocicatrização pode representar.

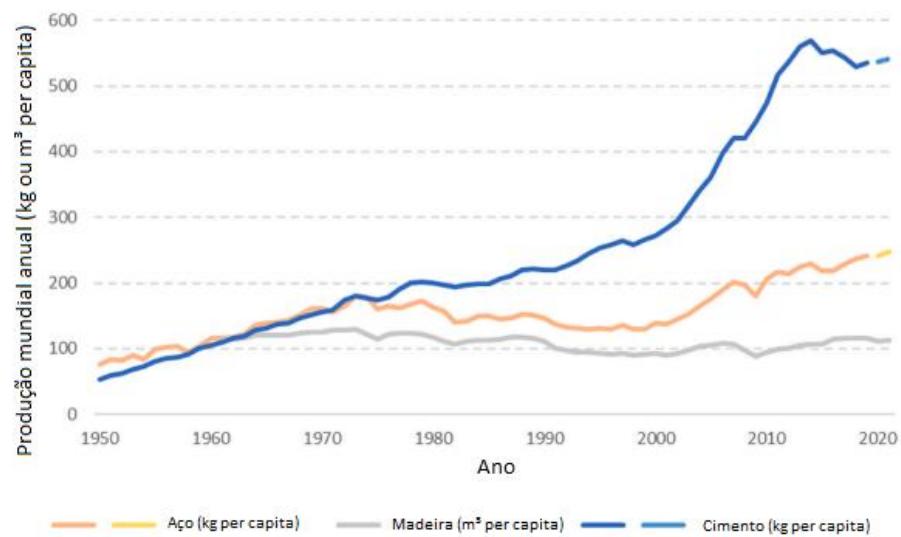
Assim sendo, o trabalho em questão foi desenvolvido buscando avaliar o fenômeno de autocicatrização de matrizes cimentícias compostas com o cimento LC³, além de seu impacto na durabilidade. Cabe ressaltar, que por não possuir ensaios normativos de análise da autocicatrização, o estudo possui caráter experimental, tendo como base os principais métodos empregados na bibliografia mais recente acerca da temática abordada.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é o material produzido pelo ser humano mais consumido no âmbito global. Tal demanda está intimamente ligada ao constante desenvolvimento da sociedade e o aumento exponencial da população nos últimos anos. que, consequentemente, culmina na urbanização das cidades. O emprego deste compósito nas construções é atrelado ao fato da sua excelente durabilidade, versatilidade em termos de formatos das edificações e ampla disponibilidade das suas matérias primas, que o tornam economicamente vantajoso (GRIFFITHS *et al.*, 2023; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MILLER *et al.*, 2018).

O componente principal do concreto, e responsável pelas suas principais características (endurecimento e desenvolvimento de resistência), é o cimento. De acordo com as informações levantadas por Supriya *et al.* (2023), a produção de cimento apresentou um crescimento de 54% entre os anos 2000 e 2006, saindo de um patamar de 1,6 bilhões de toneladas para 2,55 bilhões de toneladas, sendo que no ano de 2021 este indicador chegou à marca de 4,4 bilhões de toneladas. Os autores ainda destacam que existe uma estimativa de que para o ano de 2050 ocorra um aumento entre 12% e 25% na produção. Esse crescimento expressivo ocasionado ao longo dos anos pode ser observado no gráfico desenvolvido por Griffiths *et al.* (2023), apresentado na Figura 1, sendo possível destacar que os demais materiais utilizados na construção civil não dispuseram de crescimentos equivalentes.

Figura 1 – Produção anual mundial dos principais empregados pela construção civil

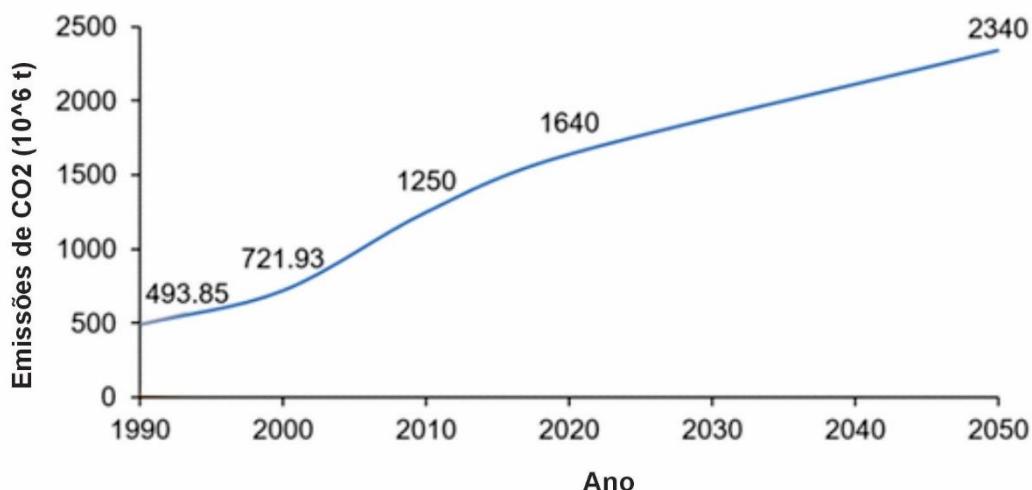


Fonte: Griffiths *et al.* (2023, p. 3), texto traduzido para o português

A preocupação em relação ao aumento exponencial do consumo de cimento está relacionada ao seu processo produtivo que emite uma grande quantidade CO₂. Para a produção do clínquer, principal componente do cimento, é necessário submeter a matéria prima à fornos com elevada temperatura, na ordem de 1450°C. Durante essa etapa ocorre a descarbonatação do calcário, procedimento responsável por 50% das emissões de CO₂ relacionados à produção do cimento. O restante das emissões está atrelado à utilização de combustível fóssil, cerca de 40% da quantidade emitida, e transporte e consumo de energia, aproximadamente 10% da quantidade emitida. Tendo esse cenário em vista, a indústria cimenteira foi responsável pela emissão de 2,9 bilhões de toneladas de CO₂ no ano de 2021, sendo responsável por cerca de 7%

das emissões totais desse gás (MILLER *et al.*, 2018; SUPRIYA *et al.*, 2023). Esse cenário destacado é ilustrado na Figura 2, desenvolvido pelos autores citados.

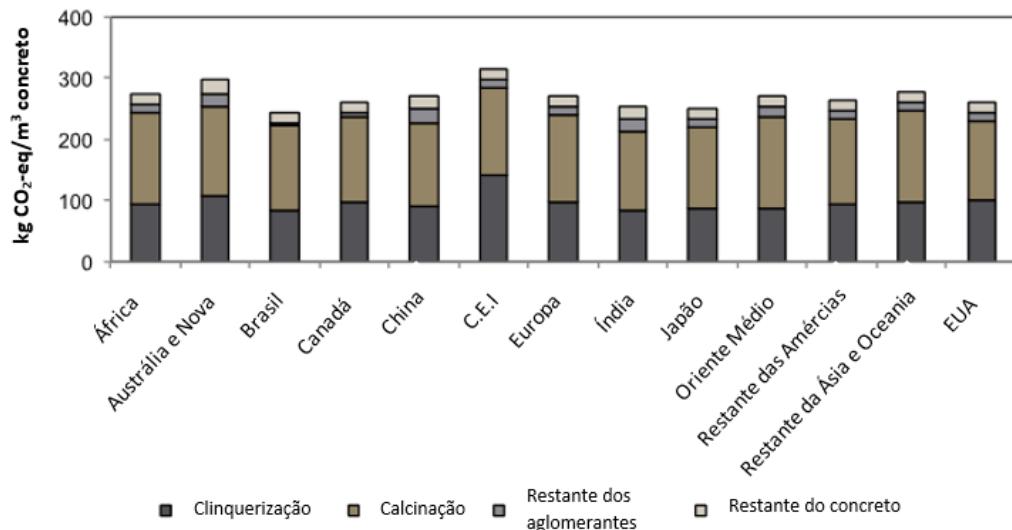
Figura 2 – Emissão mundial de CO₂ da indústria cimenteira



Fonte: Adaptado de Supriya *et al.* (2023, p. 2), texto traduzido para o português

Uma vez que o concreto é o material mais empregado na confecção das estruturas, e o cimento é o seu principal componente, o compósito também possui grande impacto ambiental (MILLER *et al.*, 2016). A Figura 3 indica que a maior parte de emissões de gases de efeito estufa do concreto são oriundos, justamente, da produção do cimento. Aliando a isso, o concreto é um material facilmente suscetível à formação de microfissuras e fissuras em função de suas características intrínsecas de baixa resistência à tração, o que pode comprometer sua resistência mecânica e sua durabilidade (VANTADORI *et al.*, 2018).

Figura 3 – Emissões de gases de efeito estufa associados a produção do concreto



Fonte: Miller *et al.* (2016, p. 02), texto traduzido para o português

A utilização de cimentos que apresentam materiais suplementares em substituição parcial ao clínquer é destacada por Miller *et al.* (2018) como muito promissora na redução do impacto ambiental, ressaltando a combinação de argila calcinada e pó de calcário (LC³). Quando a argila calcinada é adicionada ao cimento, juntamente com o fíler calcário, é possível observar uma boa interação entre os dois componentes, com elevada reatividade, possibilitando a produção de LC³ com substituição de até 50% do clínquer. Tendo tal cenário em vista, aliado ao fato da possibilidade de empregar resíduos que possuem uma quantidade satisfatória de caulim, o LC³ torna-se uma alternativa viável e sustentável (ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

De acordo com o cenário apresentado, destaca-se a extrema importância de construir estruturas com elevada durabilidade. Tal fato não está associado somente a redução de emissão de CO₂, atrelada a produção do cimento, mas também a extração de recursos naturais e geração de resíduos de construção (HOOTON; BICKLEY, 2014). Segundo Ghosh (2009), as estruturas com capacidade autocicatrizantes são uma realidade muito presente nas obras. Van Tittelboom e De Belie (2013) destacam que desde a publicação feita por White *et al.* em 2001 o interesse no desenvolvimento de pesquisas acerca deste tema cresceu expressivamente.

Ainda, é importante destacar que embora a autocicatrização e o cimento ternário do tipo LC³ sejam amplamente avaliados em pesquisas ao redor do mundo, ainda se possui pouco material acerca de ambos os temas juntos. Dentro desse

cenário pode-se destacar as pesquisas de Zhu *et al.* (2020), Gil (2022) e Wang *et al.* (2023) que demonstraram uma capacidade satisfatória em termos de autocicatrização do cimento LC³.

Levando em consideração os objetivos previamente estabelecidos neste trabalho e o cenário destacado, é possível entender a relevância da pesquisa. Isso se justifica porque o trabalho busca avaliar a durabilidade de matrizes cimentícias cicatrizadas compostas pelo cimento LC³, possuindo menor quantidade de clínquer em sua composição, acometido por um processo de cicatrização que não há necessidade de intervenção externa para ocorrer algum tipo de reparo nas fissuras formadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o fenômeno de autocicatrização, bem como seu impacto na durabilidade, de concretos contendo cimentos ternários do tipo LC³.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Acompanhar o processo de cicatrização em diferentes idades após a fissuração em microscópio ótico;
- b) Determinar a área e a espessura máxima das fissuras formadas nos corpos de prova;
- c) Analisar a capacidade autocicatrizante das matrizes cimentícias através dos ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e penetração de água sob baixa pressão;
- d) Entender a capacidade de manutenção dos produtos de autocicatrização após a ação de água sob baixa pressão;
- e) Caracterizar de forma mineralógica os produtos de cicatrização formados nas fissuras;

- f) Verificar a influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na capacidade de autocicatrização;
- g) Avaliar a resistência à compressão do cimento ternário do tipo LC³ comparado ao cimento CPV ARI em diferentes idades.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é apresentado em cinco capítulos.

O primeiro deles foi elaborado de forma a apresentar a introdução e justificativa do tema, bem como os objetivos, estrutura e delimitações do tema estabelecidas para o trabalho em questão.

No segundo capítulo é feito um levantamento bibliográfico sobre os principais assuntos tratados na pesquisa. Assim sendo aborda-se o fenômeno de autocicatrização e suas diferentes formas de ocorrência, além de um levantamento das principais formas de análise em escala laboratorial. Ainda, apresenta-se as principais informações sobre o cimento ternário do tipo LC³, relacionadas às especificidades do processo de hidratação, fatores de impacto no desempenho desse cimento e o que se sabe sobre desempenho mecânico e durabilidade das matrizes cimentícias com esse ligante.

O programa experimental com todos os métodos e materiais utilizados na pesquisa são apresentados no terceiro capítulo. Nele são abordadas a execução de cada um dos ensaios, e as referências que serviram de base para sua realização no trabalho, e a apresentação das principais características de cada um dos materiais utilizados.

O quarto capítulo foi desenvolvido para a apresentação e análise dos resultados determinados através do proposto no programa experimental.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa bem como sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Para a pesquisa em questão foram utilizados três agregados diferentes, sendo dois deles classificados como agregados miúdos e um deles como agregado graúdo. Tal ação foi tomada de forma a proporcionar a confecção de concretos com

características satisfatórias de coesão e consistência para a moldagem de corpos de prova e, por serem materiais encontrados no mercado da construção civil, se aproximar da realidade de produção do concreto em escala real.

Os materiais cimentícios suplementares, calcário moído e argila calcinada (metacaulim), foram escolhidos também por serem presentes no mercado da construção civil.

De forma a proporcionar um comparativo com o cimento ternário do tipo LC³, as avaliações em termos de autocicatrização e durabilidade também foram realizadas para os mesmos traços de concreto com o cimento CPV ARI. Isso se deve ao fato de poder entender as diferenças entre o LC³ e um cimento atualmente normalizado, e presente no mercado brasileiro, além de proporcionar a avaliação entre um ligante com grande quantidade de adições e um com baixa.

Em relação ao cimento ternário do tipo LC³ optou-se por estudar o LC³-50, que possui 50% de clínquer em sua composição, sendo o restante composto de 15% de calcário moído, 30% de argila calcinada e 5% de gesso. A escolha dessa composição se deu em função de ser a mais estudada atualmente e que demonstra resultados satisfatórios em termos de desempenho mecânico, durabilidade e aspectos de sustentabilidade.

Com o intuito de entender o impacto do consumo de cimento nos diferentes ensaios executados, além da possibilidade de elaboração de curvas para traçar o comportamento dos cimentos estudados, foram realizados traços de concreto com três relação água/cimento diferentes (0,4;0,5 e 0,6).

Como forma de cura decidiu-se pela execução submersa em água. A escolha decorre do fato de que a água é um gatilho indispensável para o mecanismo autógeno de autocicatrização, uma vez que não existem materiais na composição dos traços de concreto para desencadear tal processo.

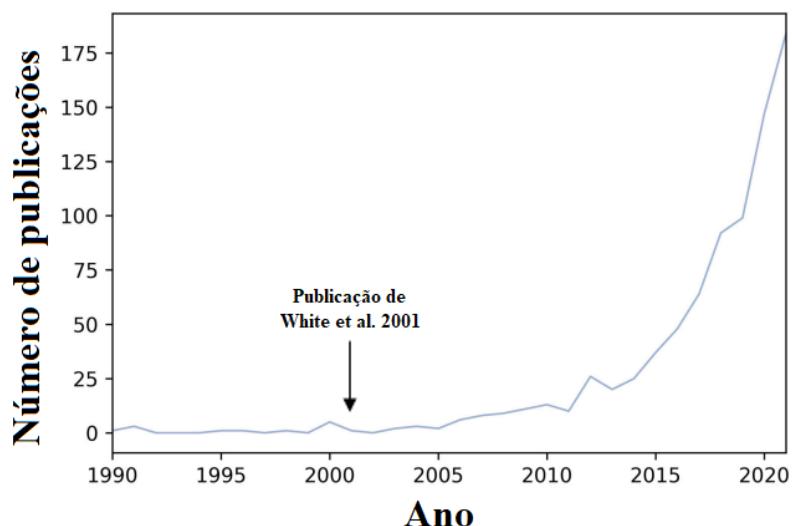
A escolha da análise de imagem e o ensaio de propagação de onda ultrassônica para a avaliação da autocicatrização foram definidas através de um levantamento bibliográfico que indicou a obtenção de resultados satisfatórios e coerentes com essas técnicas. O mesmo ocorreu com a definição do ensaio para avaliação da durabilidade, em que se utilizou a penetração de água sob baixa pressão, além do entendimento de que cenários com água constante, ou submersos, são necessários para ocorrer a forma autogênica de autocicatrização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO

O fenômeno de autocicatrização foi observado pela primeira vez no estudo publicado por Malinskii *et al.* em 1969, que investigou o fenômeno em polímeros. Desde tal publicação, alguns trabalhos foram realizados acerca do tema, entretanto a partir da publicação de White *et al.* em 2001 foi verificado um grande aumento no interesse de realização de estudos relacionados ao tema (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013), conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Número de publicações acerca da autocicatrização ao longo dos anos



Fonte: Adaptado de Lahmann, Edvardsen e Kessler (2022, p. 2), texto traduzido para o português

Tal interesse no assunto pode ser em função do benefício econômico que o fenômeno pode proporcionar, uma vez que pode aumentar o tempo de vida útil das estruturas, através do aumento da durabilidade, e reduzir custos de recuperação e manutenção (FERRARA *et al.*, 2018).

No meio científico ainda é possível notar uma grande quantidade de termos acerca dos processos de autocicatrização, não havendo um consenso sobre eles ao longo dos anos. Para que não ocorra divergências em relação aos conceitos aplicados neste trabalho, será utilizado a nomenclatura sugerida na RILEM 221-SHC (2013), especificado a seguir:

- Autocicatrização: qualquer tipo de processo que possibilite a recuperação e melhorias no desempenho após algum tipo de deterioração, sem intervenção externa;
- Autocicatrização autógena: processo de autocicatrização que acontece sem a incorporação de nenhum material para este fim, sendo os componentes comuns do concreto responsáveis por isso;
- Autocicatrização autônoma: processo de autocicatrização que acontece a partir de materiais incorporados propositalmente para este fim.

Ainda é importante destacar o conceito de autorregeneração, que está associado não somente à selagem de fissuras formadas, mas também à recuperação das propriedades mecânicas iniciais (VAN BREUGEL, 2007).

Tal nomenclatura especificada pode ser encontrada em diversas publicações atuais tais como: Alazhari *et al.* (2018); Al-Tabbaa *et al.* (2019); De Belie *et al.* (2018); Esaker *et al.* (2021); Ferrara *et al.* (2018); Gupta (2022), Lahmann, Edvardsen e Kessler (2022); Qian, Zheng e Rui (2021); Van Mullem *et al.* (2019); entre outros estudos.

Takagi (2013) e Cappelesso (2018) destacam que a autocicatrização pode ser desencadeada de diferentes formas e por diferentes agentes. Van Tittelboom e De Belie (2013) compilaram as informações apresentadas no Quadro 1, relacionando os gatilhos que podem ocasionar o fenômeno da autocicatrização e os resultados obtidos, considerando diferentes cenários. Através da informação apresentada pelos autores é possível notar que para as diferentes formas de autocicatrização o gatilho comumente necessário é a água e/ou umidade, sendo assim destaca-se a sua importância para ocorrência do fenômeno.

Quadro 1 – Mecanismos que podem gerar a autocicatrização das estruturas

Gatilho	Resultado	
Ingresso de líquidos e gases	Água	Cicatrização autógena/Hidratação contínua
	Água + CO ₂	Cicatrização autógena/ Precipitação de CaCO ₃
	Água	Expansão, intumescência e precipitação de aditivos
	Água	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Alta U.R.*	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Solução de Cl ⁻²	Degradação do revestimento de tubos porosos de polipropileno e lixiviação de Ca(NO ₂) ₂ através dos poros
	Água + CO ₂	Ativação de esporos e precipitação de CaCO ₃ através de bactérias
	Água	Precipitação de CaCO ₃ através de bactérias
	CO ₂	Degradação do revestimento de argila expandida e liberação de Na ₂ PFO ₃
Fornecimento de calor	Externo	
	90°C + Água	Fechamento de fissuras por fitas retráteis de polietileno tereftalato (PET), seguido por cicatrização autógena
	100°C	Derretimento do revestimento de cera envolto em cápsulas porosas de polipropileno e liberação de Metil Metacrilato
	150°C	Derretimento de partículas de EVA Internamente
	48°C	Derretimento do revestimento de parafina e liberação de agente retardador de hidratação
Formação de fissuras	93°C	Derretimento do filme de EVA em volta de fio espiral e liberação de epóxi
	+ Água	Fechamento da fissura por ligas de memória de forma incorporada, seguida por cicatrização autógena
		Rompimento de cápsulas de liberação de agente cicatrizante
		Delaminação de fibras vegetais e liberação de agente cicatrizante
		Bombeamento e injeção de agente cicatrizante na superfície porosa do concreto

*Umidade relativa

Fonte: Tittelboom e De Belie (2013, p. 2202), texto traduzido para o português

Levando em consideração a grande variedade dos agentes que podem ser responsáveis pelo mecanismo de autocicatrização, apresenta-se o Quadro 2, com informações organizadas por Van Tittelboom e De Belie (2013). A partir desses dados é possível observar as características de diferentes agentes autocicatrizantes. Os autores destacam que uma das propriedades importantes destes agentes é sua viscosidade, necessitando dispor de um valor que possibilite sua movimentação pela fissura.

Quadro 2 – Revisão acerca dos diferentes agentes de autocicatrização

Agente	Número de componentes		Viscosidade (mPa·s)	Agente de cura do cicatrizante	Tempo de cura	Expansão	
	1	>2				Sim	Não
Cianoacrilato	X	-	<10	Úmida	Segundos	-	X
Epóxi	X	-	-	Úmida, ar, calor	60°C, <100min	-	X
	X	-	250-500	Úmida, ar	-	-	X
	X	-	-	Úmida, ar	-	-	X
	-	X	-	Contato	-	-	X
	-	X	-	Contato	± 1 h	-	X
	-	X	200	Contato	-	-	X
	-	X	150	Contato	30 min	-	X
	-	X	80	Contato	30 min	-	X
	-	X	360	Contato	40 min	-	X
Metil Metacrilato	X	-	-	Calor	-	-	X
	-	X	± 1	Contato	30 min	-	X
	-	X	± 1	Contato	-	-	X
	-	X	34	Contato	1 h	-	X
Silicone	X	-	-	Ar	-	-	X
Espuma	X	-	-	-	-	-	X
Poliuretano	X	-	7200	Úmida	40-180 min	X	-
	-	X	600	Contato	50-300 s	X	-
Poliacrilato	-	X	7	Contato	40 s	-	X
Óleo de tungue	X	-	-	Ar	-	-	X
Solução de sílica alcalina	X	-	-	Ar	-	-	X
Solução de Ca(OH) ₂	X	-	-	CO ₂ no ar	-	-	X
Solução de Na ₂ SiO ₃	X	-	-	Matriz de Ca(OH) ₂	-	-	X
Solução de Na ₂ FPO ₃	X	-	-	Produtos de hidratação e carbonatação	28 dias	-	X
Solução de Ca(NO ₂) ₂	X	-	-	Matriz	-	-	X
Poliuretano + solução bacteriana	-	X	600	Contato	-	X	-
Solução bacteriana	X	-	-	Água e O ₂	100 dias	-	X
	-	X	-	Água	-	-	X

Fonte: Tittelboom e De Belie (2013, p. 2194), texto traduzido para o português

Tendo em vista os dados apresentados acima, o item a seguir abordará diferentes formas com que as fissuras podem ser geradas. Posteriormente, serão apresentadas as características principais dos mecanismos autônomos e autogênicos de autocicatrização.

2.1.1 Origem das fissuras em matrizes cimentícias

É de conhecimento geral que o concreto, apesar de ser caracterizado por boa resistência à compressão (dependendo da sua composição), possui um comportamento frágil, possuindo baixa resistência à tração e, consequentemente, alta suscetibilidade à formação de microfissuras e fissuras (VANTADORI *et al.*, 2018). Em decorrência deste comportamento, as estruturas podem ser comprometidas mecanicamente, prejudicando sua vida útil e durabilidade, tornando-as menos seguras e mais susceptíveis aos mecanismos de degradação (ZHANG *et al.*, 2020).

Bonić *et al.* (2015) citam que dentre os mecanismos físicos de deterioração do concreto destaca-se aqueles provenientes da retração, variações térmicas, diferença de expansão térmica entre agregado e matriz cimentícia, sobrecargas da estrutura e ciclos de carregamento e descarregamento. Além disto, os autores citam a ação do gelo e desgelo, reiterando que essa é uma das formas físicas mais agressivas para deterioração do concreto, uma vez que, quando a água solidifica dentro dos poros do concreto exerce uma pressão muito forte, possibilitando a formação de microfissuras e fissuras.

Uma das principais características do concreto é a presença de poros em sua estrutura, decorrentes da evaporação da água presente no concreto fresco e, também, do ar que ficou aprisionado durante a mistura. Esses vazios atuam como caminho para penetração de diferentes agentes, tais como gases, água e substâncias agressivas. Grande parte dos ataques químicos estão relacionados, justamente, à presença destes poros (SILVA *et al.*, 2021a).

Dentre as ações químicas Chemrouk (2015) cita o ataque por sulfatos. Os sulfatos podem ser provenientes do solo, água subterrânea e água do mar. Além disso, eles também podem estar presentes nos agregados empregados no concreto. De acordo com o autor, os ataques por sulfatos mais comuns são por:

- Sulfato de cálcio (CaSO_4);
- Sulfato de sódio (Na_2SO_4);
- Sulfato de potássio (K_2SO_4);
- Sulfato de magnésio (MgSO_4).

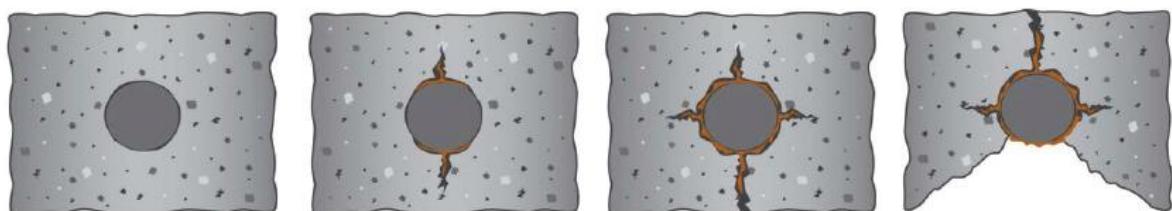
Chemrouk (2015) ainda salienta que os sulfatos reagem com o aluminato tricálcico (C_3A) formando etringita. Na presença de umidade ocorre a expansão do produto formado, acarretando o surgimento de tensões internas que, ao atingirem a

capacidade máxima de suporte do concreto, resultam na formação de microfissuras e fissuras.

Outra forma de degradação química do concreto é através da corrosão da armadura, desencadeada tanto por ataque de cloreto, quanto pela carbonatação. Silva et al. (2021a) destacam que as microfissuras e fissuras decorrentes da corrosão são as mais recorrentes.

No primeiro processo citado acima, ocorre a penetração de íons cloreto na estrutura do concreto, até chegar na armadura, culminando na deterioração do filme de passivação e, consequentemente, na corrosão. Por outro lado, no processo de carbonatação o CO₂ penetra na estrutura do concreto, desencadeando a redução do pH através da reação do gás com os produtos formados durante a hidratação do cimento, o que também resulta na deterioração do filme de passivação, permitindo o início da corrosão. Em ambos os cenários são depositados produtos formados durante a reação eletroquímica de corrosão na superfície do aço, gerando tensões internas através de variações volumétricas, tendo como resultado a formação de microfissuras e fissuras e, em casos mais avançados, o desplacamento (HELENE, 1993; SILVA et al. 2021a). A Figura 5 ilustra o avanço da corrosão de armadura na estrutura.

Figura 5 – Avanço do mecanismo de corrosão nas estruturas de concreto armado



Fonte: Bonić et al. (2015, p. 416)

De acordo com Bonić et al. (2015) reações de expansão do agregado também são formas de deterioração química do concreto. Nguyen, Kim e Castel (2020) classificam a reação álcali-agregado como uma reação química complexa que envolve os íons hidroxila presentes na solução dos poros e a sílica reativa do agregado. Como produto desta reação, forma-se um gel higroscópico, ou seja, expande na presença de umidade. A reação de expansão continua acontecendo com a presença de umidade e, a partir do momento que ultrapassa o volume dos poros presentes na matriz, produz esforços internos que podem desencadear a formação de microfissuras e fissuras. A NBR 15577 (ABNT, 2018) reconhece dois tipos de reação álcali-

agregado: reação álcali-sílica e reação álcali-carbonato. Segundo a norma citada, a diferença entre as duas está na composição mineralógica do agregado e o fato da reação álcali-carbonato não formar o gel, as expansões ocorrem no próprio agregado em função de deposição de produtos ao longo da sua superfície.

O ataque biológico deve-se à ação de microrganismos, em que as condições do concreto podem apresentar um ambiente favorável para seu crescimento. Assim sendo, com o desenvolvimento do organismo na estrutura porosa do concreto, tensões são formadas no seu interior, podendo resultar na formação de microfissuras e fissuras. Aliado a isso, os microrganismos também formam filmes de ataque ácido que podem acarretar a deterioração da matriz cimentícia (BONIĆ *et al.*, 2015).

A retração do concreto é um dos fenômenos mais comuns ao longo do processo de cura das estruturas de concreto. Esse evento é caracterizado pela deformação tridimensional de contração do concreto. O resultado disso é a retração do concreto que, dependendo do grau de restrições da estrutura podem ultrapassar a resistência do material e ocasionar o surgimento de microfissuras e fissuras. Se dividem entre retração por secagem, plástica, autógena, térmica e por carbonatação (AITCIN *et al.*, 1997; KUMM, 2009; ONGHERO, 2017).

Tendo em vista a diversidade de fatores que podem acarretar a formação de fissuras nas estruturas do concreto, apresenta-se o Quadro 3, que reproduz as informações da Tabela 13.4 da NBR 6118 (ABNT, 2023). O quadro especifica a abertura característica (w_k) máxima das fissuras, para diferentes tipos de concreto e classes de agressividade ambientais, visando proporcionar um cenário que proteja a armadura. Como é possível visualizar, o limite máximo para abertura de uma fissura é de 0,4 mm, sendo esse valor ainda mais baixo quando a estrutura se encontra em ambientes de maior classe de agressividade ambiental.

Quadro 3– Limite de abertura de fissuras conforme NBR 6118 (ABNT, 2023)

Tipo de concreto estrutural	Classe da agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4\text{mm}$	Combinação frequente
	CAA II e CAAIII	ELS-W $w_k \leq 0,3\text{mm}$	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

a) A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50\text{ mm}$

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 80)

Para entendimento do Quadro 3 é necessário conhecer as diferenças na classe de agressividade ambiental, sendo assim apresenta-se o Quadro 4, contendo as informações da Tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Quadro 4 – Especificações de classe de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa ^{a,b}	
II	Moderada	Urbana ^a	Pequeno
III	Forte	Marinha ^{a,b}	Grande
		Industrial ^{a,c}	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

- a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
- b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
- c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústria químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 17)

Visando sanar os problemas gerados pela formação das fissuras, pode-se executar ações de manutenção e reparação. Entretanto em estruturas de grandes dimensões tais ações podem gerar um custo muito elevado, além de, em alguns casos, ser muito difícil de executar em função do local onde a fissura é formada (ZHANG *et al.*, 2020).

É importante destacar que a autocicatrização autógena não é capaz de cicatrizar qualquer fissura, principalmente por conta da sua espessura, restringindo a basicamente fissuras de retração e deformação, que tenham contato constante com umidade. Diversos são os estudos acerca do tema, entretanto Laham, Edvardsen e Kessler (2022) destacam que a cicatrização da forma autogênica já foi observada em fissuras variando de 5 µm a 600 µm.

2.1.2 Autocicatrização autônoma

Conforme determinado anteriormente, a autocicatrização autônoma é definida como o processo de autocicatrização ocasionada quando o concreto possui materiais utilizados propositalmente para este fim, que desencadeiam o fenômeno ao ser submetido ao gatilho necessário (RILEM 221-SHC, 2013). Cappelesso (2018) ainda destaca que o mecanismo autônomo pode ocorrer através de agentes que reagem quimicamente com a matriz ou que iniciam seu processo somente após a ocorrência de algum tipo de prejuízo à matriz, que culmina na liberação de determinado produto após o acesso de água no seu interior.

Segundo Ghosh (2009), os estudos acerca do tema utilizam uma grande variedade de agentes cicatrizantes. Ainda, o mesmo autor destaca que os agentes principalmente estudados são a resina epóxi, os cianoacrilatos e as soluções de sílica alcalina.

Huang *et al.* (2016), em seu estudo, especificam o fenômeno de autocicatrização em 4 diferentes tipos: autocicatrização autógena, autocicatrização baseada na utilização adições minerais, autocicatrização baseada no uso de bactérias e autocicatrização baseada no emprego agentes adesivos. Levando em consideração ao que foi determinado neste trabalho, os mecanismos que contam com o emprego de bactérias e agentes adesivos, especificados pelos autores, se enquadram na forma autônoma de ocorrência do fenômeno.

Dentre as técnicas utilizadas no mecanismo autônomo, uma que tem se mostrado como preferencial é a encapsulamento de agentes cicatrizantes, uma vez que neste tema é comum o emprego de adições não convencionais na construção civil. É importante destacar que, para a utilização deste método, deve-se ter cautela acerca do desenvolvimento do sistema de encapsulamento, tais como caracterização mecânica, mecanismos de gatilho, evolução da cicatrização, geometria e textura. O mecanismo de encapsulamento utiliza: microcápsulas, que possui diâmetro menor que 1mm, macrocápsulas e sistemas vasculares (DE BELIE *et al.*, 2018; DONG *et al.*, 2016; GHOSH, 2009).

Danish, Mosaberpanah e Salim (2020) destacam que a encapsulamento de agentes cicatrizantes é uma das técnicas mais efetivas para a incorporação de tais produtos na estrutura do concreto. Os autores ainda apresentam uma revisão de diferentes métodos empregados com esta técnica, compilada no Quadro 5.

Quadro 5 – Técnicas empregadas no encapsulamento de agentes cicatrizantes

Material da cápsula	Material encapsulado	Teor¹ (%)	Desempenho
Poliuretano/ ureia-formaldeído	Silicato de sódio	2,5-5	- Reduz a espessura da fissura e a transmissão de ondas ultrassônicas
Polímero (ureia-formaldeído)	Epóxi	1-4	- Aumenta a resistência à flexão
Ureia-formaldeído	Epóxi	0-9	- Reduz índice de danos, porosidade, difusão de cloretos e permeabilidade; - Aumenta a resistência à compressão e tração e módulo de elasticidade dinâmico
	Ca(NO ₃) ₂	0,25-2	- Aumenta o módulo de elasticidade e resistividade superficial
	Silicato de sódio	0,5-5	- Aumenta a rigidez
	Diciclopentadieno	0,25	- Aumenta a rigidez
Polímero-ureia	Silicato de sódio	0,8	- Reduz a absorção por capilaridade
Polímero (estireno-divinilbenzeno)	Epóxi	0-2	- Aumenta a energia de fratura
Melaminaureia-formaldeído	Epóxi	1-4	- Aumenta a resistência à flexão
Microcápsulas	Esporos de bactérias	1-5	- Aumenta o poder de cicatrizar fissuras - Reduz a permeabilidade de água
Sílica	Epóxi	5-10	- Reduz o coeficiente de absorção
Álcool polivinílico	Sulfoaluminato de cálcio	10	- Aumenta o módulo de elasticidade dinâmico
Alginato	Ag ⁺	10	- Aumento da resistência ao ataque de cloretos

¹Teor de substituição em relação a massa de cimento

Fonte: Danish, Mosaberpanah e Salim (2020, p. 6890), texto traduzido para o português

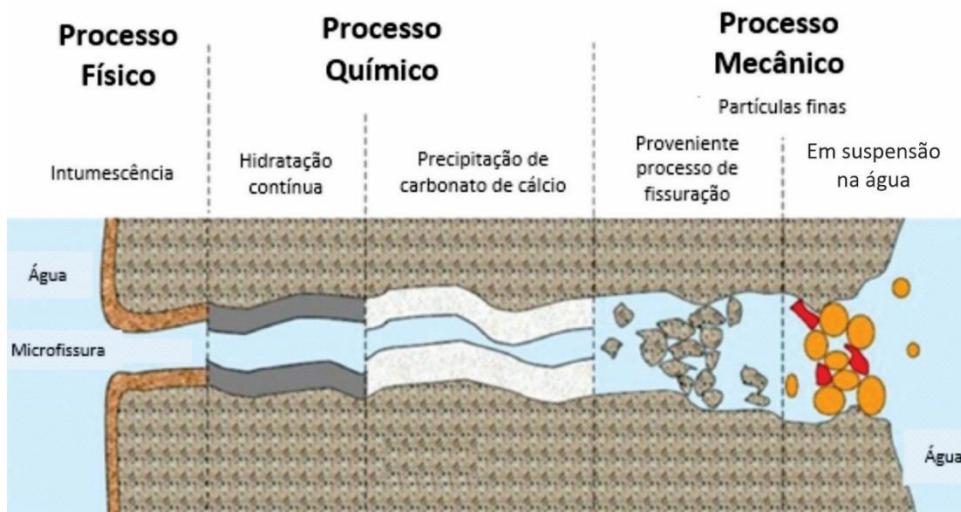
2.1.3 Autocicatrização autógena

De acordo com o estabelecido anteriormente, a autocicatrização autógena é o fenômeno de autocicatrização que acontece de forma natural, somente a partir dos materiais comumente presentes no concreto. Nesta forma do fenômeno não é inserido nenhum tipo de componente especificamente para que que desencadeie o processo (RILEM 221-SHC, 2013).

Segundo Ghosh (2009), o processo autógeno da autocicatrização já é conhecido há muitos anos, sendo alvo de diversas pesquisas. O autor ainda salienta que tal fenômeno pode ser o responsável pela longevidade de muitas das estruturas antigas, que passaram por poucos processos de manutenção durante sua existência. Cappellessio (2018) destaca que pesquisas acerca do mecanismo autógeno da autocicatrização são extremamente relevantes, uma vez que podem melhorar uma cicatrização pré-existente no concreto, dispensando a necessidade de utilização de outros materiais e/ou ações pós-fissuração da estrutura.

Diversos autores destacam que o processo autogênico é o mais relevante por conta de, principalmente, dois processos: (1) hidratação contínua do cimento e (2) precipitação de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) (DANISH; MOSABER PANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.* 2018; GHOSH, 2009; HUANG *et al.*, 2016; PARK; CHOI, 2019). A RILEM 221-SHC (2013) apresenta a Figura 6 mostrando, além dos processos químicos, as causas físicas e mecânicas que podem acarretar a autocicatrização

Figura 6 – Principais processos relacionados ao mecanismo autogênico da autocicatrização



Fonte: RILEM 221-SHC (2013, p. 65), texto traduzido para o português

A causa física está relacionada a intumescência da pasta de cimento hidratada próxima das faces da fissura. Neste processo, a pasta de cimento hidratada absorve a água, causando o seu inchamento. Este fenômeno não possui uma contribuição tão relevante à autocicatrização, sendo responsável pela redução de menos de 10% no fluxo de líquidos (RILEM 221-SHC, 2013).

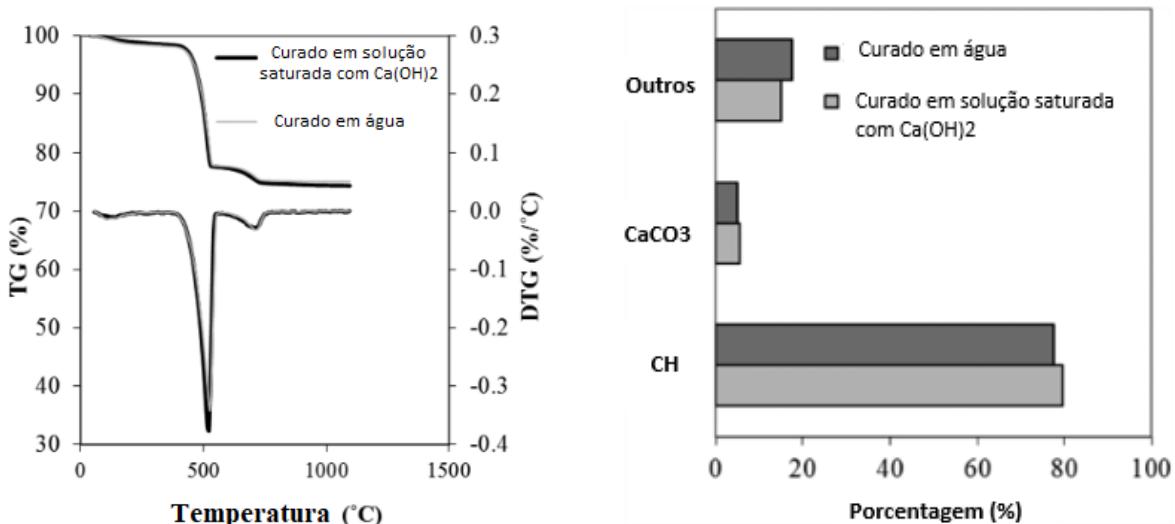
Os processos químicos estão relacionados a hidratação contínua e precipitação de CaCO_3 , já destacados pelos autores citados anteriormente como mais relevantes no mecanismo autogênico da autocicatrização.

A hidratação contínua acontece em decorrência da presença de cimento anidro na estrutura do concreto. A água penetra na estrutura porosa e atinge as partículas do cimento não hidratadas, iniciando um novo processo de hidratação. Em decorrência disso, são formados novos produtos que possuem volume duas vezes maior que o grão do cimento, possibilitando o selamento da fissura. É importante destacar que esse processo, por si só, não é capaz de acarretar a cicatrização completa da fissura, principalmente em fissuras mais espessas (CAPP ELSESSO, 2018; DE BELIE *et al.*, 2018; RILEM 221-SHC, 2013). Danish, Mosaberpanah e Salim (2020) informam que geralmente no concreto existe uma quantidade entre 20% e 30% de cimento não hidratado, salientando, então, a importância da hidratação contínua na autocicatrização.

O contato entre a água e os grãos de cimento desencadeiam uma série de reações químicas, que acarretam a dissolução e deposição de produtos hidratados, tais como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal composto da hidratação em termos de resistência, e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Além disso, uma vez que o cimento é formado por aproximadamente de 75% de silicatos (silicato dicálcico e silicato tricálcico), a sílica presente nestes compostos reage com as partículas de Ca(OH)_2 não dissolvidas, na presença de água na matriz cimentícia, possibilitando a formação do carbonato de cálcio e a continuidade do processo de cicatrização (DE BELIE *et al.* 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

Huang e Ye (2015) avaliaram o Ca(OH)_2 como agente cicatrizante, pela maior disponibilidade do íon Ca^{2+} , submetendo amostras em solução saturada com essa base. Os autores destacaram que a maior disponibilidade do íon pareceu não influenciar na mineralogia dos produtos precipitados nas fissuras. Também observaram que os produtos comumente formados são o C-S-H , o CH e o CaCO_3 , com quantidades de CH muito maiores do que o C-S-H , conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Principais componentes formados na cicatrização e influência da maior disponibilidade de íons Ca^{2+} na mineralogia dos produtos formados



Fonte: Huang e Ye (2015, p. 315-316), texto traduzido para o português

Huang, Ye e Damidot (2013) classificam os produtos formados em decorrência da hidratação contínua do cimento, com base em sua morfologia, de duas formas: produtos de tipo cristalino e produto de tipo gel. Entre os cristalinos os autores citam o CH e entre os géis o C-S-H. Por fim, destacam que em idade iniciais o processo de hidratação contínua do cimento parece ser mais vantajoso. De Belie *et al.* (2018) atribuem isso ao fato de que, em idades iniciais, existe maior disponibilidade de cimento não hidratado.

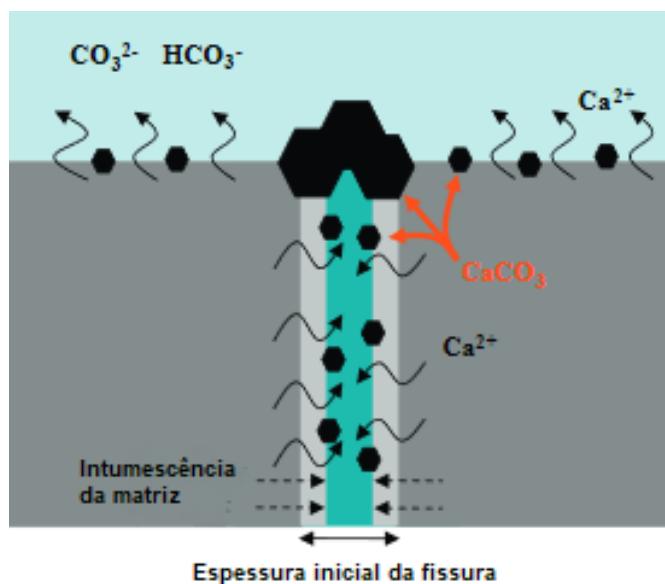
O segundo processo químico citado é a precipitação de CaCO_3 . Os íons Ca^{2+} , presentes na solução dos poros do concreto, reagem com os íons CO_3^{2-} , provenientes da água que penetra na fissura, acarretando na formação de CaCO_3 dentro dela. As equações 1 a 5 mostram detalhadamente como ocorre o processo. Esse fenômeno é dependente da temperatura, pH e concentração dos reagentes. Além disso, essa reação é classificada pelos autores como a mais eficiente em termos de autocicatrização (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.*, 2018; RILEM 221-SHC, 2013).



Esse processo é inicialmente observado nas paredes das fissuras e, em função da redução no número de íons Ca^{2+} , a reação se torna mais lenta em decorrência da necessidade de movimentação desses íons e da necessidade da sua penetração através a camada de CaCO_3 já formada. Além disso, existe uma segunda fase da reação, que é muito mais lenta do que a primeira. Nesse momento, as adições pozolânicas, iniciam suas reações, consumindo o hidróxido de cálcio, principal fonte Ca^{2+} e dificultando a precipitação do CaCO_3 (DE BELIE *et al.*, 2018; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Em geral existe uma pequena quantidade de íons CO_3^{2-} dentro da estrutura do concreto. Esse íon também pode ser proveniente de uma fonte externa, mas sua difusão é muito lenta, ocasionando um gradiente de concentração do CO_3^{2-} na fissura. Por conta disso é possível observar a formação da calcita (CaCO_3) na abertura da fissura. Com a continuidade da autocicatrização, mais íons CO_3^{2-} penetram a fissura fazendo com que a portlandita formada sofra carbonatação, formando mais calcita. Em decorrência disso pode-se entender que os produtos formados possuem certa heterogeneidade, explicando o motivo de muitas pesquisas divergirem nos resultados encontrados (BARY; SELLIER, 2004; HUANG *et al.*, 2016; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

Figura 8 – Representação do mecanismo de precipitação do CaCO_3 na autocicatrização



Fonte: Sisomphon, Copuroglu e Koenders, (2012, p. 573), texto traduzido para o português

Por fim, o processo mecânico de autocicatrização consiste na presença de partículas finas em suspensão na água e resíduos originados na fissuração do

concreto, que se depositam na fissura. Tal mecanismo não possui grande relevância e impacto em termos de autocicatrização (DE BELIE *et al.*, 2018; RILEM 221-SHC, 2013).

De acordo com Danish, Mosaberpanah e Salim (2020), esses processos descritos acima podem acontecer simultaneamente. Huang *et al.* (2016) também fazem essa afirmação, mas destacam que os diferentes mecanismos impactam de formas diferentes o processo de autocicatrização.

Diversos são os fatores que podem impactar o fenômeno de autocicatrização autógena, conforme mostra o Quadro 6, indicado pela RILEM 221 SHC.

Quadro 6 – Fatores que podem influenciar na autocicatrização

Concreto	Água	Fissura
Tipo de cimento	Pressão	Espessura
Tipo de aditivos	Gradiente de pressão	Comprimento
Tipo do agregado	Dureza	Geometria da fissura
Idade	pH	Fissura ramificada
	Temperatura	Acumulado de fissuras

Fonte: RILEM 221-SHC (2013, p. 66), texto traduzido para o português

Em decorrência disso apresenta-se o Quadro 7, elaborado a partir de informações apresentadas em diferentes literaturas, com o intuito de apresentar uma síntese destas informações e avaliar os diferentes cenários apresentados.

Quadro 7 – Classificação de diferentes aspectos que impactam na autocicatrização

(continua)

Fator de influência	Considerações	Referências	
Características do concreto	Teor de clínquer no cimento	O teor de íons Ca^{2+} disponíveis relaciona-se ao teor de clínquer do cimento, o que implica diretamente na precipitação de CaCO_3 , uma vez que é um dos íons necessários para sua formação	Danish, Mosaberpanah e Salim (2020); De Belie <i>et al.</i> (2018)
	Emprego de adições pozolânicas	O emprego de pozolanas no concreto possui impacto na formação de CaCO_3 , uma vez que as reações pozolânicas consomem o hidróxido de cálcio produzido	Durga e Ruben (2019); Wang <i>et al.</i> (2021); Zhang <i>et al.</i> (2020)
	Tipo de agregado	A natureza, forma e propriedades dos agregados influenciam na tipologia das fissuras formadas e, consequentemente, na capacidade autocicatrizante do concreto	Danish, Mosaberpanah e Salim (2020); De Belie <i>et al.</i> (2018)
	Parâmetros do concreto	A relação água/cimento é uma das especificações mais comuns do concreto, e o seu valor adotado implica na quantidade de cimento anidro. Relações água/cimento menores tendem a favorecer o mecanismo autogênico pela presença de cimento não hidratado.	Cappellessa (2018); Snoeck (2015)

(conclusão)

Fator de influência		Considerações	Referências
Características...	Idade de fissuração	Fissuras geradas em idades iniciais estão mais suscetíveis à autocicatrização pela presença de partículas do aglomerante não hidratadas, que permite a formação de silicatos de cálcio hidratados (CSH). Em idade mais avançadas é mais comum a ocorrência da autocicatrização pela precipitação de CaCO_3 .	Danish, Mosaberpanah e Salim (2020); De Belie et al. (2018); Shoeck (2015)
Presença de água	Água	A presença de água é essencial para o fenômeno de autocicatrização autogênico, dada a sua necessidade para efetivar reações químicas e transporte de partículas finas. Acredita-se que quando submerso em água os resultados são mais vantajosos, mas quando submetido a ciclos de molhagem e secagem também tem-se um bom comportamento, provavelmente pela formação de CaCO_3 .	De Belie et al. (2018); Van Tittelboom e De Belie (2013)
Características da fissuração	Forma e características geométricas das fissuras	Sua influência está relacionada à extensão e, principalmente, a sua espessura, o que pode influenciar na capacidade autocicatrizante.	Danish, Mosaberpanah e Salim (2020)

Fonte: GIL (2022, p. 39)

Cabe destacar que o fenômeno de autocicatrização autógena se torna extremamente benéfico para a produção do concreto, uma vez que não se utiliza nenhum material fora do cotidiano que poderá causar impactos em termos de processo produtivo. Assim sendo, o emprego de cimentos que promovam esse comportamento se torna de extrema importância e merecem atenção dos estudos científicos.

2.1.4 Metodologias relacionadas à verificação da autocicatrização

Uma vez que a forma de avaliar a autocicatrização ainda não dispõe de uma prescrição normativa para determinar a metodologia de análise, os estudos relacionados ao tema adotam diferentes formas de avaliação do fenômeno.

Neste contexto, desenvolveu-se os itens a seguir de forma a realizar uma revisão da literatura, buscando entender as principais metodologias empregadas

pelos estudos recentes relacionados ao tema e, principalmente, evidenciar sua eficácia, de forma a auxiliar na construção do programa experimental do trabalho.

2.1.4.1 Métodos de fissuração e avaliação da autocicatrização de corpos de prova

Ferrara *et al.* (2018) citam que os métodos para fissuração geralmente envolvem carregamentos. Além disso informa que deformações controladas, tais como retração e ciclos de gelo e desgelo, também podem ser empregadas com este fim, salientando que em estudos que visam avaliar a autocicatrização é mais corriqueiro o emprego de ensaios mecânicos. O Quadro 8 indica os ensaios comumente utilizados para indução de fissuras em diferentes tipos de concreto, levando em consideração suas diferenças no que tange suas características intrínsecas.

Quadro 8 - Levantamento de ensaios utilizados para indução de fissuras em concreto

Ensaios	Concreto simples	Concreto reforçado com fibra	Concreto têxtil	UHPC reforçado com fibras
Compressão	Comum	Possível	Possível	Possível
Tração direta	Dificilmente empregado	Possível, mas geralmente não é utilizado	Comum, em função da elevada resistência à deformação. Tende a formar várias fissuras	Comum, em função da elevada resistência à deformação. Tende a formar várias fissuras
Tração por compressão diametral	Comum. Se a espessura das fissuras precisar ser controlada é necessário medidas especiais	Comum	Possível	Possível
Tração na flexão com 3 ou 4 pontos	Comum, mas pode ser necessário utilizar reforços internos ou externos para uma fissuração mais controlada	Comum	Mais comum utilizar tração na flexão com 4 pontos. Possibilita formação de várias fissuras no centro	Mais comum utilizar tração na flexão com 4 pontos. Possibilita formação de várias fissuras no centro
Pré-deslizamento entre matriz e fibra	Não aplicável	Comum	Comum	Possível

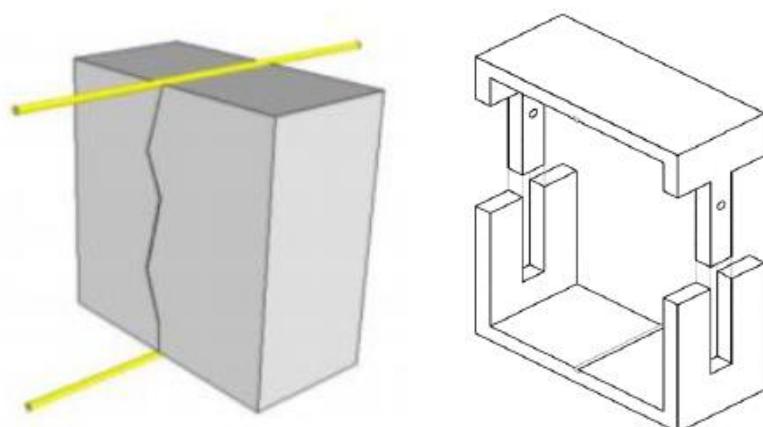
Fonte: Ferrara *et al.* (2018, p. 118), texto traduzido para o português

Cappelesso (2018) estudou o comportamento de diferentes tipos de cimento na autocicatrização do concreto (CPV ARI, CPII F 40 e CPIV 32). Ainda foram avaliadas diferentes relações a/c e idades de abertura da fissura, expondo os corpos de prova à ciclos de molhagem e secagem.

A autora supracitada investigou a recuperação das propriedades mecânicas através do ensaio de tração na flexão em 4 pontos. A indução das fissuras ocorreu através do carregamento até que fossem percebidas fissuras aparentes na superfície do corpo de prova. Após, as amostras foram submetidas às condições de exposição, e o ensaio foi realizado novamente, após atingir a idade estipulada, possibilitando a identificação do incremento de resistência em decorrência da autocicatrização. A autora destaca que este ensaio não foi satisfatório provavelmente em função da formação de fissuras muito espessas, além da variedade de forma e tamanho, que dificultaram a ocorrência do fenômeno.

Ainda, Cappelesso (2018) avaliou a autocicatrização através da propagação ultrassônica em corpos de prova com dimensões de 100x100x50 mm. A fissura foi aberta através do ensaio de tração por compressão diametral, utilizando barras metálicas lisas, de diâmetro de 5 mm, na direção do carregamento. Para evitar colapso do corpo de prova, foi utilizado um limitador lateral. A metodologia descrita é ilustrada na Figura 9. A análise consistiu em determinar a variação da velocidade de propagação do ultrassom perpendicularmente a fissura em conjunto com registros obtidos através de microscopia ótica, em regiões previamente determinadas no comprimento da fissura. Tal método foi classificado, pela autora, como satisfatório.

Figura 9 – Metodologia adotada por Cappelesso (2018) na fissuração do corpo de prova



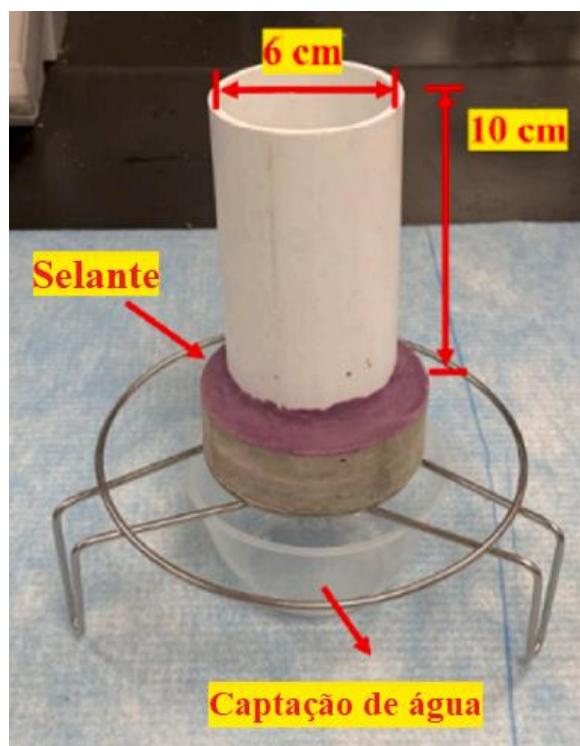
Fonte: Cappelesso (2018, p. 61)

Xiao *et al.* (2023) desenvolveram um estudo visando avaliar uma cápsula de esporos de bactéria à base de cimento de magnésia de forma a proporcionar características autocicatrizantes para a matriz cimentícia. Os autores citados moldaram corpos de prova no formato de discos dispondendo de 2,5cm de espessura e 7,5cm de diâmetro, fazendo uso de uma malha de aço em seu interior para evitar ruptura

frágil durante o procedimento de fissuração. Após 28 dias de cura os corpos de prova em formato de disco foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral com o intuito de provar as fissuras necessárias para execução do estudo. De forma a validar a capacidade autocicatrizante do agente avaliado no trabalho, Xiao *et al.* (2023) adotaram duas metodologias: avaliação visual através de microscópio e permeabilidade à água.

Para a segunda metodologia destacada, os autores supracitados posicionaram um tubo de PVC com 6cm de diâmetro e 10 cm de altura sobre uma das faces do disco e selaram o restante da sua área. Por um período de 5 minutos foi mantido a altura do tubo completamente preenchida com água, sendo todo o líquido passante coletado logo abaixo do corpo de prova, permitindo fazer a determinação do coeficiente de permeabilidade.

Figura 10 – Metodologia adotada por Xiao *et al.* (2023) para a determinação do coeficiente de permeabilidade



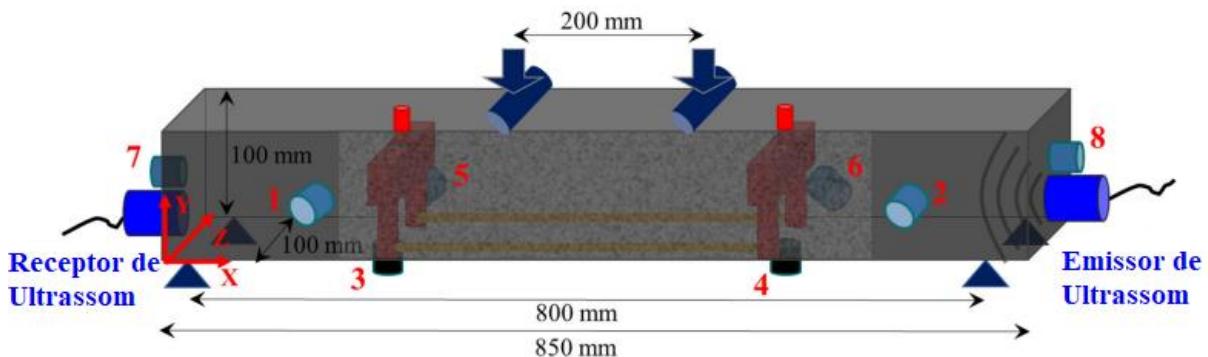
Fonte: Xiao *et al.* (2023, p. 4), texto traduzido para o português

Com o propósito de avaliar a autocicatrização e recuperação de propriedades mecânicas de vigas submetidas à flexão contendo uma rede linear de tubos vasculares, Tsangouri *et al.* (2022) moldaram corpos de prova de 100x100x850mm. Eles foram fissurados a partir do ensaio de tração na flexão com 4 apoios, sendo a avaliação da capacidade autocicatrizante executada de diferentes formas:

microscopia, permeabilidade de água, propagação de velocidade de ultrassom e emissão acústica.

Em relação à avaliação da autocicatrização através de propagação da velocidade de ultrassom, Tsangouri *et al.* (2022) posicionaram o transmissor e o receptor de forma que a onda sônica fosse propagada no sentido do comprimento do corpo de prova, passando pela fissura formada aproximadamente no seu centro, conforme representado na Figura 17. O pulso empregado possuía 2500 V de magnitude e frequência de 54 kHz.

Figura 11 – Representação da metodologia adotada por Tsangouri *et al.* (2022) para a determinação do coeficiente de velocidade de propagação do ultrassom



Fonte: Tsangouri *et al.* (2022, p. 5), texto traduzido para o português

Tsangouri *et al.* (2022) também avaliaram a capacidade autocicatrizante dos corpos de prova através da emissão acústica. Assim sendo, os autores posicionaram 8 transdutores na superfície do concreto utilizando acoplador de vaselina e os transdutores foram fixados com suportes magnéticos. As sondas empregadas tiveram uma resposta de frequência ressonante de 150 kHz e registraram os sinais emitidos por danos pré-amplificados em 40 dB.

Para avaliar a permeabilidade de água pelo corpo de prova cicatrizado, os autores supracitados posicionaram um dispositivo prismático com as dimensões de 100x80x300mm na superfície inferior do corpo de prova, fazendo sua selagem de forma a não ocorrer vazamento de água. O dispositivo acoplado foi parcialmente preenchido com água através de um tubo com 12mm de diâmetro inserido na sua superfície. A partir do momento que o nível de água atingiu 200mm o ensaio foi iniciado e determinou-se o tempo necessário para atingir a marca de 100mm e, consequentemente, o coeficiente de permeabilidade. Tal procedimento é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Metodologia adotada por Tsangouri *et al.* (2022) para a determinação do coeficiente de permeabilidade de água



Fonte: Tsangouri *et al.* (2022, p. 6), texto traduzido para o português

Cappelesso *et al.* (2023a) buscaram analisar a capacidade cicatrizante de um agente de cura à base de bactérias de um concreto previamente fissurado sob condições de gelo e desgelho, contendo a influência de sais de descongelamento. Assim sendo, os autores fizeram uso de corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Com o intuito de garantir a não ocorrência da ruptura total do corpo de prova, eles foram envolvidos por uma fita adesiva com espessura de 0,2 à 0,4mm e presos com uma pinça manual antes de serem submetidos ao ensaio de tração para promover sua fissuração. O acompanhamento do processo de autocicatrização ocorreu através de análise visual por microscopia.

A partir da moldagem de corpos de prova cilíndricos de concreto, Souza e Sanchez (2023) buscaram avaliar o efeito de autocicatrização autógena e autônoma no que tange a recuperação da matriz cimentícia composta por diferentes materiais – adições minerais e aditivo cristalizante. Neste cenário, os autores empregaram o ensaio de resistência à compressão para fissurar os corpos de prova, levando em consideração diferentes taxas de carregamento a partir da sua respectiva resistência previamente determinada. De forma a avaliar o comportamento cicatrizante dos traços avaliados no estudo em questão, Souza e Sanchez (2023) empregaram a metodologia de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica, conforme ASTM C 1876 (2019), porosidade aparente pelo método de imersão, teste de rigidez e resistência à compressão.

Huynh, Imamoto e Kiyohara (2022) buscaram avaliar o processo de biomineralização utilizando a *Bacillus subtilis natto* relacionado à hidratação do cimento e a sua capacidade de autocicatrização. Com o objetivo de avaliar a capacidade cicatrizante os autores moldaram corpos de prova 40x40x160mm que foram fissurados através do ensaio de tração na flexão com 3 pontos de apoio. Com o intuito de executar uma avaliação não destrutiva, Huynh, Imamoto e Kiyohara (2022), executaram o ensaio de absorção de água por capilaridade seguindo o prescrito pela ASTM C 1586 (2020) e a análise visual das fissuras ao longo do tempo. Por outro lado, visando avaliar a recuperação das propriedades mecânicas relacionado à cicatrização da matriz cimentícias, executou-se um ensaio multicíclico com corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Após fissurado, a cada 7 dias os corpos de prova tinham sua resistência à compressão determinada, e o par do corpo de prova era carregado até 50% da resistência determinada e era submetido novamente ao processo de cura, sendo esse processo repetido até a idade de 90 dias.

Levando-se em consideração que atualmente existem diferentes formas aplicadas pela comunidade científica para realizar o processo de fissuração de corpos de prova e, posteriormente, o acompanhamento da sua cicatrização, apresenta-se a Quadro 9, desenvolvida por Cappelesso (2023b), apresentando as diferentes metodologias aplicadas e destacando suas vantagens e limitações.

Quadro 9 – Visão geral das principais metodologias empregadas para acompanhar o processo de cicatrização e recuperação de propriedades mecânicas

(continua)

Metodologia	Propósito	Vantagens	Fatores influentes relacionados à execução e interpretação do ensaio	Limitações
Acompanhamento do processo de cicatrização				
Microscopia ótica	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do fechamento de fissuras na superfície - Quantificação da mudança na largura da fissura ou área 	<ul style="list-style-type: none"> - Não destrutivo - Princípio de funcionamento simples e facilmente implementável - Monitoramento do fechamento da fissura no tempo e no espaço (ao longo da fissura) possível 	<ul style="list-style-type: none"> - A água na superfície pode dificultar a interpretação das imagens 	<ul style="list-style-type: none"> - Nenhuma garantia sobre o fechamento da fissura em partes mais profundas e a estanqueidade ao líquido - Nenhuma taxa volumétrica de fechamento de fissuras pode ser obtida
Microscopia fluorescente e cortes finos	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliar a autocicatrização em profundidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Boa visualização da cicatrização de fissuras em toda a profundidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilidade da matriz - Preparação de amostra 	<ul style="list-style-type: none"> - Teste destrutivo - Ao extrair a amostra, podem ocorrer danos
Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de imagens em alta resolução - Confirmar a presença de produtos curativos - Fornecer informações sobre a composição química quando combinado com EDX (veja abaixo) 	<ul style="list-style-type: none"> - Elétrons retroespelhados (BSE): diferenças no número atômico podem fornecer informações sobre as fases - Elétrons secundários: informações topográficas 	<ul style="list-style-type: none"> - Preparação de amostras (polida para BSE, não polida para imagens topográficas) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequenas amostras e área de teste - Muitas imagens precisam ser estudadas para resultados representativos
Raios X de energia dispersiva (EDX)	<ul style="list-style-type: none"> - Identificação química dos produtos autocicatrizantes - Análise qualitativa e quantitativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificação química de produtos de cicatrização 	<ul style="list-style-type: none"> - Localização selecionada: mapeamento elementar e varreduras de linha 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequenas amostras e área de teste
Microtomografia computadorizada de raios X (μ CT)	<ul style="list-style-type: none"> - Definindo dano, falha, porosidade: volume da fissura e produtos de cicatrização - Definir a geometria da fissura 	<ul style="list-style-type: none"> - Teste não destrutivo - Prova do dano - Quantificação do fechamento de fissuras por processos de autocicatrização 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualidade da análise de dados 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequenos tamanhos de amostra - Restrito a pastas e argamassas
Tomografia computadorizada de raios X (TC)	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar as capacidades internas de autocicatrização - Identificação e densidade de fase 	<ul style="list-style-type: none"> - Pode ser usado no nível do concreto 		<ul style="list-style-type: none"> - Equipamentos maiores
Radiografia de raios X	<ul style="list-style-type: none"> - Medição da absorção de umidade ao longo do tempo - Visualização da corrosão de vergalhões em concreto fissurado e curado 	<ul style="list-style-type: none"> - Teste não destrutivo - Imagens em alta resolução espacial 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobreposição adequada de imagem - Comparação entre corpos de prova no estado seco e úmido 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil obter uma sobreposição perfeita das imagens antes e depois da cicatrização

Metodologia	Propósito	Vantagens	Fatores influentes relacionados à execução e interpretação do ensaio	Limitações
Acompanhamento do processo de cicatrização				
Ressonância magnética nuclear (RMN)	- Abordagem qualitativa e quantitativa do transporte aquaviário	- Teste não destrutivo - Permitindo um estudo detalhado ao longo do tempo	- Regiões cheias de água podem ser confundidas com locais de fissuras	- Tamanho de amostra pequeno (recursos nm) - Equipamento não amplamente disponível
Recuperação das propriedades mecânicas				
Propagação de ondas ultrassônicas	- Detecte a qualidade do concreto, defeitos internos, rachaduras e vazios	- Princípio de funcionamento simples e facilmente implementável - Resultados imediatos, portátil, grande poder de penetração - Custo moderado	- Variabilidade no acoplamento entre o sensor e a superfície da amostra leva à variabilidade nos resultados	- Qualitativamente confiável - O teor de umidade, as mudanças de temperatura, a presença de reforço e a formação de pontes de fissuras locais podem afetar os resultados - Amostras ásperas, de formato irregular, muito pequenas, finas ou não homogêneas são difíceis de inspecionar.
Frequência de ressonância	- Determinar a taxa e extensão da autocicatrização	- Teste não destrutivo - Quantificação do fechamento da fissura - Sensível a pequenas variações	- A hidratação continuada pode mascarar a eficiência da autocicatrização - Flutuações nas medições devido às mudanças de saturação	- A análise comparativa é definida por recursos controlados, como saturação e taxa de dano
Teste de recuperação mecânica	- Avaliação da recuperação de propriedades mecânicas	- Correlacionar a recuperação de diferentes propriedades mecânicas (resistência, rigidez, deformação e capacidade de deformação) com o fecho de fissuras. - Mede a evolução de parâmetros úteis para projeto estrutural	- Taxa de carregamento - Escolha dos pontos característicos da curva de carregamento e escolha dos parâmetros utilizados para cálculo dos índices de recuperação	- Teste comparativo necessário em amostras sólidas - Medição das propriedades gerais da amostra - Necessidade de distinguir entre os efeitos do envelhecimento do concreto e os efeitos da cura
Emissão acústica	- Monitoramento contínuo da iniciação e propagação de fissuras - Avaliação da cicatrização - Acompanhamento da liberação de água pelos SAPs	- Quebra de cápsulas, rachaduras e cicatrização podem ser monitoradas - Avaliação da durabilidade de elementos de concreto submetidos a diferentes tipos de carregamento	- Posicionamento de sensores - Defeitos ou fissuras iniciais bloqueando o caminho de viagem das ondas para fissuras posteriores	- Caro - Defeitos já presentes não são detectados

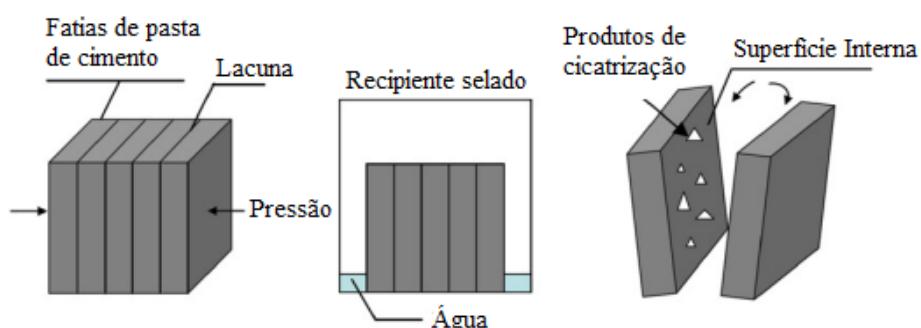
Fonte: Adaptado de Cappelesso *et al.* (2023b, p. 33), texto traduzido para o português

2.1.4.2 Métodos de avaliação de produtos de hidratação formados em fissuras

Kan *et al.* (2010) desenvolveram um estudo objetivando avaliar o comportamento de cicatrização do *Engineered Cementitious Composite* (ECC). De forma a caracterizar os produtos de cicatrização precipitados, os autores utilizaram um microscópio eletrônico de varredura equipado com um sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Amostras retiradas das fissuras cicatrizadas também foram submetidas por Kan *et al.* (2010) ao microscópio eletrônico analítico, além das metodologias de Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e difração de raios-x (DRX).

No estudo desenvolvido por Huang, Ye e Damidot (2013), os autores caracterizaram e quantificaram os produtos de cicatrização de corpos de prova utilizados para obter informações de autocicatrização em decorrência de hidratação adicional. Para induzir a fissuração e possibilitar a caracterização dos produtos formados durante a autocicatrização de corpos de prova, os autores fatiaram partes de um corpo de prova prismático com dimensões de 40x40x160mm. As faces dessas fatias obtidas foram cuidadosamente lixadas e todas as fatias foram presas de forma que todas ficassem próximas e possibilissem a cicatrização entre suas lacunas, conforme apresentado na Figura 13. Neste contexto, os corpos de prova foram submetidos a uma análise em MEV equipado com EDS para observação e investigação da natureza química dos produtos cicatrizados. Posteriormente, esse material foi finamente moído e submetido às metodologias de FTIR e termogravimétrica (TGA) para definir o percentual de cada componente na composição.

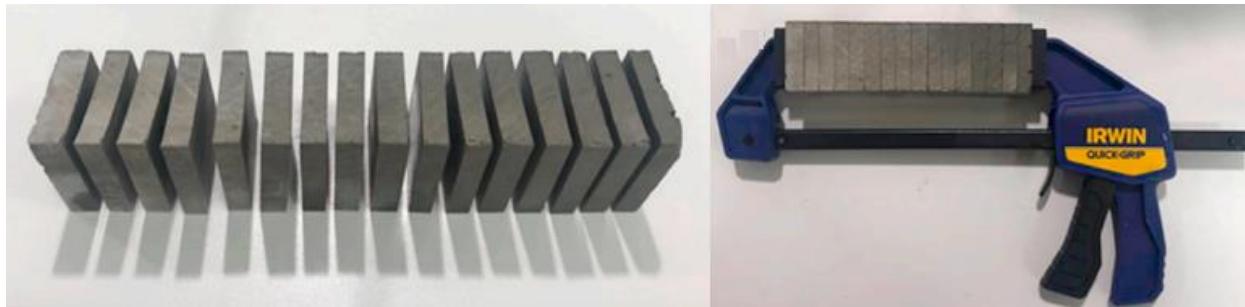
Figura 13 – Metodologia empregada por Huang, Ye e Damidot (2013) para caracterização dos produtos de cicatrização



Fonte: Huang, Ye e Damidot (2013, p.73), texto traduzido para o português

É importante destacar que a metodologia empregada por Huang, Ye e Damidot (2013) foi replicado em um estudo recente desenvolvido por Namnoum *et al.* (2021), conforme Figura 14, que avaliou a recuperação mecânica de materiais cimentícios com adições minerais.

Figura 14 – Aplicação da metodologia desenvolvida por Huang, Ye e Damidot (2013) por Namnoum *et al.* (2021)



Fonte: Namnoum *et al.* (2021, p.4)

Em sua tese desenvolvida para avaliar diferentes técnicas de autocicatrização, Pacheco (2020) realizou as análises de MEV e DRX para estudar e identificar os componentes de cicatrização. A autora em questão fez a coleta dos cristais formados diretamente nas fissuras com uma agulha esterilizada.

Para validar e estudar a possibilidade do emprego de agregados leves encapsulados com resina epóxi, Wang *et al.* (2021) também investigaram os produtos precipitados nas fissuras dos corpos de prova. Os autores retiraram cuidadosamente o material diretamente do corpo de prova para submeter às análises de DRX e TGA.

Conforme foi possível perceber no levantamento bibliográfico, grande parte das pesquisas em horizonte extenso de tempo utilizam as mesmas metodologias para a execução da caracterização dos produtos de cicatrização formados. Desta forma, foi elaborado o Quadro 10 a partir das informações descritas na revisão sistemática elaborada por Bekas *et al.* (2016) com as principais técnicas de avaliação e sua finalidade.

Quadro 10 – Principais técnicas empregadas para análise dos produtos de cicatrização e seu objetivo

Técnica	Objetivo
Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR)	Técnica baseada nas interações moleculares e no campo dos materiais autocicatrizantes é empregado para confirmar a capacidade cicatrizante, comparar matrizes cicatrizados e não cicatrizados e monitorar o processo de autocicatrização
Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)	Permite comparar a concentração de diferentes grupos funcionais presentes na amostra
Espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN)	Possibilita identificar interações entre átomos e confirmar a formação de autocicatrização através de reações químicas
Microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET)	Técnicas de microscopia são empregadas para confirmar os componentes da estrutura cicatrizada, sendo o tipo de técnica empregada dependente do tamanho estudado
Microscopia de força atômica (MFA)	Empregado para avaliar o desempenho da cicatrização em termos de temperatura, tempo e mobilidade local dos átomos dos materiais estudados
Análise de difração de raios X (DRX)	Utilizado para identificar certas interações entre moléculas e interações de empilhamento exibidas como um padrão de difração
Espectroscopia de fotoemissão de raios X (XPS)	XPS é uma técnica espectroscópica quantitativa sensível à superfície que mede a composição elementar na faixa de partes por mil, o estado químico e o estado eletrônico dos elementos que existem dentro de um material

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Bekas *et al.* (2016)

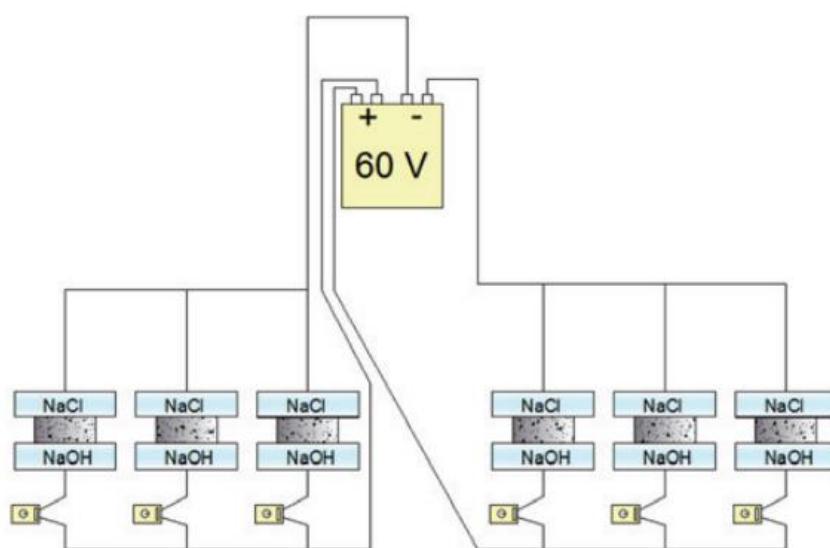
2.1.4.3 Métodos de avaliação da durabilidade de matrizes autocicatrizadas

Azarsaa, Guptaa e Biparvab (2019) desenvolveram um estudo com o intuito de avaliar a influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas e características de durabilidade de concretos possuindo diferentes tipos de cimento. Em se tratando da análise relacionada à durabilidade, os autores supracitados empregaram diferentes metodologias, conforme descrito a seguir.

Uma das formas de avaliação empregadas por Azarsaa, Guptaa e Biparvab (2019) foi a permeabilidade rápida de cloretos através da prescrição da ASTM C 1202 (2019). Assim sendo, foram utilizados 4 discos de concreto com 5cm de espessura obtidos a partir de corpos de prova cilíndricos com 10cm de raio e 20cm de altura. De forma a submeter somente a face da superfície dos corpos de prova foi feita a selagem da área do perímetro do corpo de prova com uma resina epóxi para não influenciar no ensaio. Posteriormente, os corpos de prova passaram pela retirada do seu ar interno à vácuo por um período de 3 horas para ser saturado através de submersão em água por 18 horas. Após a preparação, as amostras foram montadas em células com dois reservatórios preenchidos com Hidróxido de Sódio (NaOH), atuando como um ânodo, e Cloreto de Sódio (NaCl), atuando como cátodo. Para permitir a transferência de íons

cloreto através das soluções e, consequentemente, possibilitar a determinação da carga total para avaliar a permeabilidade de cloretos, foi aplicada uma diferença de potencial de 60 V por um período de 6 horas. Essa metodologia também foi empregada por Helene *et al.* (2018) em seu estudo, sendo que os autores ilustraram o processo descrito, conforme a Figura 15. Cabe destacar que Rangel (2024) indicou a utilização do potencial de 30 V por identificar que a voltagem indicada pela norma é demasiada para corpos de prova fissurados.

Figura 15 – Ilustração do procedimento prescrito pela ASTM C1202



Fonte: Helene *et al.* (2018, p. 556)

Ainda, Azarsaa, Guptaa e Biparvab (2019) utilizaram o coeficiente de permeabilidade de água, preconizado pela DIN 1048 (1991), para avaliar a durabilidade do concreto. Conforme o procedimento, foram submetidos 3 corpos de prova cônicos, com diâmetro menor de 150mm e o diâmetro maior de 175mm, à uma pressão hidrostática de 0,5 MPa (aproximadamente 5 bar) por um período de 72 horas. De forma a manter uma aplicação de água padronizada, utilizou-se uma borracha com 100mm de diâmetro para tal função. Ao final do ensaio, os corpos de prova foram divididos ao meio para possibilitar a visualização da penetração de água em sua microestrutura, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Ilustração do procedimento prescrito pela DIN 1048



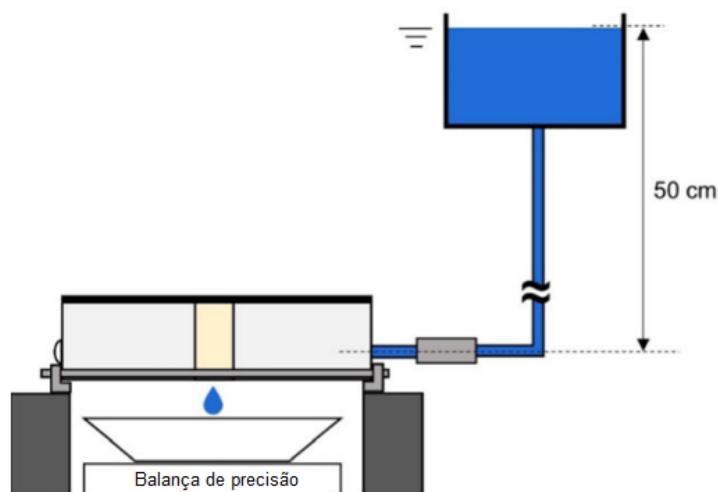
Fonte: Azarsaa, Guptaa e Biparvab (2019, p. 21), texto traduzido para o português

Por fim, os autores supracitados fizeram uso da análise de coeficiente de difusão de cloreto conforme ASTM C1556 (2016). Assim sendo, discos de concreto com 7,5cm de espessura obtidos a partir de corpos de prova cilíndricos com 10cm de raio e 20cm de altura foram selados em seu perímetro e imersos em tanques contendo 3gr/L de hidróxido de sódio até a massa não se alterar mais de 0,1%. Por fim, os espécimes foram inseridos em uma solução de Cloreto de Sódio (NaCl) por um período de dois meses, sendo registrado a massa antes e após esse período de imersão.

Com o intuito de avaliar diferentes técnicas de autocicatrização, Pacheco (2020), em sua tese, empregou duas formas de deterioração antes do fenômeno de autocicatrização para avaliar a durabilidade das matrizes cimentícias: câmara de carbonatação acelerada e câmara de névoa salina. Em ambos os ensaios a autora citada utilizou corpos de prova de concreto prismáticos com dimensões de 6x6x18cm contendo uma barra de aço de CA 60 posicionada a 2cm da base do corpo de prova. De forma a avaliar a carbonatação acelerada, Pacheco (2020) submeteu os corpos de prova à uma câmara com 3% de CO₂ e uma umidade de 70% por um período de 28 dias. Para a avaliação da deterioração em névoa salina, a autora seguiu o prescrito pela ASTM B 117 (2019), usando uma câmara com uma concentração de 5% de NaCl em ambiente saturado, com uma temperatura de 35°C e o pH da solução salina entre 6,5 e 7,2.

Anglani *et al.* (2022) desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar a durabilidade de corpos de prova contendo poliuretano encapsulado com diferentes tipos de cápsulas em âmbito interlaboratorial. Os autores avaliaram a durabilidade das matrizes cimentícias através de permeabilidade à água. Neste contexto, corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16cm foram saturados em água desmineralizada e, posteriormente, acoplou-se um cano com 4mm de diâmetro, associado à uma caixa de água na localizada a 50cm acima do corpo de prova, na sua face de menor área. Por fim, os autores realizaram a vedação das faces do espécime ensaiado, deixando exposto somente a face com a presença da fissura avaliada e liberaram o fluxo de água por um período de 6 minutos. Abaixo do corpo de prova posicionou-se uma balança de forma a mensurar a quantidade de água passante. O procedimento é ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Ilustração do procedimento adotado por Anglani *et al.* (2022) em seu estudo



Fonte: Anglani *et al.* (2022, p. 143), texto traduzido para o português

Essa metodologia foi aplicada de forma semelhante no estudo de Ma, Qian e Zhang (2014), entretanto a pressão da água foi aplicada através de um pressurizador, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Metodologia empregada por Ma, Qian e Zhang (2014)



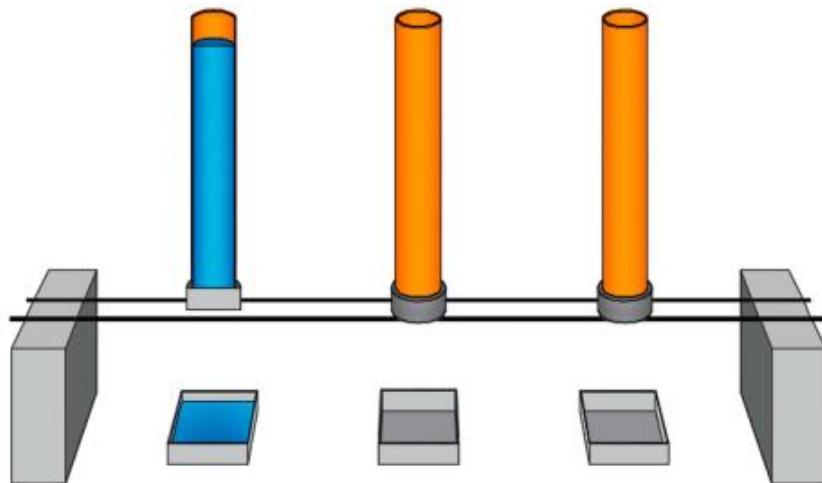
Fonte: Ma, Qian e Zhang (2014, p. 94)

Objetivando investigar o efeito da biomineralização no concreto através da incorporação de bactérias sem a presença de substrato e alimentação química Chaurasia *et al.* (2019) empregaram ataque por sulfato, segundo a preconização da ASTM C 1012 (1991), de forma a avaliar a durabilidade das matrizes cimentícias cicatrizadas. Assim sendo, corpos de prova prismáticos de 100x100x500mm foram expostas à uma solução de 5% de sulfato de magnésio, em temperatura ambiente, mantendo o pH entre 6,0 e 8,0. A partir desse corpo de prova, foram retirados espécimes de 50x100mm os quais foram analisados nas idades de 30, 60, 90, 120 e 180 dias após a exposição. A concentração de íons sulfato foi determinado conforme IS 4032 (1985).

Cuenca, Postolachi e Ferrara (2023) buscaram entender os efeitos da inclusão de nanofibras de celulose em Concretos de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em termos de recuperação de durabilidade e propriedades mecânicas devido ao estímulo do comportamento de autocicatrização. Neste contexto, os autores utilizaram a permeabilidade da água para avaliar a durabilidade das matrizes cimentícias, utilizando discos de 4cm de espessura obtidos a partir de corpos de prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 30 cm de altura. Posicionou-se um tubo de PVC com 500mm de altura acima de uma das faces do disco, em que o corpo de prova foi completamente selado com silicone, deixando somente a face oposta livre para o fluxo de água. A água foi inserida até a altura de 450mm do tubo de PVC e mediu-se a quantidade de água passante pelo corpo de prova após 5, 10, 20 e 30 minutos, sendo

a avaliação final num período de 3 horas. O procedimento descrito é ilustrado na Figura 20.

Figura 19 – Ilustração do procedimento adotado por Cuenca, Postolachi e Ferrara (2023)



Fonte: Cuenca, Postolachi e Ferrara (2023, p. 8)

A partir da revisão de literatura é possível entender que existem diferentes formas de realizar a avaliação da durabilidade de matrizes cimentícias cicatrizadas. Assim sendo, apresenta-se o Quadro 11, desenvolvido por Cappellessi *et al.* (2023b), que apresenta as vantagens e limitações das principais metodologias de avaliação deste quesito. Neste contexto, ressalta-se os ensaios de permeabilidade e absorção de água, que proporcionam resultados coerentes e são mais simples de serem executados.

Quadro 11 – Visão geral das principais metodologias empregadas para avaliar a durabilidade de matrizes autocicatrizadas

(continua)

Metodologia	Propósito	Vantagens	Fatores influentes relacionados à execução e interpretação do ensaio	Limitações
Ensaio de permeabilidade de água	- Avaliar o fluxo de água através de fissuras cicatrizadas - Obtenção do coeficiente de permeabilidade à água - Avaliar a recuperação da estanqueidade	- Diferentes pressões podem ser aplicadas - Avaliação da estanqueidade - Medição da resistência contra penetração de substâncias agressivas	- Geometria, tortuosidade e largura das fissuras - Pressão da água - A alta velocidade da água pode remover produtos de cicatrização e causa imprecisão nos resultados do teste	- Restrito a elementos saturados
Ensaio de permeabilidade de gás	- Obtenção do coeficiente de permeabilidade aos gases - Avaliar a recuperação da estanqueidade ao gás		- Tipo de gás - Pressão do gás	- Configuração com altas demandas para controle de medição preciso
Ensaio de absorção de água	- Taxa de absorção (condutividade hidráulica) de água	- Muito mais simples, menos demorado e não requer um dispositivo especial quando comparado com os testes de permeabilidade	- A absorção não se restringe às fissuras, mas também através da matriz por porosidade capilar - Tortuosidade e geometria de fissuras	- Restrito a elementos secos - A interpretação dos resultados pode ser difícil no caso de cicatrização de fissuras, o que pode aumentar a absorção em comparação com amostras fissuradas e não curadas devido a forças capilares mais altas
Penetração de cloreto	- Avaliar o transporte de cloreto e risco de corrosão da armadura - Determinação do perfil Cl próximo à fissura - Determinação do início da corrosão, limite de Cl	- Avaliação direta do desempenho da autocicatrização em ambientes contendo cloreto	- Grau de saturação do concreto determina o mecanismo de transporte - Deve ser feita uma escolha em relação ao método de teste para avaliar a difusão de Cl, absorção, migração	- Necessidade de testes acelerados em vez de testes realistas, que são demorado

(conclusão)

Metodologia	Propósito	Vantagens	Fatores influentes relacionados à execução e interpretação do ensaio	Limitações
Ataque por sulfato	- Avaliar a degradação por sulfato	- Avaliação direta do desempenho da autocicatrização em ambientes contendo sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> - Concentração de sulfato - Tamanho da amostra - pH - Temperatura - Tipo de ligante (quantidade de C₃A) - Presença de MCS - Tipo de imersão (ciclos totais, parciais ou de molhagem e secagem) 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de testes acelerados devido à evolução lenta em caso de testes realistas - Metodologias sensíveis que devem ser usados para estimar o dano ao simular condições reais não aceleradas
Ensaio de carbonatação	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do transporte de CO₂ e risco de corrosão das armaduras - Determinação do perfil de neutralização 	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação direta quanto à resistência à carbonatação de materiais cimentícios cicatrizantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Processo lento em condições naturais - Risco de %CO₂ elevado; artefatos por alta %CO₂ - Umidade relativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de ensaios acelerados para limitar a duração dos testes - Sugere-se que a concentração de CO₂ não seja superior a 4%

Fonte: Adaptado de Cappellessos *et al.* (2023b, p. 33), texto traduzido para o português

2.2 CIMENTO TERNÁRIO DO TIPO LC³

A composição ternária cimentícia do tipo LC³ é classificada como uma família de cimentos formadas pela substituição parcial do clínquer por argila calcinada e calcário. A nomenclatura LC³ é oriunda, justamente, dos seus componentes em inglês: *Limestone Calcined Clay Cement*. O emprego de MCS na composição do cimento possui grande potencial em termos de sustentabilidade, uma vez que apresenta grande impacto em termos de redução das emissões de CO₂. Em decorrência disso é possível notar um aumento significativo do interesse no desenvolvimento de estudos acerca deste tema (SCRIVENER *et al.*, 2019b; ZUNINO, MARTIRENA, SCRIVENER, 2021).

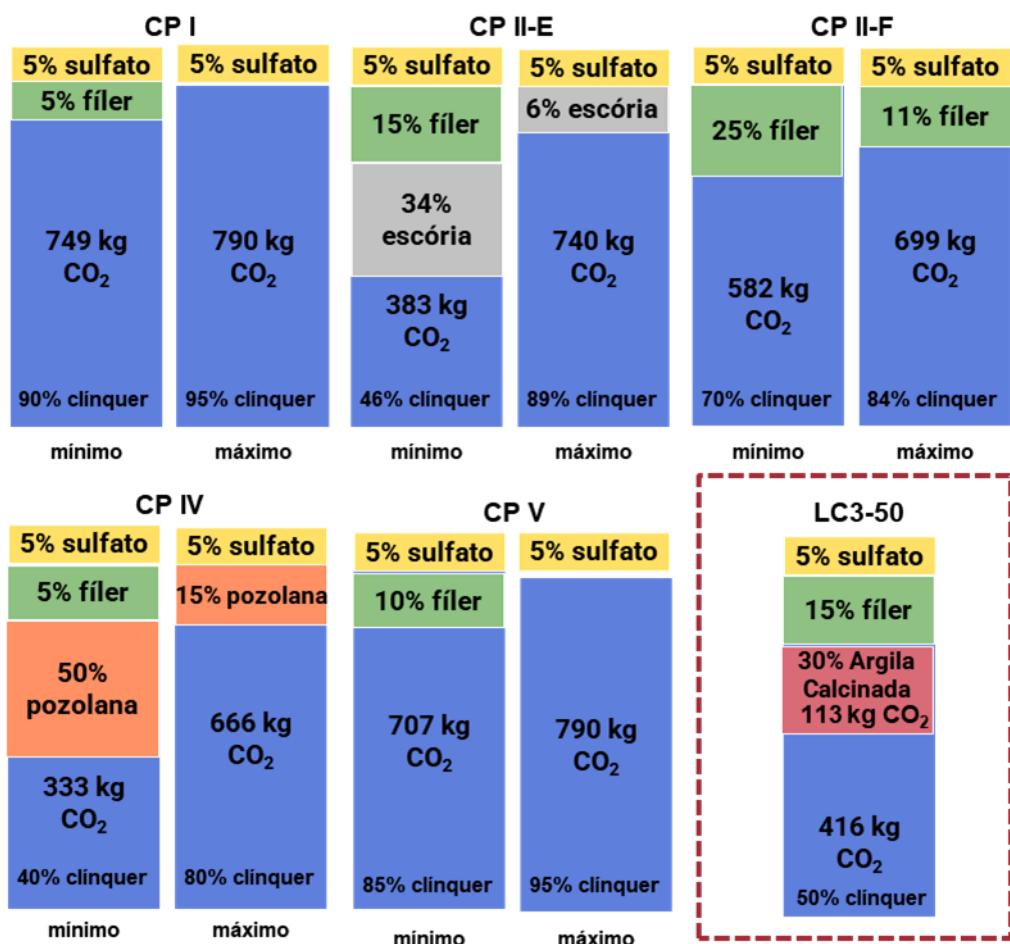
Snellings (2016) destaca que a obtenção de cinzas volantes e escórias de alto forno são muito menores do que a produção do cimento demanda, tornando necessário avaliar outros MCS. Scrivener *et al.* (2019b) informam que a disponibilidade deste material tende a ser ainda menor em decorrência da redução dos processos de queima do carvão para geração de energia e da reciclagem do aço.

Neste sentido, as argilas cauliníticas (metacaulim), produzidas a partir da queima em temperaturas entre 700°C e 850°C, possuem grande potencial como MSC, principalmente quando combinadas com o calcário. Isso decorre da elevada capacidade pozolânica das argilas cauliníticas e, principalmente, da reação sinergética entre a alumina, presente em sua composição, e o calcário. Essa reação possibilita a formação de novas fases que desencadeiam o refinamento dos poros e, consequentemente, melhorias em termos de resistência. Destaca-se que a queima da argila ocorre em temperaturas consideravelmente menores que o cimento, possuindo vantagem em termos de sustentabilidade nesse sentido (ANTONI *et al.*, 2012; FERNANDEZ; MARTIRENA; SCRIVENER, 2011; SCRIVENER *et al.*, 2019b).

Scrivener *et al.* (2019b) ainda destacam que na calcinação da argila é formado aproximadamente 250 kg/tonelada de CO₂, enquanto na produção do clínquer este valor é em torno de 850 kg/tonelada. Malacarne (2019) informa que os MCS empregados na composição do LC³ são disponíveis em abundância, tornando a sua aplicabilidade em grandes escalas ainda mais viável. Dias *et al.* (2022) desenvolveram um gráfico comparativo entre o LC³-50 e os demais cimentos atualmente normatizados no Brasil, evidenciando a menor emissão de CO₂ relacionado à sua

composição. Os autores consideraram 832 kg de emissão de CO₂ por tonelada de clínquer para os cimentos brasileiros. Embora o cimento CPII E e o CPIV apresentem emissões menores, a disponibilidade das suas matérias primas é mais limitada, o que dificulta a sua produção. O gráfico citado é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Comparativo entre emissões de CO₂ do cimento ternário LC³-50 e os demais cimentos brasileiros



Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (2022, p. 17)

Em termos financeiros é comum encontrar o metacaulim com valores muito maiores do que o cimento. Isso decorre da sua utilização nas indústrias de papel e cerâmica, que exigem maior pureza do material. Entretanto, a presença de aproximadamente 40% de caulinita na composição da argila já é o suficiente para garantir bom desempenho do LC³ (SCRIVENER *et al.*, 2019b). Isso é comprovado no estudo de Avet e Scrivener (2018), que testaram argilas com diferentes teores de caulinita.

2.2.1 Reações de hidratação

As reações químicas que envolvem a hidratação do cimento apresentam elevada complexidade. Tal fato ocorre em função da sua composição, que apresenta diferentes componentes e, consequentemente, cinéticas de reações químicas distintas, acontecendo de forma individual ou simultaneamente. Em termos práticos a hidratação do cimento é classificada com a reação de partículas anidras com água, resultando em novos produtos (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Para entender a diferença entre a reação do cimento Portland e do cimento ternário do tipo LC³, principalmente na precipitação dos produtos hidratados durante a autocicatrização, é necessário entender o processo de hidratação de ambos.

2.2.1.1 Cimento Portland

Antes de iniciar a discussão acerca do mecanismo de hidratação é importante determinar quais compostos estão envolvidos em tal fenômeno. Assim sendo, apresenta-se o Quadro 12 a seguir, que faz um resumo acerca disso. Mehta e Monteiro (2014) destacam que embora as reações envolvam compostos de cálcio, as análises químicas costumam apresentar os elementos em termos de óxido.

Quadro 12 – Compostos envolvidos na hidratação do cimento Portland

Composto	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	S
H ₂ O	H
3CaO·SiO ₂	C ₃ S
2CaO·SiO ₂	C ₂ S
3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
4CaO·3Al ₂ O ₃ ·SO ₃	C ₄ A ₃ S
3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
CaSO ₄ ·2H ₂ O	CSH ₂

Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 210)

Para a hidratação do cimento Portland tem-se conhecimento que são envolvidos dois mecanismos diferentes. O primeiro deles é a hidratação por dissolução-precipitação que está associada a completa reorganização dos compostos ao longo do processo de hidratação. Esse mecanismo contempla a dissolução das partículas anidras em seus constituintes iônicos, a formação de hidratos em solução e eventual precipitação de hidratos. O segundo mecanismo é o chamado de topoquímico ou hidratação no estado sólido, em que as reações de hidratação acontecem na superfície da partícula anidra, sem que o componente entre em solução. A hidratação por dissolução-precipitação é predominante nas idades iniciais e a hidratação no estado sólido acontece em idades mais avançadas, dada a restrição da mobilidade iônica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Beaudoin e Odler (2019) destacam que a cinética e evolução das reações de hidratação pode ser influenciada pelos seguintes fatores:

- Composição das fases do cimento e presença de íons externos na fase cristalina do clínquer;
- Finura e distribuição do tamanho das partículas do cimento;
- Relação água/cimento;
- Temperatura da cura;
- Presença de aditivos químicos;
- Presença de adições minerais.

Segundo Beaudoin e Odler (2019) as reações de hidratação acontecem em 4 estágios diferentes: pré-indução (I), indução (II), aceleração (III) e desaceleração (IV), conforme descrito a seguir.

No período de pré-indução (I), que acontece nos primeiros minutos pós mistura, a água entra em contato com as partículas do cimento, acarretando a dissolução dos sulfatos alcalinos e a formação de uma solução aquosa contendo os íons K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} . Além disso, o sulfato de cálcio dissolve até saturação, liberando íons Ca^{2+} e íons SO_4^{2-} adicionais. Durante esse período também ocorre a dissolução das fases anidras C_3S , C_3A e C_4AF . O C_3S é responsável por formar uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na superfície das partículas de cimento. A dissolução do C_3A e C_4AF culmina na liberação de íons que reagem com o Ca^{2+} e SO_4^{2-} e formam agulhas de etringita (fase AFt), também na superfície da partícula de cimento (BEAUDOIN; ODLER, 2019; QUARCIONI, 2008).

O composto que possui maior impacto na cinética da reação de hidratação cimento é o C₃A. Quando entra em contato com a água, sua reação é imediata, liberando uma grande quantidade de calor. Em decorrência dessa característica, necessita-se utilizar o sulfato de cálcio, comumente chamado de gesso, para controlar a reação e viabilizar a aplicação dos compostos a base de cimento Portland. Durante esse processo é notável a formação de, principalmente, etringita (C₆A₃H₃₂) e, em menores quantidades, de monossulfato (C₄A₃H₁₈) (BEAUDOIN; ODLER, 2019; BULLARD *et al.*, 2011).

Além disso, Mehta e Monteiro (2014) destacam que o C₄AF também pode reagir com a água e formarem produtos estruturalmente semelhantes aos da reação do C₃A. Entretanto os autores destacam que essa reação é influenciada pela da sua composição química e temperatura de formação, mas que de maneira geral essa fase ferrita possui uma reatividade mais lenta do que o C₃A.

Durante a indução (II), que acontece nas primeiras horas após a mistura, é iniciado um período em que ocorre uma redução brusca na velocidade da hidratação, após o processo inicial muito acelerado. Nesse momento, a concentração de hidróxido de cálcio atinge o seu máximo, posteriormente iniciando o seu declínio. A concentração de íons SO₄²⁻ se mantém constante ao passo que a fração consumida na formação da etringita é reposta pela dissolução de sulfato de cálcio adicional (BEAUDOIN; ODLER, 2019; QUARCIONI, 2008).

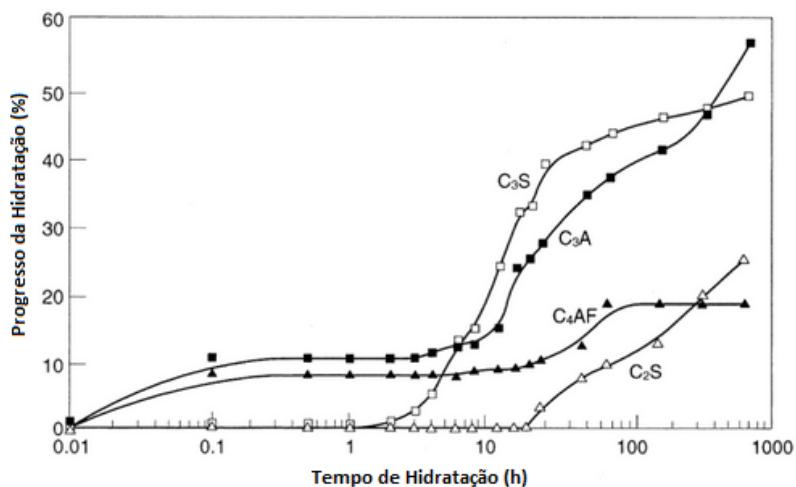
A partir do período de aceleração (III), que ocorre de 3 a 12 horas após mistura, é perceptível a retomada da aceleração das reações de hidratação. Ainda, é observado que a hidratação do C₃S é mais rápida, formando uma segunda fase de precipitação de C-S-H, além da hidratação do C₂S. O hidróxido de cálcio cristalino (portlandita) é precipitado da solução aquosa, fazendo com que a concentração de íons Ca²⁺ diminua. O sulfato de cálcio é completamente dissolvido e a concentração dos íons SO₄²⁻ começam a reduzir em função da formação da fase AFt e da adsorção pela superfície do C-S-H (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Por fim, no período de desaceleração (IV) acontece o avanço das reações e, consequentemente, a menor disponibilidade de produtos a serem hidratados, iniciando um período de redução gradativa da hidratação. Durante essa fase se destaca a continuidade da formação do C-S-H, em que nesse momento o C₂S acaba se tornando mais impactante na precipitação do composto do que o C₃S. Também é nesse momento em que a fase AFt começa a ser transformada em monossulfato (fase

AFm), em consequência da redução da concentração dos íons SO_4^{2-} pela dissolução completa do sulfato de cálcio, e formada pela reação da fase AFt com o C₃A e o C₄AF (BEAUDOIN; ODLER, 2019; QUARCIONI, 2008).

Conforme observado as reações de hidratação possuem elevada complexidade e heterogeneidade, e ocorrem de forma simultânea. De maneira geral os aluminatos reagem de forma muita mais rápida e possuem grande impacto no processo de perda de consistência e solidificação dos compostos a base de cimento. Por outro lado, os silicatos possuem uma reação mais lenta, quando comparados aos aluminatos, mas possuem papel fundamental no desenvolvimento de resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Isso pode ser evidenciado na Figura 21, apresentada a seguir.

Figura 21 – Cinética da reação das fases do clínquer ao longo do tempo



Fonte: Beaudoin e Odler (2019, p.184), texto traduzido para o português

2.2.1.1 Cimento LC³

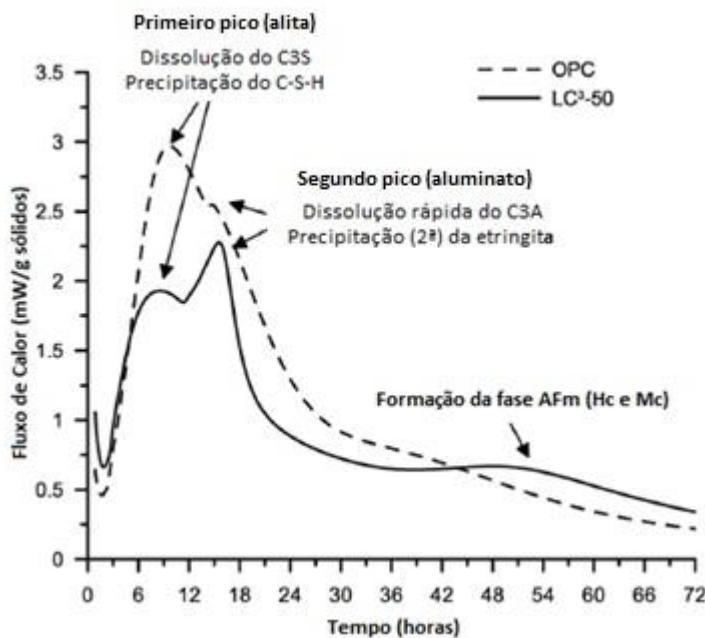
Conforme já destacado anteriormente, o cimento LC³ é uma composição ternária composta de clínquer, gesso, argila calinada e carbonato de cálcio moído. Quando incorporado ao cimento, o fíler calcário pode promover um refinamento dos poros, através do efeito fíler e da nucleação. Além disso, adicionando quantidades adequadas, é possível obter resistências mais elevadas em idades iniciais, pela formação de maior quantidade de C-S-H e hidróxido de cálcio (LOTHENBACH *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2018). As argilas calinadas, quando utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland, podem atuar na melhoria da hidratação inicial através do

efeito fíler e, posteriormente, em idades mais avançadas, apresentam benefícios em função da sua capacidade pozolânica. Em cenários em que a argila calcinada possui alta reatividade e elevada quantidade de aluminatos, existe a possibilidade da formação da fase AFm e a fase C-A-S-H (ALUJAS *et al.*, 2015).

Já se tem conhecimento no meio científico que, quando utilizados em proporções corretas, o pó de calcário e argila calcinada desenvolvem uma reação sinergética (AVET; SCRIVENER, 2018; TANG *et al.*, 2019; ZUNINO; MARTIRENA, SCRIVENER, 2021). Moreira (2020) destaca que em função disso, é possível obter diversas melhorias na microestrutura da pasta de cimento, elevando a resistência mecânica e refinando o sistema de poros. Essa sinergia decorre do fato de quando se incorpora carbonato de cálcio moído na composição do cimento, o C₃A do clínquer reage com a calcita, formando hemi e monocarboaluminatos. Além disso, o metacaulim também reage com a calcita, formando carboaluminatos. Neste contexto, utilizar um material que possua alta quantidade de Al, como a argila calcinada, para incrementar a reação com o pó de calcário torna-se extremamente eficaz. (AVET; SCRIVENER, 2018; TANG *et al.*, 2019).

Uma calorimetria típica de um cimento LC³ é apresentada por Zunino, Martirena e Scrivener (2021). Na Figura 22 é possível notar um primeiro pico, justificado pela reação da fase C₃S, que é melhorado em relação ao cimento referência em função do efeito fíler que o emprego do metacaulim e do pó de calcário proporcionam. No segundo pico observado no cimento LC³ destaca-se que as melhorias são em função da maior quantidade de sulfato adsorvido no C-S-H. Por fim, no último pico, observado entre 36 e 48 horas de hidratação, nota-se melhorias em decorrência da formação da fase AFm e hemi e monocarboaluminatos, oriundos da reação entre o carbonato de cálcio moído e o metacaulim (ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

Figura 22 – Calorimetria típica de um cimento LC³ comparado com um cimento referência



Fonte: Zunino, Martirena e Scrivener (2021, p. 54), texto traduzido para o português

Dada as modificações em sua composição, o cimento ternário do tipo LC³ apresenta diferenças em termos de hidratação quando comparado ao cimento Portland. Os próximos itens foram desenvolvidos com o intuito de descrever tais mecanismos.

2.2.1.1.1 Reação entre o hidróxido de cálcio e a argila calcinada

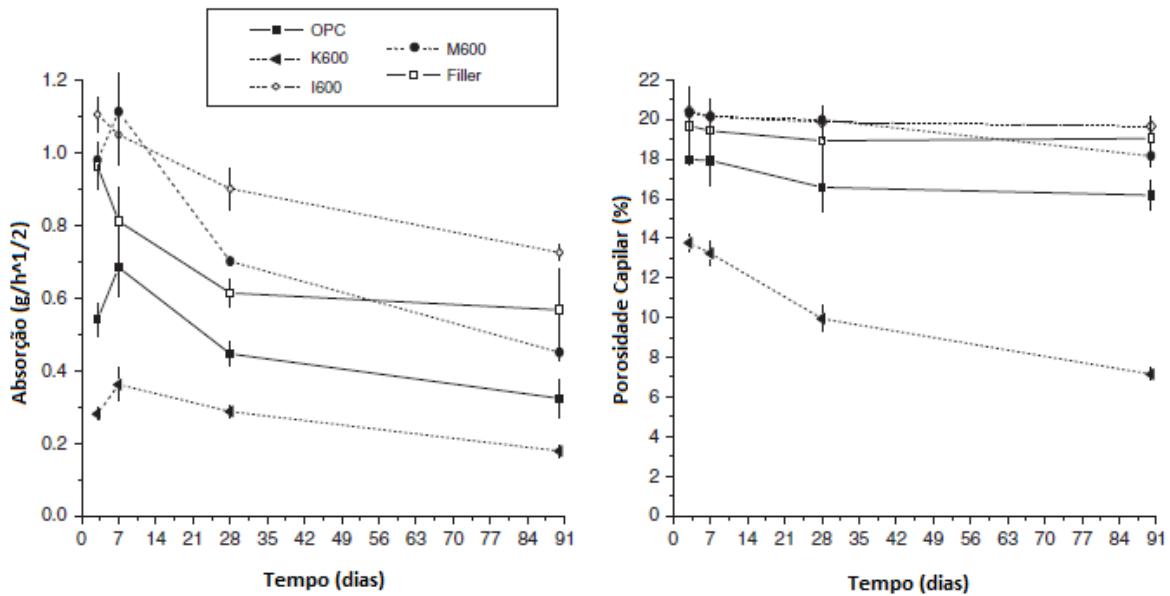
De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) as pozolanas são materiais silicosos, ou silicoaluminosos, que por si só possuem nenhuma, ou pouca, capacidade ligante, entretanto quando finamente moídos e na presença de água podem reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos com características semelhantes aos formados pelo cimento. Dentro da norma citada as argilas calcinadas se enquadram na “Classe N”, sendo classificadas como pozolanas naturais.

Zunino, Martirena e Scrivener (2021) destacam que as argilas calcinadas mais abundantes podem ser de três tipos diferentes: caulinitas, ilitas e montmorilonita. Antoni *et al.* (2012) informam que em diversos estudos publicados, as argilas caulinitas foram as que possuíram maior reatividade, destacando seu benefício como pozolana. Scrivener *et al.* (2019a) salientam que a reatividade da argila calcinada é

dependente da temperatura de calcinação, teor de caulinita na composição e teor de substituição em relação ao cimento.

Ao entrar em contato com a água, o cimento inicia suas reações, possibilitando a formação de C-S-H, etringita e hidróxido de cálcio. Em função da capacidade pozolânica da argila calcinada, em um segundo momento, é desencadeada a reação entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio. Como produto dessa reação, é observado a formação de fases adicionais de C-S-H e, além disso, C-A-S-H e C-A-H (FRÖHLICH, 2019; KRISHNAN; BISHNOI, 2018; MOREIRA, 2020). Fernandez, Martirena e Scrivener (2011) concluem em seu estudo que a incorporação de argilas calcinadas, em especial aquela compostas por argila caulinítica, possibilitam uma boa densificação da matriz, o que, consequentemente, culmina em bons resultados em termos de resistência mecânica. Isso pode ser observado na Figura 23, em que o cimento referência é nomeado de “OPC”, enquanto a composição contendo argila calcinada de caulinita é nomeada como “K600”.

Figura 23 – Resultados de porosidade e absorção de composições binárias contendo argila calcinada



Fonte: Fernandez, Martirena e Scrivener (2011, p. 120), texto traduzido para o português

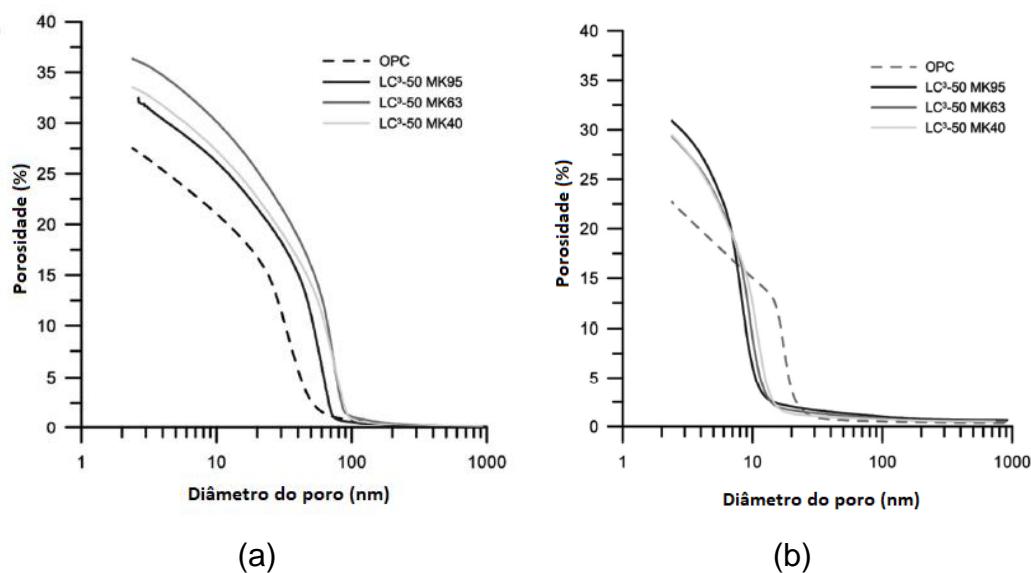
2.2.1.1.2 Reação entre argila calcinada e o carbonato de cálcio moído

Conforme destacado anteriormente, quando incorporado ao sistema, o carbonato de cálcio moído pode proporcionar diversos benefícios a partir do seu efeito

fíler e nucleação (LOTHENBACH *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2018). Em decorrência da incorporação de calcário no cimento são formados hemi e monocarboaluminatos (dependendo da quantidade de cálcio presente na sua composição), ao invés de monosulfoaluminatos, deixando maior quantidade de sulfatos para formar a etringita (PUERTA-FALLA *et al.*, 2015; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021). Puerta-Falla *et al.* (2015) destacam que uma forma de intensificar a reatividade do carbonato de cálcio é, justamente, proporcionar fontes de alumina, como por exemplo o metacaulim, o que possibilita a formação da fase AFm.

Com a introdução do metacaulim dentro do sistema, uma quantidade de alumina amorfã é fornecida. Em composições ternárias do tipo LC³, que além de argila calcinada também existe o carbonato de cálcio moído, essa quantidade maior alumina amorfã reage com a calcita, possibilitando a formação de maior quantidade de mono e hemicarboaluminatos. Em decorrência disso, existe uma maior quantidade de hidratos que desencadeiam uma série de benefícios, em decorrência da densificação da matriz cimentícia, inclusive em idades iniciais (KRISHNAN; BISHNOI, 2018; SCRIVENER *et al.*, 2019; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

Figura 24 – Porosidade de composição de LC³ composta por metacaulim com diferente quantidade de calcinação em (a) 1 dia e (b) 7 dias



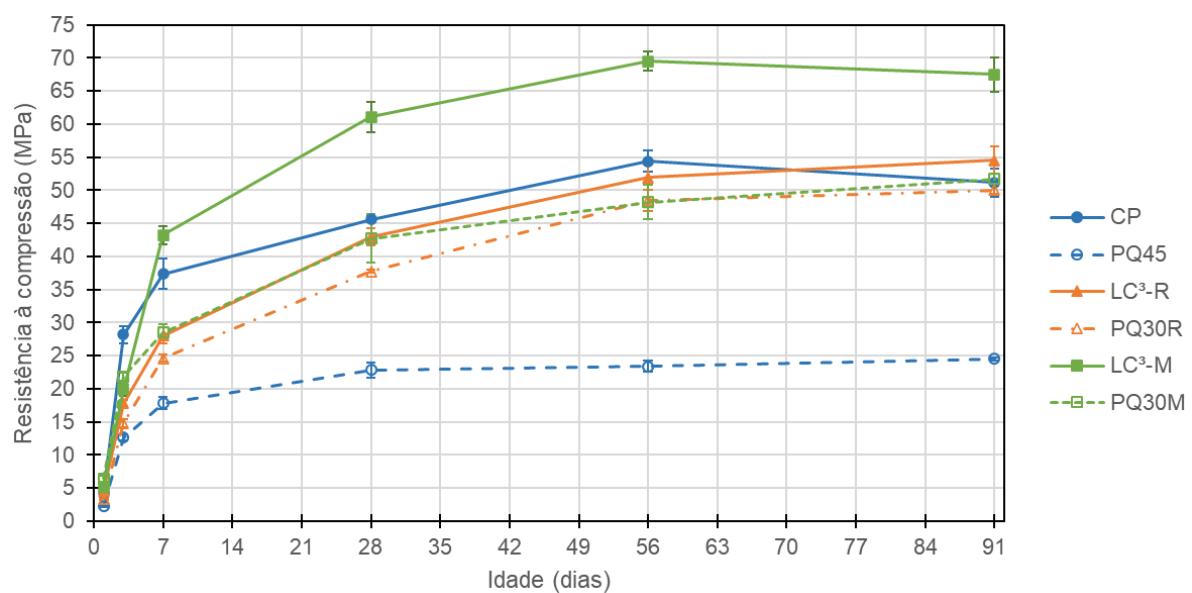
Fonte: Zunino, Martirena e Scrivener (2021, p. 54)

Os benefícios e limitação em relação ao emprego do LC³ serão apresentados, conforme informações disponibilizadas em diferentes literaturas, nos itens a seguir.

2.2.2 Desempenho mecânico e durabilidade do cimento LC³

Acerca dos aspectos mecânicos de matrizes cimentícias compostas pelo cimento LC³, Scrivener *et al.* (2019a) destacam um bom comportamento do material neste sentido. Os autores mostram que em 1 dia o desempenho mecânico pode ser afetado, dependendo da quantidade de argila presente na composição, em decorrência da reação pozolânica. Entretanto, em idades entre 3 dias e 28 dias são notados benefícios na utilização do LC³. Diversos estudos realizados suportam as conclusões de Scrivener *et al.* (2019a), encontrando comportamentos semelhantes entre o LC³ e o cimento referência, ou até mesmo superiores. Neste cenário pode-se citar os trabalhos executados por Fröhlich (2019), ilustrado na Figura 25, e Khan, Nguyen e Castel (2020).

Figura 25 – Resultados de resistência à compressão de diferentes tipos de LC³ comparados ao cimento referência



Fonte: Adaptado de Fröhlich (2019, p. 124)

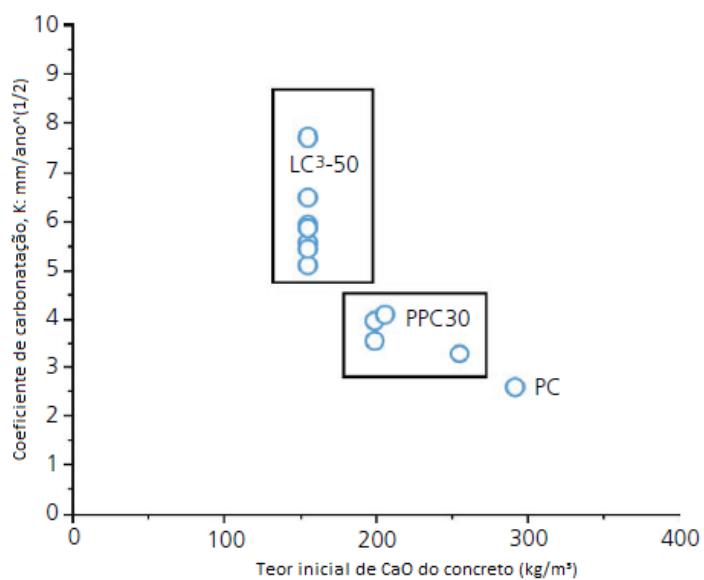
Conforme é possível observar na Figura 25, ilustrando os resultados obtidos no estudo de Fröhlich (2019), o cimento LC³ contendo metacaulim em sua composição apresentou, a partir da idade de 7 dias, resultados superiores aos demais cimentos analisados, inclusive o cimento de referência. Além disso, a autora conseguiu observar que nas idades avançadas o cimento ternário do tipo LC³ com resíduo de cerâmica vermelha como argila calcinada proporcionou resistência semelhantes ao cimento referência a partir da idade de 28 dias, demonstrando um desempenho

mecânico compatível, além de indicar a possibilidade de utilizar um resíduo na sua composição.

Além do desempenho mecânico, a preocupação acerca da durabilidade do concreto quando submetido às condições de exposição do ambiente onde será aplicado, também possui grande impacto na vida útil da estrutura. Zunino, Martirena e Scrivener (2021) destacam que o emprego do cimento LC³ pode ser vantajoso em diferentes aspectos de durabilidade.

O nível de ocorrência da carbonatação está associado a quantidade de óxido de cálcio (CaO) na pasta de cimento, que é proporcional ao fator clínquer dos cimentos compostos. O CaO é o principal componente responsável pela reação com o CO₂, que desencadeia, então, o processo de carbonatação, conforme ilustra a Figura 26. Tendo este cenário em vista, é inevitável que os cimentos LC³ possuam maior suscetibilidade em relação à carbonatação (ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021). Segundo Scrivener *et al.* (2019a), com uma boa cura do concreto, a carbonatação pode ser minimizada. Além disso, os autores também destacam que em ambientes de alta e baixa umidade o potencial de carbonatação tende a ser muito baixa, destacando que nesse tipo de ambiente o LC³ não apresentaria problemas.

Figura 26 – Coeficiente de carbonatação para diferentes quantidades de CaO em mistura com LC³-50, cimento Portland (CP) e cimento Portland Pozolânico (PPC)

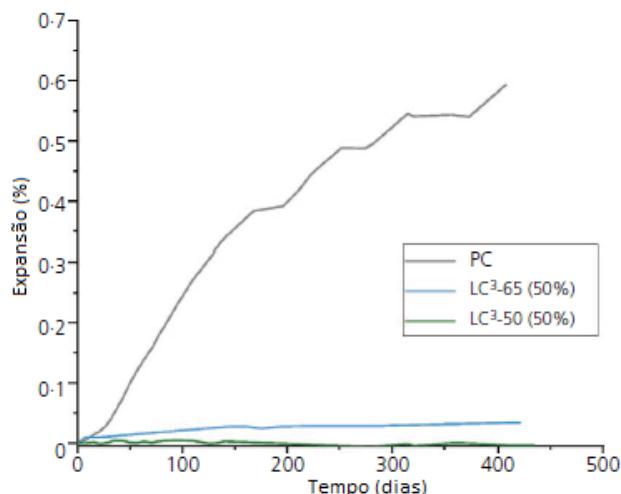


Fonte: Scrivener *et al.* (2019a, p. 11), texto traduzido para português

Favier, Dunant e Scrivener (2015) e Nguyen, Kim e Castel (2020) desenvolveram estudos para avaliar o potencial de mitigação da reação ácali-

agregado utilizando o cimento LC³. Ambos os estudos corroboram em seus resultados, afirmando o potencial mitigador de tal cimento. Scrivener *et al.* (2019a) também chegaram a mesma conclusão, conforme indica Figura 27, associando esse potencial mitigador ao fato da redução da alcalinidade e presença de alumínio na solução dos poros.

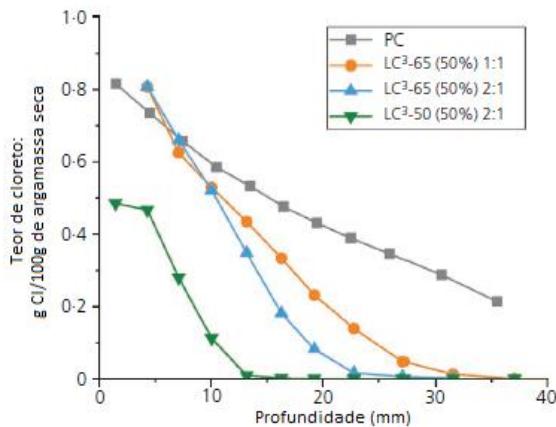
Figura 27 – Potencial mitigador da reação álcali-agregado do cimento LC³



Fonte: Scrivener *et al.* (2019a, p. 12), texto traduzido para o português

Dentre as principais preocupações em termos de durabilidade das estruturas de concreto pode-se citar a corrosão das estruturas de aço. A penetração de íons cloreto na estrutura do concreto está associada às propriedades da microestrutura da pasta de cimento (ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021). Nguyen, Afroz e Castel (2020) desenvolveram estudos para avaliar o comportamento de diferentes composições de LC³ frente a penetração de íons cloreto. Em seu trabalho os autores concluíram que o cimento LC³ apresentou um desempenho muito superior ao cimento referência, evidenciando o benefício de tal aglomerante neste tipo de situação. Scrivener *et al.* (2019a) também encontraram resultados semelhantes aos autores citados, apresentados na Figura 28, associando tal fato ao refinamento dos poros que o LC³ promove.

Figura 28 – Resultados de teor de cloretos do cimento LC³



Fonte: Scrivener *et al.* (2019a, p. 11), texto traduzido para o português

Em se tratando da retração, Ston (2019) desenvolveu um estudo que concluiu que, quando comparado cimentos comuns, o LC³ apresenta comportamentos similares, mesmo quando utilizadas argilas calcinadas menos reativas. Zunino, Martirena e Scrivener (2021) informam que tal comportamento ocorre em função da similaridade da evolução da microestrutura dos sistemas avaliados. Além disso, Scrivener *et al.* (2019a) evidenciam que ocorre uma redução da retração inicialmente, quando utilizado o LC³, destacando como vantagem, uma vez que em idades iniciais o concreto não possui tanta resistência, estando mais suscetível à formação de fissuras.

Avet, Sofia e Scrivener (2019, apud ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021) avaliaram o comportamento do LC³ frente à ação de gelo e desgelho, seguindo as normativas da SIA 262/1, com variação de temperatura de -15°C até 15°C. No estudo encontraram comportamentos semelhantes entre o LC³ e os cimentos comuns.

Ainda não é observado uma grande quantidade de pesquisas acerca da avaliação da autocicatrização de matrizes cimentícias contendo LC³, sendo assim não se tem muitas informações acerca do assunto. Dentre os trabalhos encontrados pode-se citar o de Zhu *et. al* (2020) que avaliou a autocicatrização do concreto flexível (ECC) associado ao cimento LC³. Mohammadi *et al.* (2020) e Namnoum *et al.* (2021) desenvolveram estudos acerca da autocicatrização de composições ternárias, sendo que somente o primeiro estudo citado avaliou a composição ternária de LC³.

2.2.3 Fatores que impactam no desempenho do cimento LC³

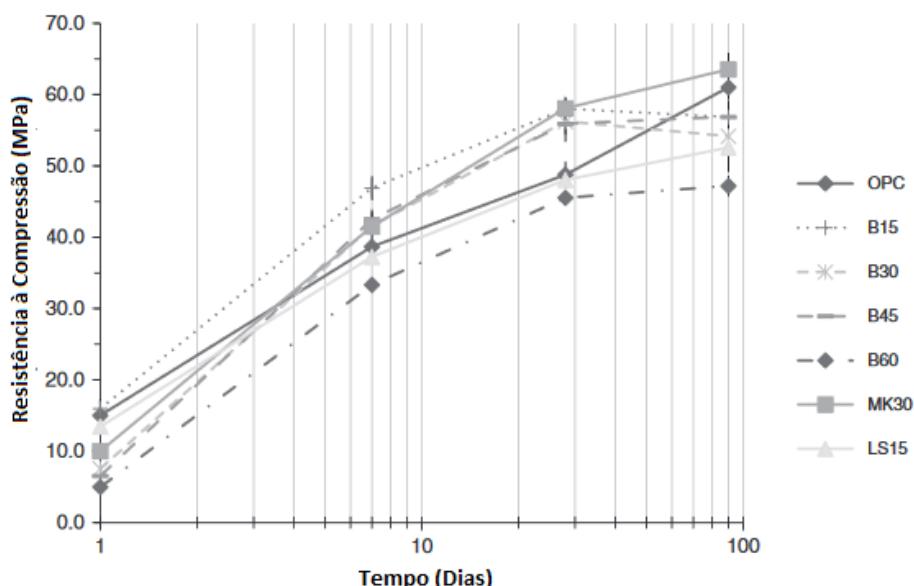
Diversos são os fatores que podem causar algum tipo de impacto no desempenho do cimento LC³. Na sequência são apresentados esses fatores.

2.2.3.1 Teor de clínquer na composição

Moreira (2020) destaca que uma das grandes vantagens das composições ternárias do tipo LC³ está, justamente, associada à sua possibilidade de redução do fator clínquer do aglomerante, o tornando mais sustentável. O clínquer possui um papel fundamental na composição do cimento, uma vez que ele é o principal componente que confere as propriedades ligantes e possibilita a obtenção do endurecimento da sua matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Assim sendo, sua proporção dentro de uma composição ternária possui extrema importância.

No estudo de Antoni *et. al* (2012), os autores investigaram aglomerantes contendo diferentes proporções e substituições de argila calcinada e calcário. Em suas conclusões, os autores mostram que com substituição de até 45% do clínquer pelas adições é possível notar um incremento das propriedades mecânicas em relação ao cimento referência, adotando uma proporção de 2:1 de argila calcinada e calcário. Além disso, os autores destacam que com uma substituição de até 60%, na mesma proporção, obtém-se resultados muito próximos ao cimento de referência.

Figura 29 – Resistência à compressão do estudo executado por Antoni *et al.* (2012)



Fonte: Antoni *et al.* (2012, p. 1581), texto traduzido para o português

Hernandez e Scrivener, (2015) também destacam que substituições de até 60% do clínquer por argila calcinada não é observado perda de desempenho do cimento LC³. Zunino, Martirena e Scrivener (2021) destacam que a composição de LC³ mais investigada é o LC³-50, que possui cerca de 50% de substituição do clínquer pelas adições.

2.2.3.2 Proporção entre argila calcinada e calcário

Na presença de uma fonte de alumina amorfa, como por exemplo o metacaulim, a calcita pode desenvolver novas reações, formando outras fases cristalinas. Neste sentido, entende-se que a argila calcinada e o pó de calcário possuem um efeito sinérgico, que podem contribuir em diferentes aspectos da matriz cimentícia (ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021). Tendo isso em vista, entender a proporção entre os dois materiais (argila calcinada e pó de calcário) é importante para garantir boas propriedades.

Damidot *et al.* (2011) desenvolveram um estudo que avaliou cimentos através da termodinâmica. Em se tratando de composições contendo argila calcinada e calcário, os autores destacam que uma composição de 2:1 (duas partes de argila calcinada para uma parte de calcário) possibilita bons resultados.

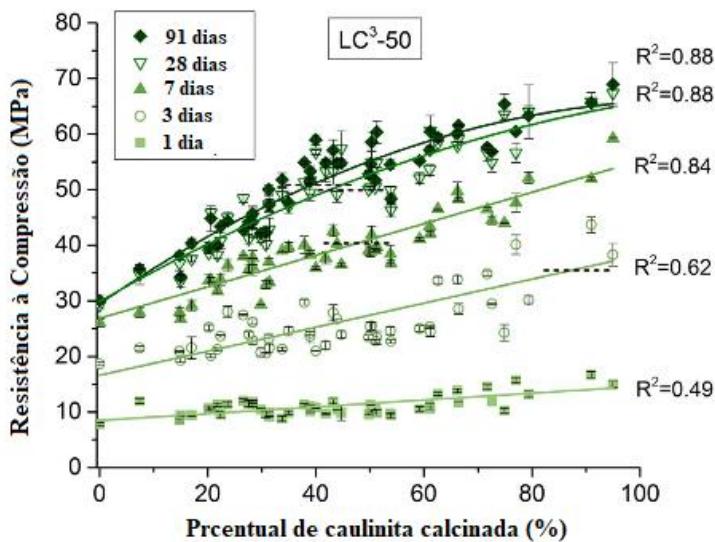
Corroborando com os resultados encontrados por Damidot *et al.* (2011), Barbalho, Silva e Rêgo (2019), que realizaram um estudo para avaliar o teor entre pó de calcário e argila calcinada, concluíram que uma proporção de 2:1 possuem resultados satisfatórios, estando estatisticamente no mesmo patamar do cimento referência.

2.2.3.3 Teor de caulinita da argila calcinada

As argilas calcinadas possuem elevada reatividade em função da formação do metacaulim, em argilas cauliníticas, através da sua desidroxilação na queima. O metacaulim desenvolve uma reação pozolânica que possibilita a formação de novas fases cristalinas. A literatura aponta que dentre as características do LC³, o teor de metacaulim presente na argila calcinada é um dos principais impactantes na obtenção de um comportamento mecânico satisfatório (AVET; SCRIVENER, 2018; FERNANDEZ; MARTIRENA; SCRIVENER, 2011).

Avet e Scrivener (2018) desenvolveram um estudo que avaliou mais de 50 argilas calcinadas, com diferentes parâmetros, buscando avaliar o impacto do teor de caulinita em sua composição. Os autores conseguiram concluir que a partir da presença de 40% de caulinita na composição da argila calcinada já possível obter resultados mecânicos similares ao cimento referência, conforme ilustra a Figura 30.

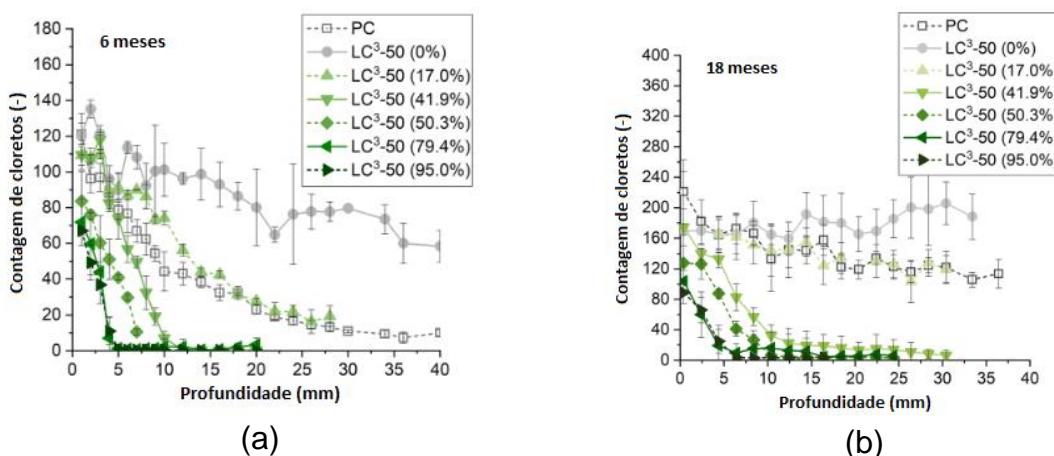
Figura 30 – Resistência à compressão do LC³-50 com diferentes quantidades de caulinita



Fonte: Avet e Scrivener (2018, p. 134), texto traduzido para o português

A influência do teor de caulinita das argilas calcinadas no transporte de íons cloreto na matriz cimentícia foi avaliada por Maraghechi *et al.* (2018). Os autores destacam que a partir de 40% de caulinita na composição da argila calcinada já observa-se excelente resultado, quando comparado com o cimento referência (Figura 31), atribuindo ao refinamento dos poros proporcionado pela caulinita.

Figura 31 – Impacto do teore de caulinita da argila no teor de cloretos presentes em matriz composta com LC³ em (a) 6 meses e (b) 18 meses



Fonte: Maraghechi *et al.* (2018, p. 7), texto traduzido para o português

2.2.3.4 Finura dos elementos

As propriedades de cimentos compostos são amplamente influenciadas pelas características dos seus componentes. Dentre tais características pode-se citar a finura, que possui impacto na distribuição granulométrica das partículas. Cada um dos elementos dos cimentos compostos necessita atingir certo grau de finura para que viabilize o desenvolvimento de suas reações de forma satisfatória. Em adição a isso, a distribuição do tamanho das partículas desempenha papel importante na demanda de água e trabalhabilidade do concreto. Distribuições semelhantes desencadeiam maior volume de espaços vazios entre as partículas, que consequentemente acarretam a necessidade de maior quantidade de água para promover maior trabalhabilidade (PEREZ *et al.*, 2015).

Andrés *et al.* (2015) avaliaram em seu estudo a influência da finura das partículas dos elementos de cimentos a base de clínquer, argila calcinada e o calcário moído. Para tanto, utilizaram uma composição padrão de 55% de cimento Portland, 30% de argila calcinada e 15% de calcário moído. Conforme esperado, os autores concluíram que a finura do clínquer desempenha um papel de extrema importância no desenvolvimento de resistência em todas as idades. Além disso, os autores destacam que a finura da argila calcinada possui um papel tão importante quanto o clínquer no desenvolvimento de resistências. Por fim, o estudo conclui também que a finura do pó de calcário detém influência nas idades iniciais, provavelmente em função da melhora na formação dos carboaluminatos e na densificação da matriz cimentícia.

Perez *et al.* (2015) também buscaram avaliar o impacto da distribuição no tamanho das partículas nas propriedades reológicas e mecânicas de cimentos ternários do tipo LC³. Dentre os resultados encontrados os autores destacam que a finura do clínquer possui maior representatividade no impacto das propriedades reológicas e idades iniciais. Ao ser associado ao clínquer finamente moído, o carbonato de cálcio traz benefícios à matriz do concreto: melhorias em termos reológicos, quando está moído, e densificação da matriz, quando está finamente moído.

Em ambiente laboratorial é comum realizar a moagem dos componentes de forma separada. Entretanto, em escala real, a indústria cimenteira realiza a moagem dos componentes de forma conjunta. O clínquer possui maior rigidez quando comparada com a argila calcinada. Caso não se tenha cuidado acerca do processo

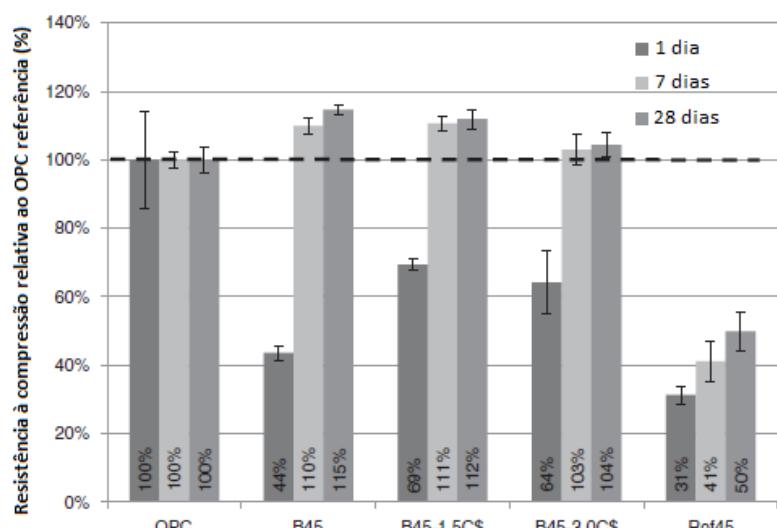
de moagem, o clínquer pode apresentar partículas muito grossas, o que irá impactar na obtenção de resistências iniciais, ou a argila calcinada apresentará partículas muito finas, influenciando na demanda de água (PEREZ *et al.*, 2015; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

2.2.3.5 Teor de gipsita

O emprego de MCS na produção do cimento representa um grande avanço no desenvolvimento de materiais cada vez mais sustentáveis e com propriedades cada vez mais superiores em termos de durabilidade. Entretanto, seu emprego pode se tornar um desafio, principalmente pelo fato de poder impactar, negativamente, na formação de resistência em idades iniciais. Levando em consideração o cenário de um cimento ternário do tipo LC³, que possui uma quantidade elevada de MCS em sua composição, determinar e otimizar um teor de gipsita que garanta boas propriedades torna-se muito relevante. Isso está associado ao fato de que a gipsita possui impacto no retardo das reações iniciais dos aluminatos e possui influência também na reação dos silicatos (MOREIRA, 2020; RODRIGUEZ; TOBON, 2020; SCHNEIDER *et al.*, 2011).

Nos estudos realizados por Antoni *et al.* (2012) os autores propuseram executar um ajuste no teor de gipsita, aumentando em 1,5% e 3% o teor do componente. Em seus resultados os autores destacaram que o ajuste de 1,5% levou a um incremento de resistência nas idades de 1 e 7 dias, enquanto que 3% trouxe perdas (Figura 32).

Figura 32 – Relação do cimento LC³ e o cimento referência com diferentes teores de gipsita



Fonte: Antoni *et al.* (2012, p. 1587), texto traduzido para o português

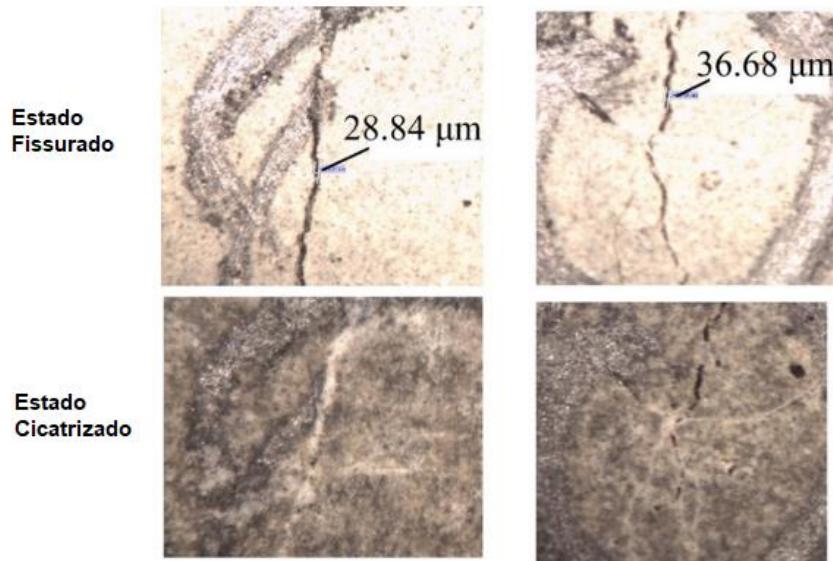
Em sua tese, Moreira (2020) propôs avaliar a influência do teor de gipsita na microestrutura de pastas de cimento compostas por cimentos ternários do tipo LC³. Dentre suas constatações, o autor destaca que um teor de 5% de gipsita parece proporcionar os melhores resultados em termos de desenvolvimento de resistência em idades iniciais. Além disso, o autor evidencia que teores mais elevados da gipsita beneficiam a formação de etringita e dificultam a produção de hemicarbonatos e monocarbonatos, enquanto teores mais baixos acarretam o contrário, facilitando a formação de hemicarbonatos e monocarbonatos e dificultando a formação etringita.

2.2.4 Estudos prévios indicando o potencial de cicatrização do cimento ternário do tipo LC³

Conforme já mencionado anteriormente, o estudo acerca do potencial de cicatrização do cimento LC³ ainda não possui uma grande quantidade de pesquisas publicadas. Assim sendo, esse item foi elaborado de forma a apresentar o que se tem de informações até o momento indicando a capacidade de cicatrização do cimento LC³.

Zhu *et al.* (2020) realizaram um estudo visando desenvolver um *Engineered Cementitious Composite* (ECC) utilizando o cimento LC³ e fibras de polipropileno. Dentre as várias características estudadas, os autores avaliaram a capacidade de cicatrização desse material, através da regeneração da resistência à tração. Entre os seus resultados, Zhu *et al.* (2020) destacam um comportamento satisfatório em termos de cicatrização das matrizes cimentícias que contaram com a incorporação do cimento ternário do tipo LC³, salientando a sua importância para beneficiar a durabilidade das estruturas em escala real. Além disso, também foi feita a avaliação visual da cicatrização das matrizes cimentícias, em que nas espessuras de cicatrizes de até aproximadamente 36 µm foi possível visualizar o fenômeno de cicatrização parcial, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Análise em microscópio da matriz cimentícia contendo o cimento LC³ do estudo realizado por Zhu et al. (2020)



Fonte: Zhu et al. (2020, p.9)

Buscando avaliar a capacidade autocicatrizante do cimento ternário do tipo LC³, Gil (2022) o comparou com cimentos atualmente normatizados na NBR 16697 (ABNT, 2018) submetidos a diferentes condições de cura. O autor avaliou a cicatrização por microscopia ótica e absorção de água por capilaridade. Na análise por imagem o cimento LC³ apresentou um comportamento inferior aos demais ligantes analisados. Entretanto, o ensaio de absorção por capilaridade demonstrou uma vantagem do LC³ em relação aos demais (Tabela 1). A hipótese para explicar tal comportamento é a de que os produtos de hidratação formados durante a reação do LC³ são mais estáveis, consumindo mais Ca²⁺, o que dificultaria a sua precipitação na superfície da fissura, e a sinergia entre fíler calcário e metacaulim, diminuindo porosidade.

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade no estudo de Gil (2022)

Cimento	Cura	Referência [a] (g/cm ²)	Cicatrizado [b] (g/cm ²)	Diferença [a-b] (g/cm ²)	Autocicatrização (%)
LC ³	Molhagem e Secagem	0,2599	0,1984	0,0615	23,6%
	Submersa	0,2240	0,1750	0,0490	21,9%
CPII F40	Molhagem e Secagem	0,3224	0,2630	0,0594	18,4%
	Submersa	0,3266	0,2922	0,0344	10,5%
CPIV 32 RS	Molhagem e Secagem	0,3875	0,3505	0,0370	9,5%
	Submersa	0,3255	0,2656	0,0599	18,4%

Fonte: Gil (2022, p. 106)

Wang *et al.* (2023) estudaram o comportamento do cimento ternário do tipo LC³ em concretos de alta resistência submetidos a sequências de carga e descarga ao longo do tempo. Em seus experimentos os autores avaliaram a capacidade de autocicatrização das matrizes cimentícias produzidas quando expostas a diferentes tipos de cura. Dentre os resultados encontrados Wang *et al.* (2023) identificaram capacidades de cicatrização semelhantes entre o cimento LC³ e o referência, sem nenhum tipo de adição, destacando que em ambientes com elevada umidade o LC³ tende a desenvolver mais reações em função da argila calcinada não reagida.

Além dos trabalhos mencionados, outros autores também analisaram o comportamento do cimento ternário do tipo LC³ associados a outros agentes de cicatrização:

- Du *et al.* (2023) – avaliaram a influência de microcápsulas indutivas eletromagnéticas com diferentes agentes cicatrizantes na autocicatrização do cimento LC³;
- Du *et al.* (2024) – analisaram o impacto de microcápsulas termoplásticas com diferentes agentes cicatrizantes na autocicatrização e resistência à sulfatos do cimento LC³;
- Wei *et al.* (2024) – utilizaram a técnica de precipitação de calcita através de micróbios para melhorar as características de autocicatrização do cimento LC³;
- Huang *et al.* (2025) – estudaram a capacidade autocicatrizante de matrizes cimentícias contendo o cimento LC³ contendo aditivos cristalizantes e expostos a soluções de NaCl.

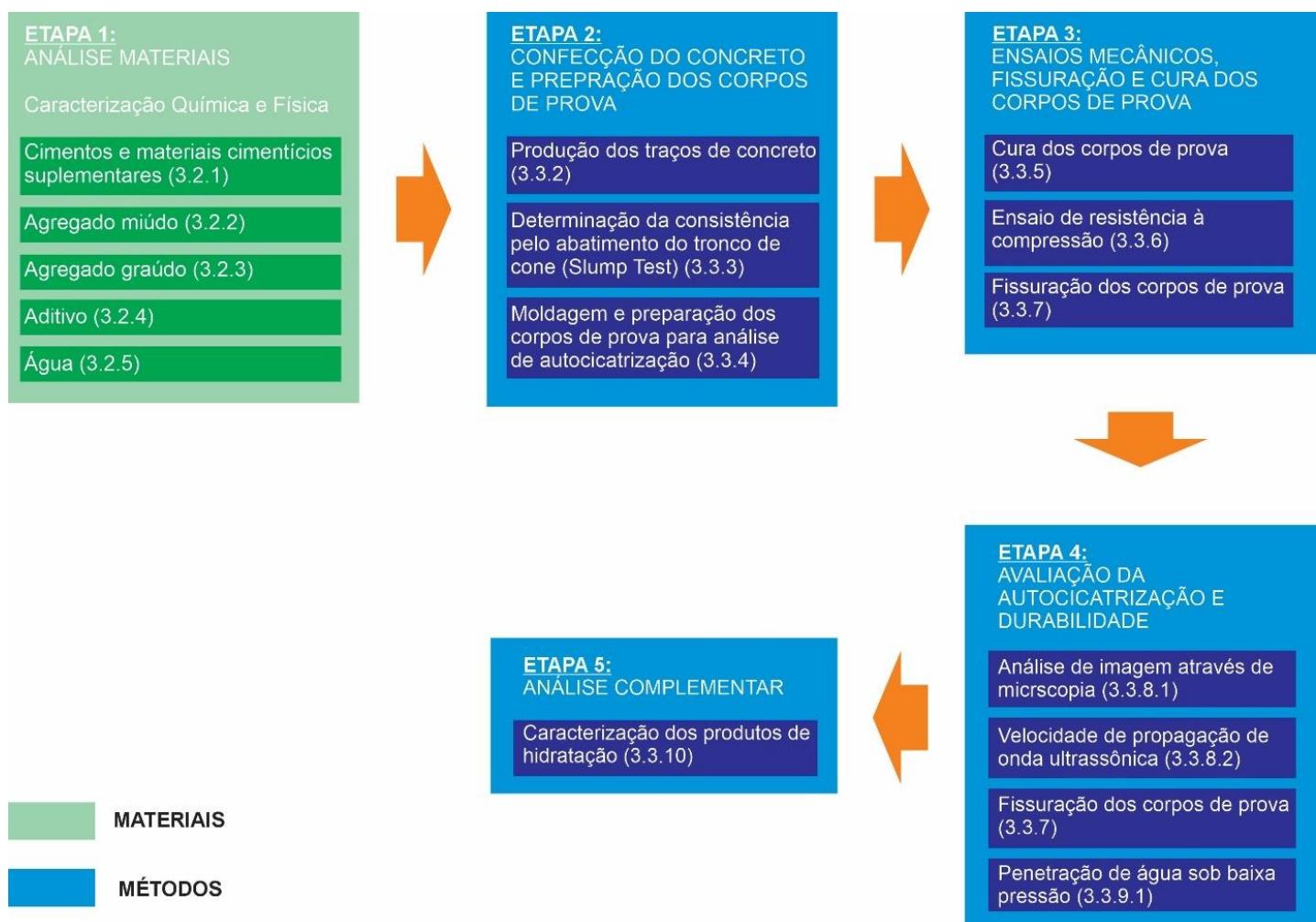
Tendo em vista o cenário apresentado nos estudos acima, entende-se que o cimento ternário do tipo LC³ dispõe de uma capacidade de autocicatrização comparável ou superior aos demais cimentos, entretanto ainda pouco explorado no âmbito acadêmico.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo foi desenvolvido com o intuito de apresentar a metodologia empregada neste trabalho, visando atingir os objetivos previamente estabelecidos. Ele é dividido em três partes: as variáveis do estudo, os materiais utilizados no programa experimental e os métodos adotados para obtenção dos resultados a serem avaliados.

A Figura 34 apresenta um fluxograma de como foi executado o programa experimental deste trabalho. Em cada etapa é informado, também, o número do item em que o método ou material foi descrito dentro deste capítulo. É importante destacar que os ensaios e métodos de avaliação foram definidos levando em consideração o que é apresentado em publicações mais recentes relacionadas ao tema, descritas anteriormente. Isso decorre do fato de ainda não existir uma normatização para avaliar a autocicatrização.

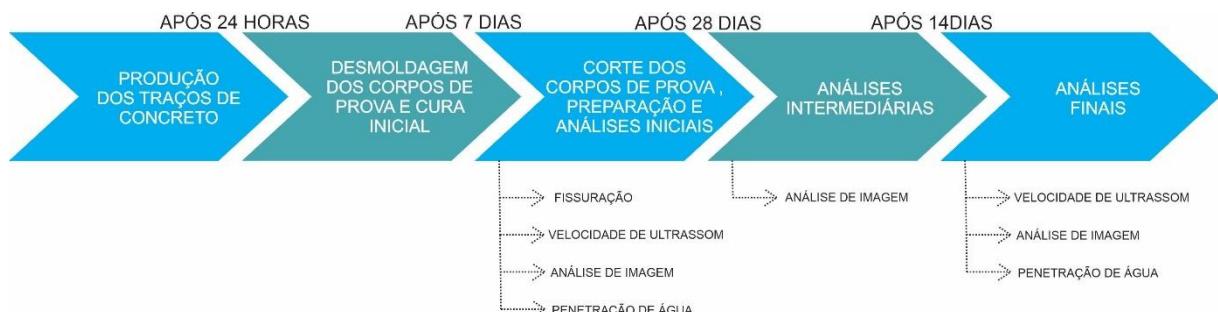
Figura 34 – Fluxograma do programa experimental proposto



Fonte: Elaborada pelo autor

De forma a complementar o fluxograma apresentado acima, também foi elaborada uma linha de tempo de execução dos ensaios, disposto na Figura 35, de forma a possibilitar maior facilidade no entendimento do cronograma de ensaios.

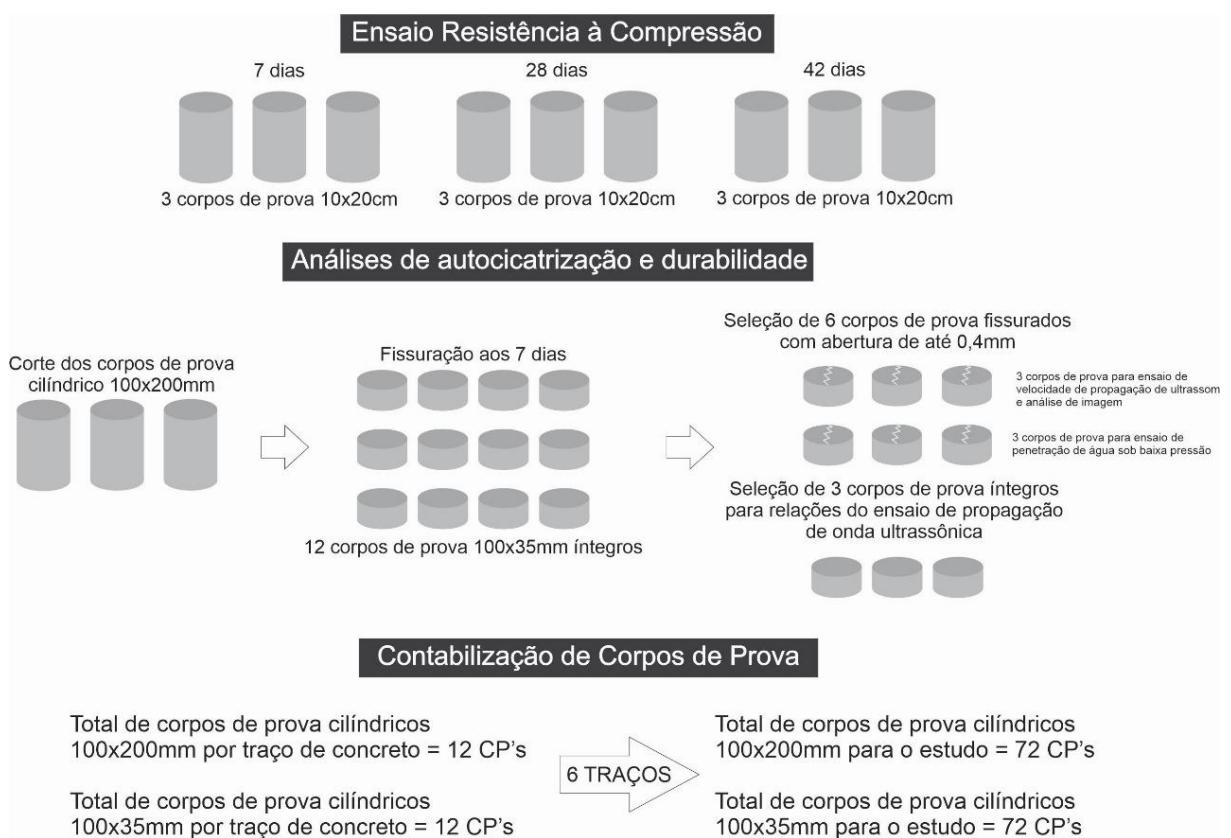
Figura 35 – Cronologia de execução dos ensaios do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, é apresentado na Figura 36 a quantidade de corpos de prova empregados nas análises para cumprir o programa experimental.

Figura 36 – Contabilização dos corpos de prova necessários para a execução do estudo em questão



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

Com o intuito de elaborar um programa experimental capaz de atingir os objetivos previamente determinados, foram determinadas as variáveis de resposta, controle, não controladas e fixas.

As variáveis de respostas são:

- a) Resistência à compressão axial;
- b) Taxa de autocicatrização pela velocidade de propagação de onda ultrassônica;
- c) Taxa de autocicatrização pela determinação da área e espessura da fissura através da análise de imagem por microscopia;
- d) Taxa de autocicatrização pela penetração de água sob baixa pressão;
- e) Percentual de produtos de autocicatrização mantidos após penetração de água sob baixa pressão;
- f) Caracterização dos produtos de hidratação.

Os fatores de controle com níveis variáveis são:

- a) Tipo de cimento – 2 níveis – LC³ e CPV ARI;
- b) Relação água/cimento – 3 níveis – 0,40; 0,50; e 0,60;

Os fatores de controle com níveis fixos são:

- a) Idade de abertura da fissura – 7 dias;
- b) Espessura de fissura para análise – aberturas inferiores à 0,4mm;
- c) Ambiente de exposição dos corpos de prova fissurados – submerso em água.

Os fatores que podem exercer influência no comportamento das amostras e que foram apenas registradas/monitoradas são:

- a) Temperatura e umidade ambiental na execução dos traços de concreto;
- b) Características geométricas das fissuras durante sua respectiva abertura nos corpos de prova.

3.2 MATERIAIS

Este item aborda os materiais empregados no trabalho, apresentando suas principais características e, quando pertinente, a relevância da sua escolha para a pesquisa.

3.2.1 Cimentos e materiais cimentícios suplementares

O cimento utilizado no programa experimental para a composição do cimento LC³ foi o CPV ARI da Votorantim Cimentos. Tal escolha foi realizada por ser um aglomerante com baixo teor de adições minerais, fato esse que possibilita obter uma composição ternária do tipo LC³ mais assertiva. Também para a composição do cimento LC³ empregou-se o carbonato de cálcio moído, da marca Brasilminas, e o metacaulim HP Ultra, da marca Metacaulim do Brasil.

De forma a caracterizar quimicamente tanto o cimento quanto os MCS, foi realizado o ensaio de fluorescência de raios-x (FRX) por dispersão de energia, com análise quantitativa da composição química. Para essa análise foi utilizado o equipamento EDX 720 HS da marca Shimadzu. Os resultados dessa caracterização são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de FRX do cimento e MCS empregados na pesquisa

Óxidos	CPV ARI	Metacaulim	Carbonato de Cálcio Moído
CaO (%)	61,53	0,04	42,17
SiO₂ (%)	17,76	54,71	12,78
Al₂O₃ (%)	3,26	32,76	0,98
Fe₂O₃ (%)	3,10	3,84	ND
MgO (%)	5,22	0,53	0,13
SO₃ (%)	1,91	0,00	ND
K₂O (%)	0,99	1,62	0,03
Na₂O (%)	0,84	0,15	0,63
TiO₂ (%)	0,26	1,69	0,08
SrO (%)	0,13	0,00	ND
P₂O₅ (%)	0,10	0,25	1,08
MnO (%)	0,08	0,00	ND
ZnO (%)	0,02	0,00	ND
Cr₂O₃ (%)	0,01	0,00	ND
PF (%)	4,80	4,41	42,12
Total	100	100	100,00

Fonte: Elaborada pelo autor

A caracterização física dos materiais cimentícios suplementares e do cimento (Tabela 3) contemplou: massa específica, empregando-se o método de picnometria a gás hélio; área superficial, por adsorção de gás hélio (BET) em equipamento TriStar II Plus 2.02; e granulometria, por difração de luz laser, utilizando o equipamento modelo S3500 da Microtrac, em que se fez uso do álcool isopropílico como fluido para os cimentos e água para os MCS.

Tabela 3 – Resultados da caracterização física do cimento e MCS utilizados na pesquisa

Ensaios	Cimento/MCS		
	CPV ARI	Metacaulim	Carbonato de Cálcio Moído
BET (m^2/g)	0,53	17,25	0,83
Massa Específica (g/cm^3)	3,19	2,67	2,70
Análise Granulométrica	D10 (μm)	6,48	1,66
	D50 (μm)	13,34	4,10
	D90 (μm)	26,75	9,79
	DMédio (μm)	15,09	6,30

Fonte: Elaborada pelo autor

Para a composição do cimento LC³, levou-se em consideração os parâmetros do LC³-50, em que o número apresentando após o LC³ indica a porcentagem de clínquer na composição do cimento. O LC³-50 é classificado por Zunino, Martirena e Scrivener (2021) como a composição de LC³ mais investigada no meio científico e é composto por 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso.

A impossibilidade de se empregar diretamente clínquer moído, caracterizou-se o cimento CPV ARI empregado na pesquisa, e a perda ao fogo indicou a presença de 7,96% de material carbonático. De forma a manter a composição do cimento LC³-50, já informada anteriormente, fez-se um balanço entre o material carbonático do cimento CPV-ARI e o material carbonático adicionado. Assim, para obtenção do LC³, empregou-se 59,76% de cimento CPV ARI, 10,24% de calcário moído e 30% de metacaulim.

3.2.2 Agregado miúdo

Nesse estudo foram utilizados dois agregados miúdos diferentes, um de origem natural e quartzosa, denominada de Areia Natural, e outro oriunda do processo de britagem e de origem basáltica, denominada de Areia de Britagem. Ambos foram

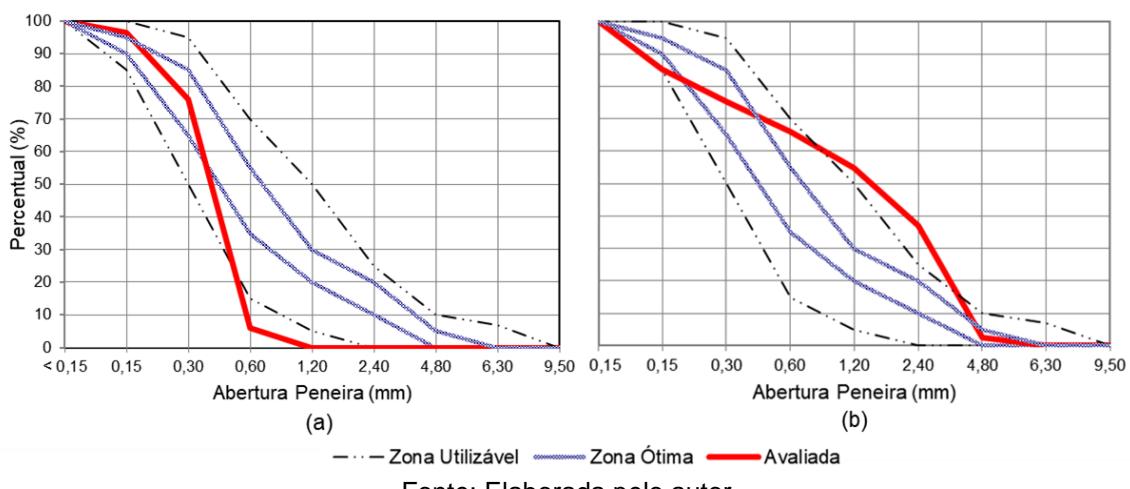
caracterizados fisicamente através dos ensaios de determinação da composição granulométrica, conforme prescrito na NBR 17054 (ABNT, 2022), da massa específica, de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021) e do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem, seguindo a NBR 16973 (ABNT, 2021). Os resultados são apresentados na Tabela 4, na Figura 37 e na Tabela 5.

Tabela 4 – Composição granulométrica dos agregados miúdos empregados no estudo

Peneira	Areia Natural		Areia de Britagem		
	Porcentagem				
Nº	mm	massa retida (%)	massa acumulada (%)	massa retida (%)	massa acumulada (%)
4	4,75	-	-	2	2
8	2,40	-	-	35	37
16	1,20	-	-	18	55
30	0,60	6	6	11	66
50	0,30	70	76	9	75
100	0,15	20	96	10	85
-	FUNDO	4	100	15	100
Total		100	Total	100	

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 37 – Curva de distribuição granulométrica: (a) Areia Natural e (b) Areia de Britagem



Fonte: Elaborada pelo autor

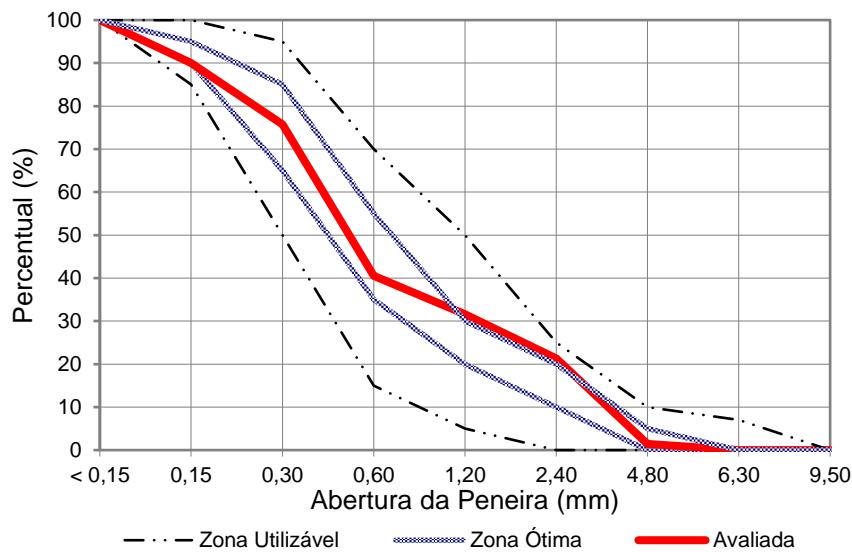
Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos de caracterização dos agregados miúdos

Característica	Areia Natural	Areia de Britagem
Módulo de finura (mm)	1,79	3,21
Dimensão máxima característica (mm)	1,20	4,80
Massa Específica (kg/m^3)	2630	3030
Material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem (%)	0,80	13,20

Fonte: Elaborada pelo autor

Para compor o agregado miúdo utilizou-se 42,5% de Areia Natural e 57,5% de Areia de Britagem, resultando na curva granulométrica da Figura 38.

Figura 38 – Curva de distribuição granulométrica da mescla de agregados miúdos



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3 Agregado graúdo

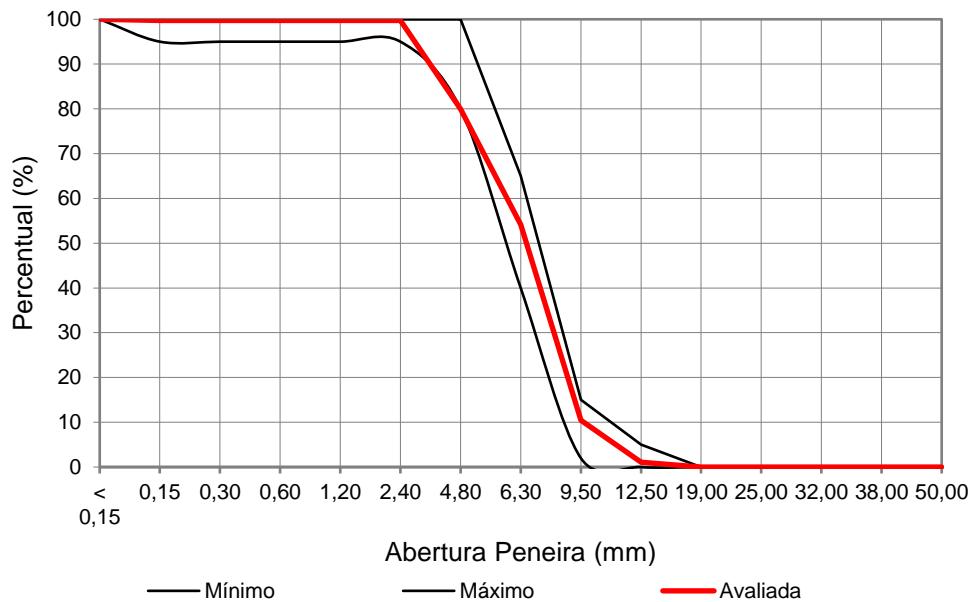
O agregado graúdo utilizado no programa experimental possui origem natural dispondo de uma composição basáltica, comercialmente denominado Brita 0. O material passou pela mesma caracterização física dos agregados miúdos e os resultados estão dispostos abaixo.

Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo empregado no estudo

Peneira		Porcentagem	
Nº	mm	massa retida (%)	massa acumulada (%)
1/2"	12,5	1	1
3/8"	9,5	9	10
1/4"	6,3	44	54
4	4,75	26	80
8	2,40	19,8	99,7
16	1,20	0,0	99,7
30	0,60	0,0	99,7
50	0,30	0,0	99,7
100	0,15	0,0	99,7
-	FUNDO	0,3	100
Total		100	

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 39 - Representação gráfica da composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7 – Resultados dos ensaios físicos de caracterização do agregado graúdo

Característica	Brita 0
Módulo de finura (mm)	5,89
Dimensão máxima característica (mm)	12,50
Massa Específica (kg/m^3)	2940
Material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem (%)	0,9

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.4 Aditivo

Zunino, Martirena e Scrivener (2021) salientam que em função da elevada área superficial da argila calcinada, a trabalhabilidade da mistura pode ser prejudicada. Neste contexto, foi utilizado um aditivo promotor de plasticidade de forma a manter um padrão de consistência para todas as misturas e fornecer condições satisfatórias para execução dos ensaios no estado fresco e moldagem dos corpos de prova.

Tendo isso em vista foi utilizado o ADVA CAST 585, aditivo que possui boa interação com cimentos contendo argila calcinada, do fabricante Chryso. O material classificado por ele como um aditivo para concreto em geral, fluído ou autoadensável com densidade de 1,06 kg/L.

3.2.5 Água

A água empregada no estudo é oriunda da rede de distribuição de Canoas/RS, cidade onde fica localizado o laboratório em que o programa experimental foi executado, fornecida pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.3 MÉTODOS

Este item aborda os métodos empregados para o cumprimento dos objetivos propostos, fornecendo detalhes de como foram executados e as referência bibliográficas que atuaram como base para sua respectiva escolha.

3.3.1 Especificação dos traços

Os traços foram elaborados a partir da metodologia de dosagem proposta pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). O método em questão é caracterizado como experimental, permitindo elaborar traços de concreto com as características reológicas necessárias para diferentes aplicações. A partir dos parâmetros definidos como ideais para o concreto com os agregados utilizados, foi definido traços com três relações a/c diferentes, de forma a cumprir o objetivo f) verificar a influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na capacidade de autocatrização. Assim sendo, os traços utilizados no trabalho são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Traços utilizados para a confecção dos concretos analisados

Material	Consumo de materiais (kg/m ³)					
	CPV ARI			LC3		
	T-CPV 0,6	T-CPV 0,5	T-CPV 0,4	T-LC ³ 0,6	T-LC ³ 0,5	T-LC ³ 0,4
Cimento	304	366	458	181,7	218,7	273,4
Carbonato de cálcio moído	-	-	-	31,1	37,5	46,9
Metacaulim	-	-	-	91,2	109,8	137,3
Areia Natural	416	380	343	416	380	343
Areia de Britagem	563	521	471	564	521	471
Brita 0	1066	1066	1066	1066	1066	1066
Água	183	183	183	183	183	183
Relação a/c	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.2 Produção das misturas de concreto

Para execução das misturas de concreto propostas foi utilizado uma betoneira com capacidade de 120 litros. O procedimento de mistura seguiu o seguinte roteiro:

- a) Inserção de 100% do agregado graúdo juntamente com 30% da água e execução da mistura por 1 minuto;
- b) Inserção de 100% dos agregados miúdos juntamente com 30% da água e execução da mistura por 1 minuto;
- c) Inserção de 100% do cimento juntamente com o restante da água e execução da mistura por 1 minuto;
- d) Inserção do aditivo promotor de plasticidade até atingir a consistência necessária por 1 minuto.

3.3.3 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)

Com o intuito de manter uma condição de moldagem semelhante para todos os traços analisados, foi feito o controle da consistência das misturas através do abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), preconizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020). Conforme citado anteriormente, o ajuste da trabalhabilidade das misturas foi executado através da incorporação de aditivo promotor de plasticidade. Tal ação foi realizada de forma a enquadrar todos os traços na classificação S100 conforme estabelecido pela NBR 8953 (ABNT, 2015).

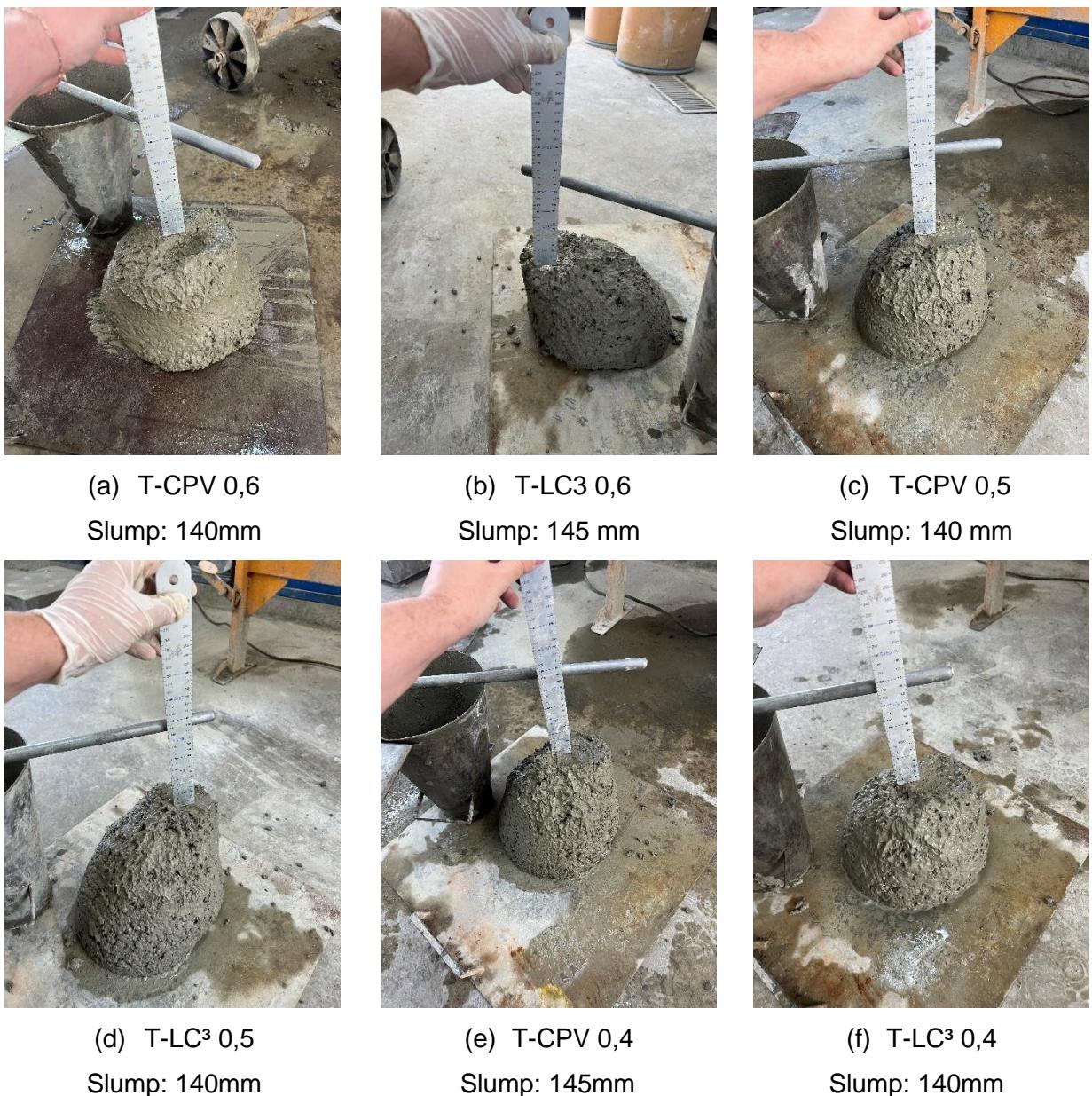
Os resultados da determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) são apresentados na Figura 40, bem como seu respectivo aspecto visual. Todos os traços executados dispuseram de resultados muito semelhantes, entre 140mm e 145mm, se enquadando dentro da classe S100 da NBR 8953 (ABNT, 2015). Tal comportamento foi possível através do ajuste da quantidade de aditivo necessária para atingir consistências similares, sendo que a quantidade utilizada em cada traço é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Teor de aditivo utilizado para atingir a consistência desejada em cada traço

Traço	T-CPV 0,6	T-LC ³ 0,6	T-CPV 0,5	T-LC ³ 0,5	T-CPV 0,4	T-LC ³ 0,4
Teor de aditivo ¹ (%)	0,36	1,18	0,37	1,23	0,49	1,39

¹ Em relação à massa de cimento

Figura 40 – Resultados de consistência dos traços de concreto executados



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.4 Moldagem e preparação dos corpos de prova para análise mecânica e de autocicatrização

Os corpos de prova destinados à execução do ensaio de resistência à compressão foram moldados conforme prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2016), utilizando moldes cilíndricos com 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Todos os corpos de prova permaneceram por 24 horas em uma local com temperatura e umidade controladas até a sua desmoldagem e, posteriormente, sua destinação ao processo de cura.

Para a avaliação da autocicatrização, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 35mm de altura, conforme empregado no estudo de Costa (2024), obtidos a partir de corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, processo esse ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Corte dos corpos de prova em discos para análise da autocicatrização



Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova na forma de discos tiveram sua superfície marcada a cada 6 mm com uma caneta *Liquid Paper*¹. Essa ação foi realizada para delimitar o local onde ocorreria o registro de parte da fissura, conforme mostra a Figura 42, com o intuito de formar uma imagem ampliada de toda a fissura formada no corpo de prova.

Figura 42- Delimitação das diferentes seções para microscopia



Fonte: Elaborada pelo autor

¹ A carga da caneta é composta por óxido de titânio, água, etanol, polímero e dispersantes. Foi adotada por não dissolver em contato com a água.

3.3.5 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão foram submetidos à cura submersa em água saturada com cal e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingir a idade especificada para a execução do teste.

As amostras designadas à avaliação da autocicatrização, após desmoldagem, permaneceram por 7 dias submersas em água saturada com cal e com temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até o processo de corte e fissuração. Após a realização dos ensaios propostos no estado não cicatrizado, as amostras retornaram para cura submersa somente em água, sem cal, até atingirem a idade de avaliação do estágio cicatrizado, para os diferentes ensaios, descritos nos itens que seguem.

3.3.6 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi executado nas idades de 7, 28 e 42 dias, conforme prescrição da NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo que em cada idade foram submetidos 3 corpos de prova.

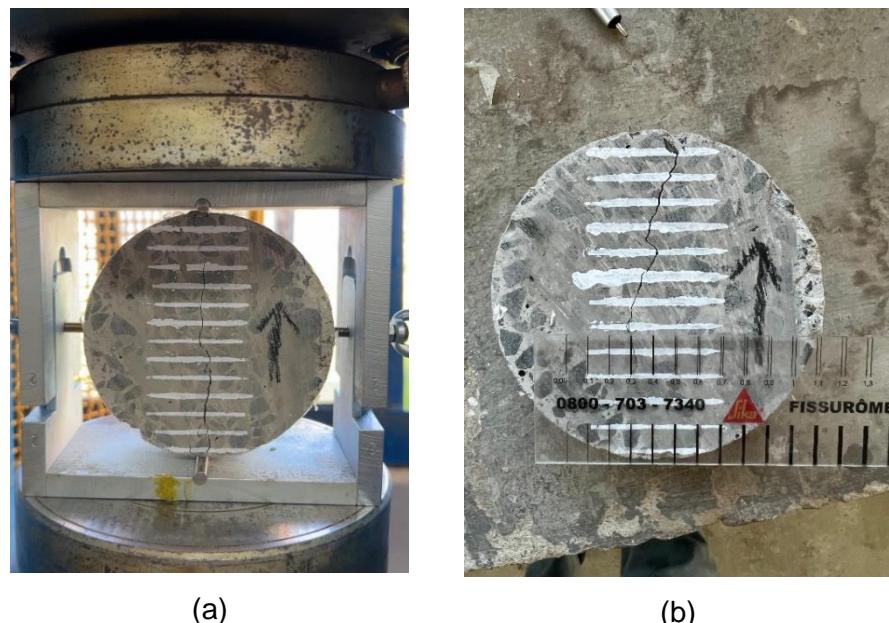
3.3.7 Fissuração dos corpos de prova

Em se tratando do procedimento de abertura de fissuras para avaliação do fenômeno de autocicatrização os corpos de prova foram submetidos à esforços de tração por compressão diametral. Neste contexto, utilizou-se o aparato com limitador desenvolvido pelo grupo de estudos de autocicatrização do LAMTAC/NORIE/UFRGS e patenteado com número de registro: BR10201900794. A utilização de tal equipamento evita a ruptura completa do corpo de prova, possibilitando a formação de uma fissura no seu centro. Visando limitar a espessura da fissura em no máximo 0,4mm, após a fissuração utilizou-se um fissurômetro para verificar se enquadrava nesse limite.

Conforme já apresentado anteriormente, idades mais recentes de fissuração beneficiam o processo de cicatrização das matrizes cimentícias, muito em função do processo contínuo de hidratação do cimento ao longo do tempo (DANISH, MOSABER PANAH, SALIM, 2020; DE BELIE *et al.*, 2018; SNOECK, 2015). Tendo esse cenário em vista, as fissuras dos corpos de prova foram abertas aos 7 dias

buscando utilizar o máximo de potencial de autocicatrização. A escolha dessa idade de fissuração também foi utilizada em outros estudos como: Anglani *et al.* (2022); Huynh, Imamoto e Kiyohara (2022) e Wei *et al.* (2024).

Figura 43 – Procedimento de (a) fissuração do corpo de prova e (b) verificação da espessura máxima da espessura da fissura



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.8 Avaliação da autocicatrização

Com o intuito de realizar a análise da autocicatrização foram utilizadas duas formas de avaliação: velocidade de propagação de onda ultrassônica e análise de imagem através de microscopia ótica. Publicações recentes também utilizam os ensaios mencionados, conforme já foi abordado no item 2.1.4.1 desta pesquisa.

3.3.8.1 Análise de imagem através de microscopia

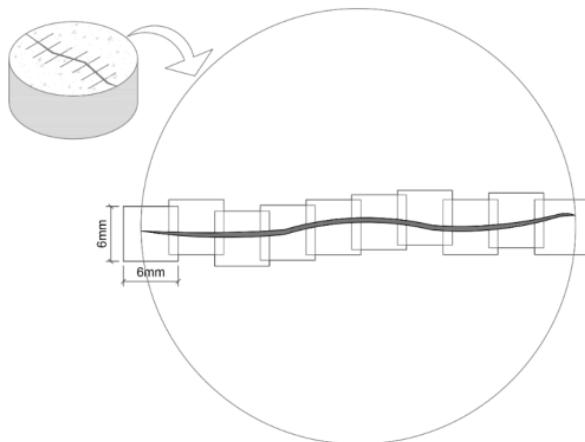
Com o intuito de visualizar, registrar e quantificar o processo de autocicatrização das amostras, foi feito uso do microscópio Zeiss Stemi 508 que possibilitou a ampliação e registro de imagens. No ensaio em questão utilizou-se uma ampliação de 65 vezes nas diferentes seções da fissura, conforme o esquema apresentado na Figura 44, de forma a proporcionar um registro total da fissura formada. Além disso, em todas as capturas de imagem foi utilizado um aparato que mantinha padrão a luz ao longo do registro para que não influenciasse na qualidade

da imagem obtida, sendo esses detalhes também apresentados na Figura 44. Os corpos de prova foram retirados da cura 24 horas antes da sua análise, e dispostos em ambiente de laboratório para garantir uma superfície seca. Os registros ocorreram logo após a fissuração dos corpos de prova e depois de 28 e 42 dias de cura.

Figura 44 – Registro do (a) ensaio de microscopia executado nos corpos de prova e (b) esquema ilustrativo da forma de em que ocorreram a captura das imagens



(a)



(b)

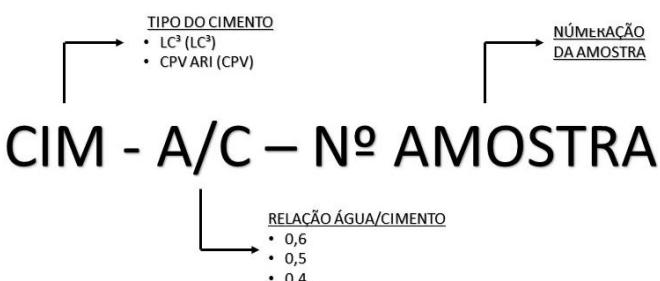
Fonte: Elaborada pelo autor

Fonte: Garay et al. (2021, p.1301)

Para o tratamento das imagens e suas respectivas análises foi utilizada a metodologia desenvolvida por Borowski, Schrank e Vainstein (2024). Os autores em questão desenvolveram um sistema que agrupa as imagens das diferentes seções da fissura e constrói seu respectivo perfil. Além disso, também no mesmo estudo foi criado código que faz a leitura de pixels e determina a área da fissura, bem como outras informações pertinentes.

De forma a facilitar o entendimento dos resultados de registro visual do acompanhamento da autocicatrização adotou-se um sistema de nomenclatura para os diferentes corpos de prova, o qual está ilustrado e explicado na Figura 45.

Figura 45 – Sistema de nomenclatura utilizada para facilitar o entendimento dos resultados



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.8.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

De forma a estudar a velocidade de propagação de onda ultrassônica, foi executado o ensaio preconizado pela NBR 8802 (ABNT, 2019). Assim sendo, os transdutores foram posicionados em três posições diferentes, previamente selecionadas, na direção transversal da fissura formada no corpo de prova. Visando manter a análise assertiva, o corpo de prova foi marcado previamente com um apoio de um gabarito para garantir que as leituras fossem realizadas sempre no mesmo local e que os transdutores estivessem exatamente em pontos opostos. As etapas descritas são apresentadas na Figura 46. Antes da execução das leituras os corpos de prova submersos foram retirados da água e secados por 24 horas, conforme descrito no item 3.3.8.1. Dispondo dos resultados obtidos no equipamento foi calculado a velocidade de propagação seguindo a $V = \frac{L}{t}$ Equação 6:

$$V = \frac{L}{t} \text{ Equação 6}$$

Em que:

V = velocidade de propagação de onda ultrassônica ($\frac{m}{s}$);

L = Distância entre transdutores (m);

t = Tempo decorrido entre transmissão e recepção da onda ultrassônica (s).

Figura 46 – Registros da (a) execução do ensaio de propagação ultrassônica e das (b) marcações realizadas no corpo de prova para as leituras



Fonte: Elaborada pelo autor

As leituras foram executadas em seguida do procedimento de abertura da fissura e após 42 dias de cura, representando, respectivamente, o estágio fissurado e cicatrizado. Ainda foram feitas leituras dos corpos de prova íntegros de forma a possibilitarem a supressão do efeito de hidratação do cimento, considerando somente o efeito da autocicatrização. Dispondo desses dois resultados foi utilizado a $Tt0 = \frac{V_{ti}}{V_{ml}} \times 100$ Equação 7 para o cálculo da taxa de autocicatrização:

$$Tt0 = \frac{V_{ti}}{V_{ml}} \times 100 \text{ Equação 7}$$

Em que:

$Tt0$ = Taxa de autocicatrização (%);

V_{ml} = Velocidade média de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova cicatrizados ou íntegros;

V_{ti} = Velocidade média de propagação de onda ultrassônica após abertura da fissura.

3.3.9 Avaliação da durabilidade

Ao longo do programa experimental também foi realizada a avaliação da durabilidade das matrizes cimentícias autocicatrizadas. Conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho, existe um destaque para os ensaios de penetração de água e permeabilidade na avaliação de matrizes cimentícias cicatrizadas, sendo esse o ensaio adotado para tal investigação.

3.3.9.1 Penetração de água sob baixa pressão

O ensaio de penetração de água sob baixa pressão consiste na determinação da quantidade de água passante pela fissura em um determinado período de tempo, permitindo correlacionar com a capacidade de penetração dos agentes agressivos na matriz cimentícia, principal fator que impacta na durabilidade. Assim sendo, essa análise foi executada logo após a abertura da fissura do corpo de prova e após 42 dias de cura, representando o estado fissurado e cicatrizado do concreto.

Neste contexto, utilizou-se um aparato proposto no estudo desenvolvido por Costa (2024) que permite a passagem de água e possui uma coluna graduada, possibilitando a leitura da quantidade de água passante. Cabe ressaltar que esse

aparato está em processo de patente, assim sendo apresenta-se na Figura 46 o registro disponibilizado pela própria autora em seu trabalho.

Figura 47 – Aparato desenvolvido por Costa (2024) para o ensaio de penetração de água sob baixa pressão



Fonte: Costa (2024, p.83)

A autora em questão também propôs considerar a área da fissura formada no corpo de prova para a determinação do coeficiente de permeabilidade, adaptando a Lei de Darcy. Assim sendo, seguiu-se o proposto por Costa (2024) em que se utilizou a Equação 8 para determinação do coeficiente de permeabilidade.

$$K = \left(\frac{A_1 \times L}{A_2 \times t} \right) \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \text{ Equação 8}$$

Em que:

K = Coeficiente de permeabilidade;

$A_1 L$ = Área da fissura (mm^2);

A_2 = Área do tubo (mm^2);

L = Comprimento da amostra (mm);

t = Tempo (s);

h_1 = Altura inicial (cm);

h_2 = Altura final (cm).

De forma a analisar a manutenção dos produtos de cicatrização, os corpos de prova passaram pela análise de imagem, conforme o procedimento já descrito anteriormente, antes e após o ensaio de penetração. O intuito foi de analisar a área

de cicatrização, buscando entender se os cristais formados se mantiveram na fissura após a penetração da água sob baixa pressão.

3.3.10 Caracterização dos produtos de hidratação

Conforme apresentado no levantamento bibliográfico disposto no item 2.1.4.3 as pesquisas que investigam a composição dos produtos de hidratação utilizam metodologias muito semelhantes. Assim sendo, no presente estudo, foi realizado o ensaio DRX para analisar a mineralogia dos produtos de cicatrização, conforme empregado em grande parte da bibliografia.

O produto a ser estudado foi retirado com a agulha de uma seringa de insulina, com aproximadamente 0,3 mm de diâmetro, diretamente na fissura. O material retirado era depositado em uma Placa de Petri com o auxílio do pincel, ambos equipamentos esterilizados com álcool, para ser destinado ao respectivo ensaio. Para a análise em questão o material coletado foi referente às amostras com relações a/c de 0,4 e 0,6. Esse procedimento está registrado na Figura 48.

Figura 48 – Procedimento de retirada dos produtos de cicatrização para análise de DRX



Fonte: Elaborada pelo autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios do programa experimental.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

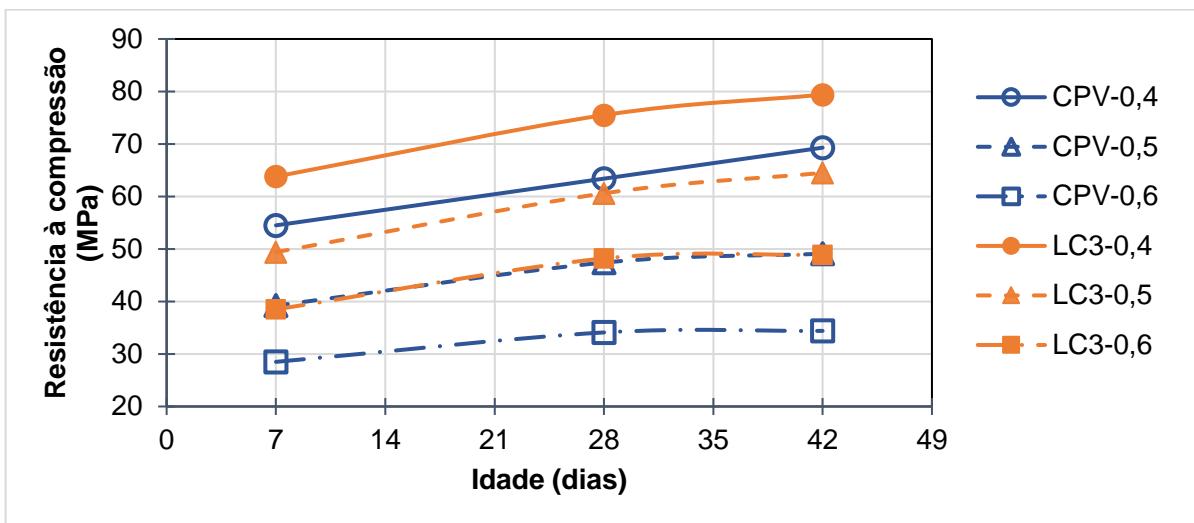
De forma a apresentar um compilado dos resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão, foi elaborada a Tabela 10. Cabe salientar que para as análises e elaboração dos gráficos apresentados foi utilizado o valor potencial de resistência entre os exemplares de uma mesma idade, conforme orienta a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Tabela 10 – Compilado dos resultados de resistência à compressão

Relação a/c	Cimento	Idade	Resistência à Compressão Média (MPa)	Resistência à Compressão Potencial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0,6	CPV ARI	7 dias	28,2	28,5	0,25
		28 dias	34,0	34,1	0,10
		42 dias	33,8	34,4	0,49
	LC ³	7 dias	38,2	38,5	0,37
		28 dias	47,8	48,2	0,37
		42 dias	48,6	48,9	0,35
0,5	CPV ARI	7 dias	39,0	39,2	0,21
		28 dias	47,3	47,4	0,09
		42 dias	48,3	49,1	0,81
	LC ³	7 dias	49,4	49,4	0,06
		28 dias	60,1	60,6	0,52
		42 dias	63,0	64,5	1,48
0,4	CPV ARI	7 dias	54,3	54,5	0,23
		28 dias	63,0	63,4	0,48
		42 dias	69,2	69,3	0,10
	LC ³	7 dias	63,5	63,8	0,30
		28 dias	75,2	75,5	0,31
		42 dias	77,2	79,4	2,27

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 49 – Resultados do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor

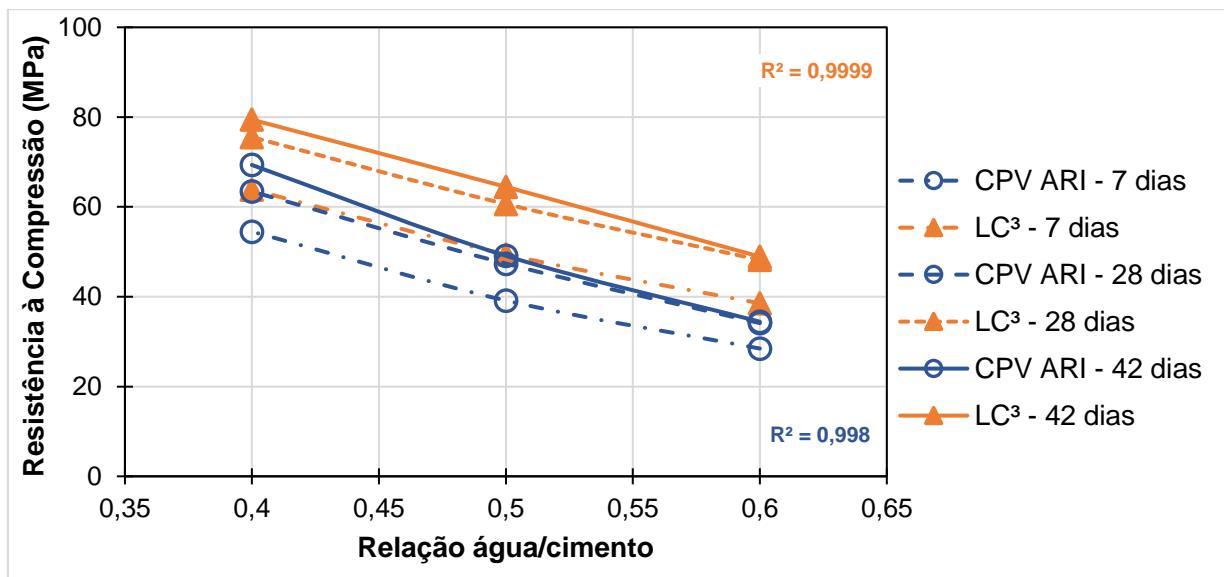
Conforme é possível observar nos resultados na idade de 7 dias foram observados valores de resistência superiores para o cimento ternário do tipo LC³ em relação ao cimento CPV ARI, na média de 26,3%, em todas as relações a/c analisadas no estudo. Esse comportamento muitas vezes não é encontrado na bibliografia, uma vez que em grande parte dos estudos o cimento LC³ dispõe de resultados inferiores nas resistências iniciais, muito em função da reação pozolânica da argila calcinada (BARBHUIYA; NEPAL; DAS, 2023; SCRIVENER *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2021). Entretanto, é importante salientar que a reatividade da argila calcinada influencia diretamente no desenvolvimento da resistência, conforme afirmam Fröhlic (2019) e Nguyen, Afroz e Castel (2020). Assim sendo, levando em consideração esse cenário, entende-se que o comportamento visualizado é plausível, uma vez que a argila calcinada utilizada no estudo dispõe de elevada finura e alta reatividade.

O mesmo comportamento visualizado no ensaio de resistência à compressão na idade de 7 dias ocorreu na idade de 28 dias, também em todas as relações a/c, com valores 29,4% superiores para o cimento LC³. Tal comportamento é amplamente observado na literatura, uma vez que o cimento ternário do tipo LC³ dispõe de reações sinérgicas entre o carbonato de cálcio moído e a argila calcinada, que culminam na formação de mais produtos de hidratação, contribuindo com o desenvolvimento da resistência. Esse fato também explica o maior crescimento de resistência entre as idades de 7 dias e 28 dias para o cimento ternário do tipo LC³ (FRÖLICH, 2019; TANG *et al.*, 2019; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

A última idade avaliada para o ensaio de resistência à compressão foi de 42 dias, com um comportamento muito semelhante ao identificado nos 28 dias (valores na média 29,3% superiores para o cimento LC³) pelas mesmas razões apontadas nas demais idades. Além disso foi observado que, proporcionalmente, a evolução de resistência de 7 para 28 dias é maior do que a evolução de 28 para 42 dias. Isso é explicado pelo fato de que as reações de hidratação já estão em um estágio avançado, com pouca formação de novos produtos, além da densificação da matriz que dificulta a penetração de água para reagir com o possível cimento anidro ainda presente na composição do concreto (BEAUDIOIN; ODLER, 2019; QUARCIONI, 2008).

Os resultados também foram apresentados em forma de Curvas de Abrams, conforme apresentado na Figura 50, correlacionado a resistência à compressão com a relação a/c. A partir do R^2 das curvas elaboradas é possível atrelar uma grande confiança nos resultados obtidos no estudo.

Figura 50 – Curvas de Abrams elaboradas a partir dos resultados de resistência à compressão



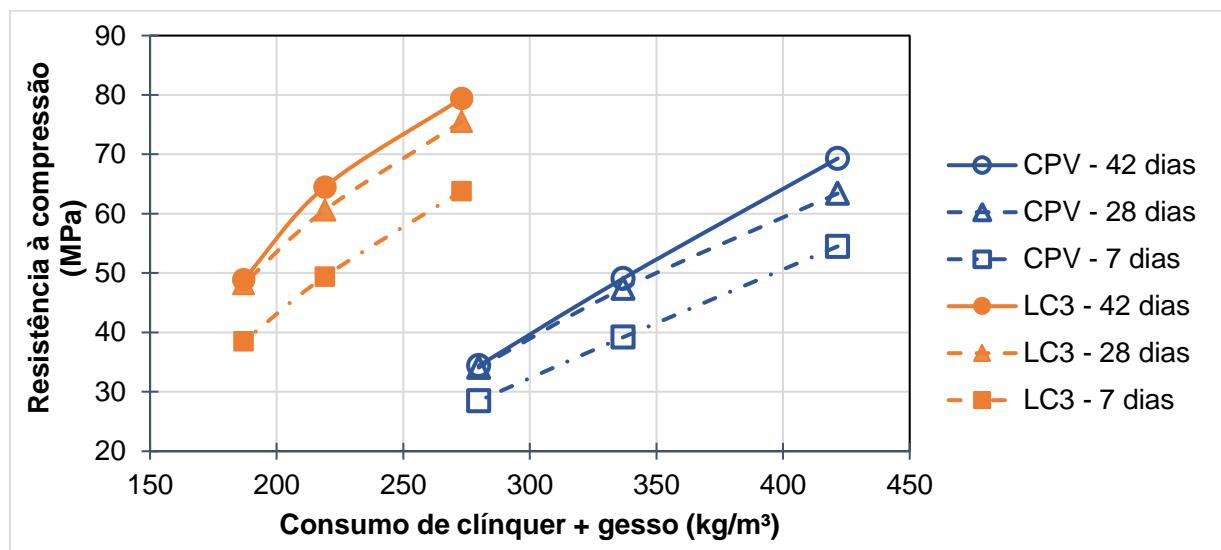
Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, é possível visualizar que o comportamento entre as diferentes relações a/c analisadas se enquadrou dentro do esperado. Relações água/cimento menores possuem consumos de cimento maiores que, consequentemente, acarretam a formação de resistências à compressão mais elevadas.

Levando em consideração a questão de sustentabilidade dos cimentos analisados, apresenta-se a Figura 51. Como é possível observar no gráfico, o consumo de clínquer é menor para o cimento LC³, em função da substituição por

materiais cimentícios suplementares. Mesmo com menor consumo de clínquer, o cimento ternário dispôs de maiores resistências, o que consequentemente possibilita a obtenção de um consumo de ligante menor para uma mesma resistência, quando comparado ao cimento CPV ARI, reduzindo, por consequência, as emissões de CO₂. A exemplo, para atingir uma resistência de 60 MPa em 28 dias, o consumo de ligante para o LC³ é de 363 kg/m³ (200 kg/m³ de clínquer), enquanto para o CPV ARI é de 436 kg/m³ (401 kg/m³ de clínquer), uma diferença de 16,7%, com uma redução de 50% no fator clínquer desse concreto. Assim sendo, entende-se o impacto positivo em termos de sustentabilidade para o cimento ternário do tipo LC³.

Figura 51 – Correlação entre o consumo de clínquer+gesso e resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO

Conforme estabelecido anteriormente, a autocicatrização foi avaliada pelo ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica e pela análise de imagem. Os resultados e constatações são apresentados nos itens a seguir.

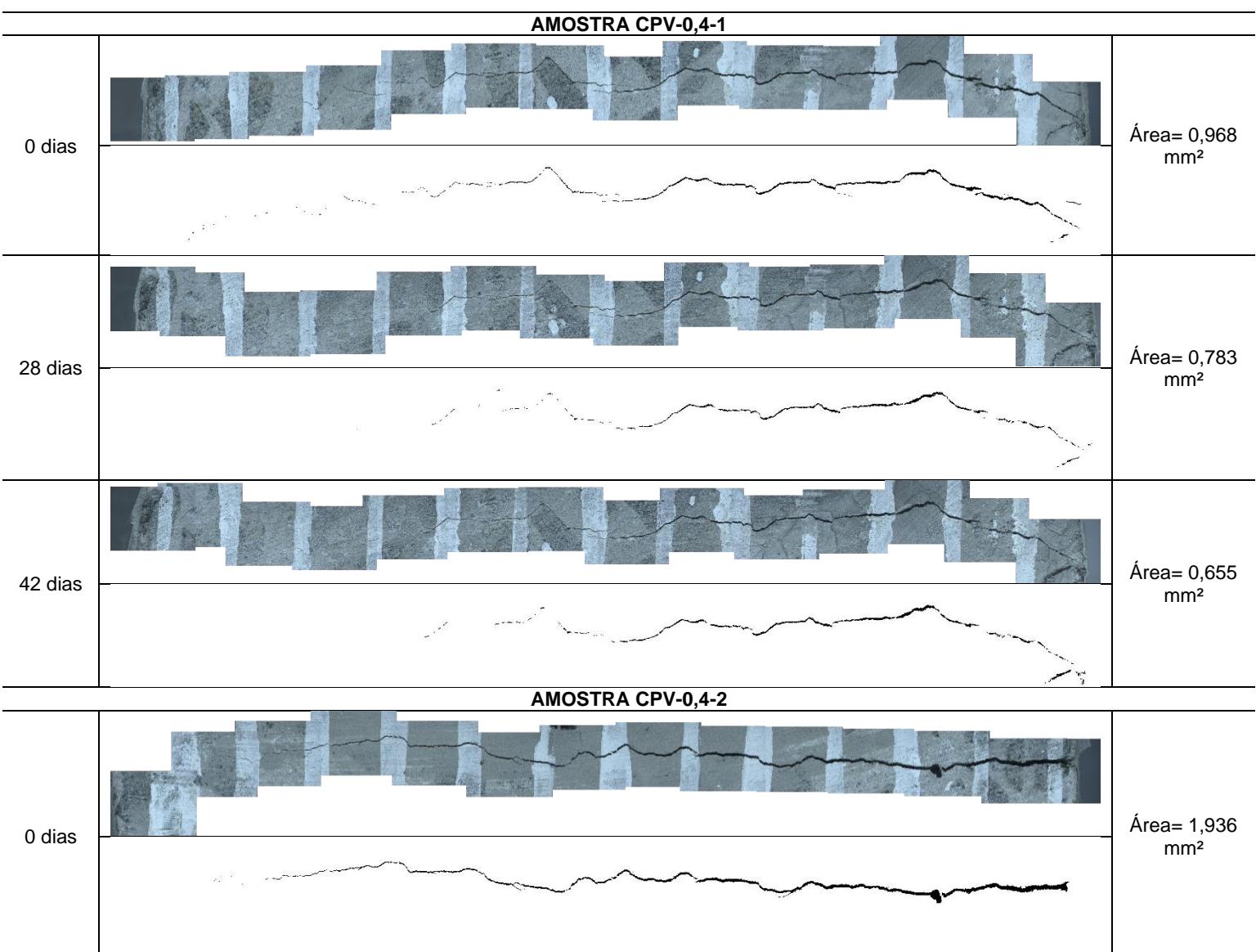
4.2.1 Análise de imagem através de microscopia

Inicialmente, apresentam-se todos os resultados obtidos com o ligante CPV ARI, para todas as relações a/c propostas nesse estudo, sendo na sequência apresentados os valores para o LC³.

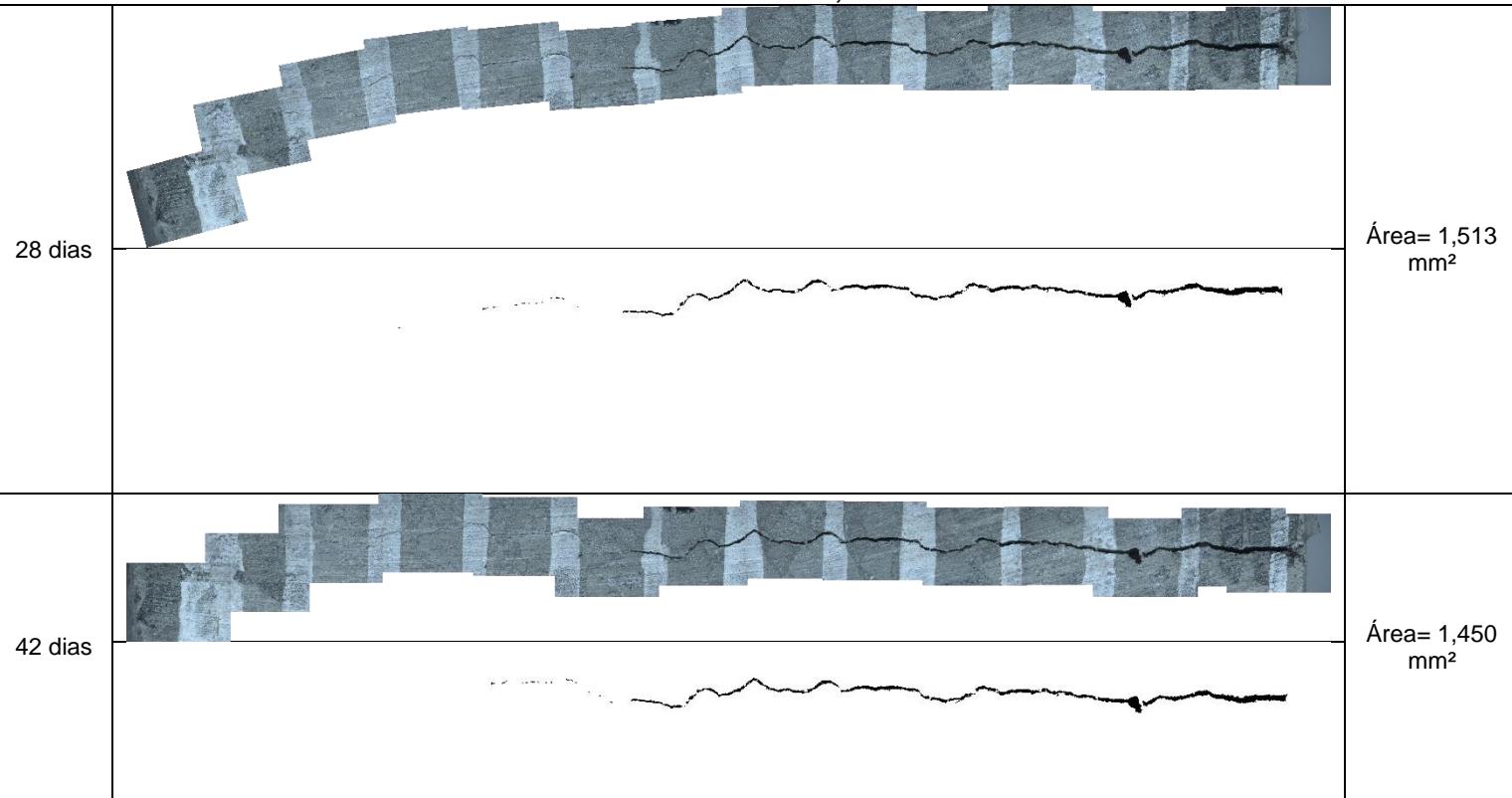
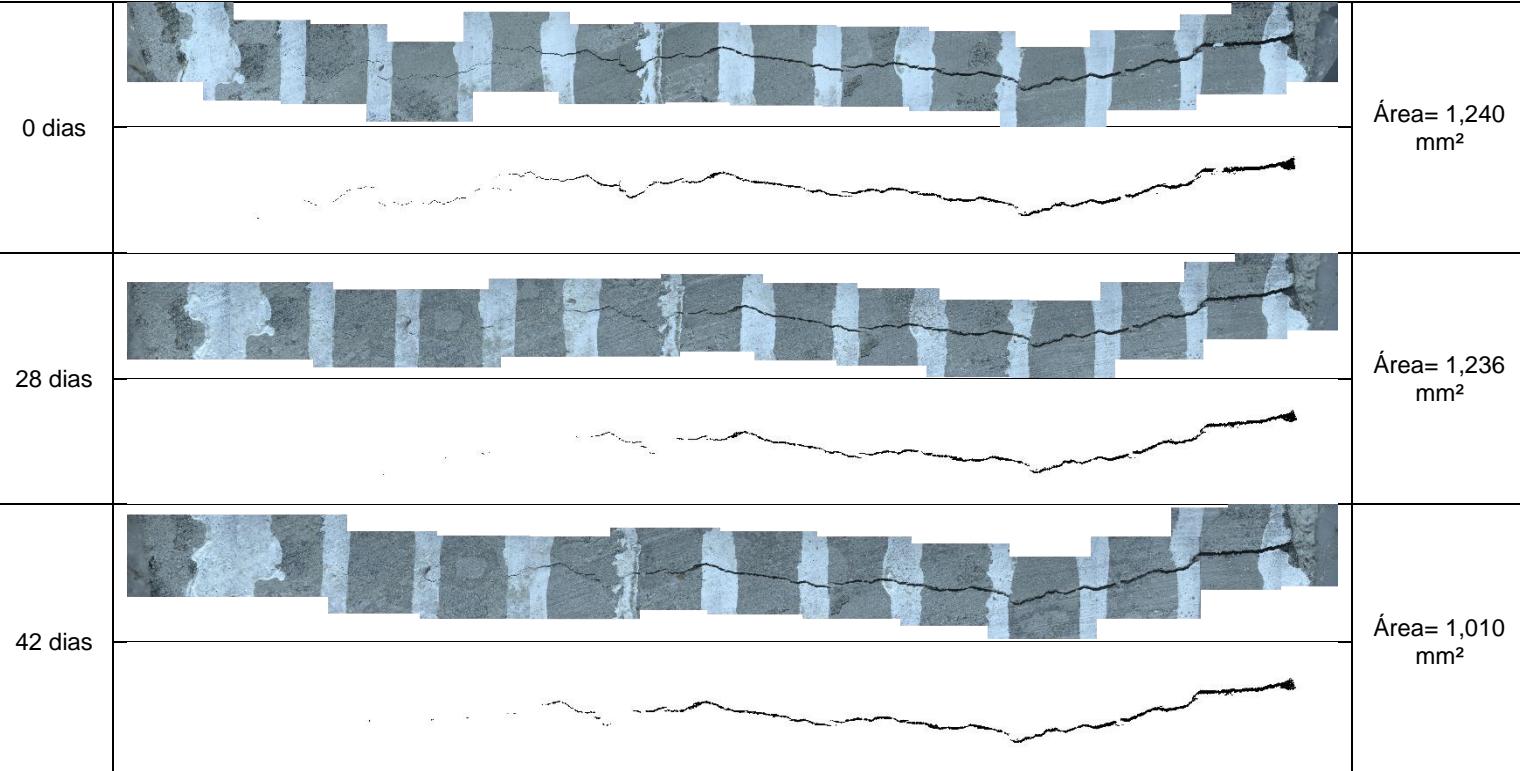
A Tabela 11 apresenta os resultados da análise de imagem obtidos com as amostras contendo o cimento CPV ARI e relação a/c de 0,4. É possível perceber que entre a idade de 0 dias e 28 dias ocorreu o processo de cicatrização de forma mais intensa, sendo que após essa idade o processo continuou ocorrendo, entretanto de forma mais branda.

Tabela 11 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,4

(continua)



(conclusão)

AMOSTRA CPV-0,4-2**AMOSTRA CPV-0,4-3**

Fonte: Elaborada pelo autor

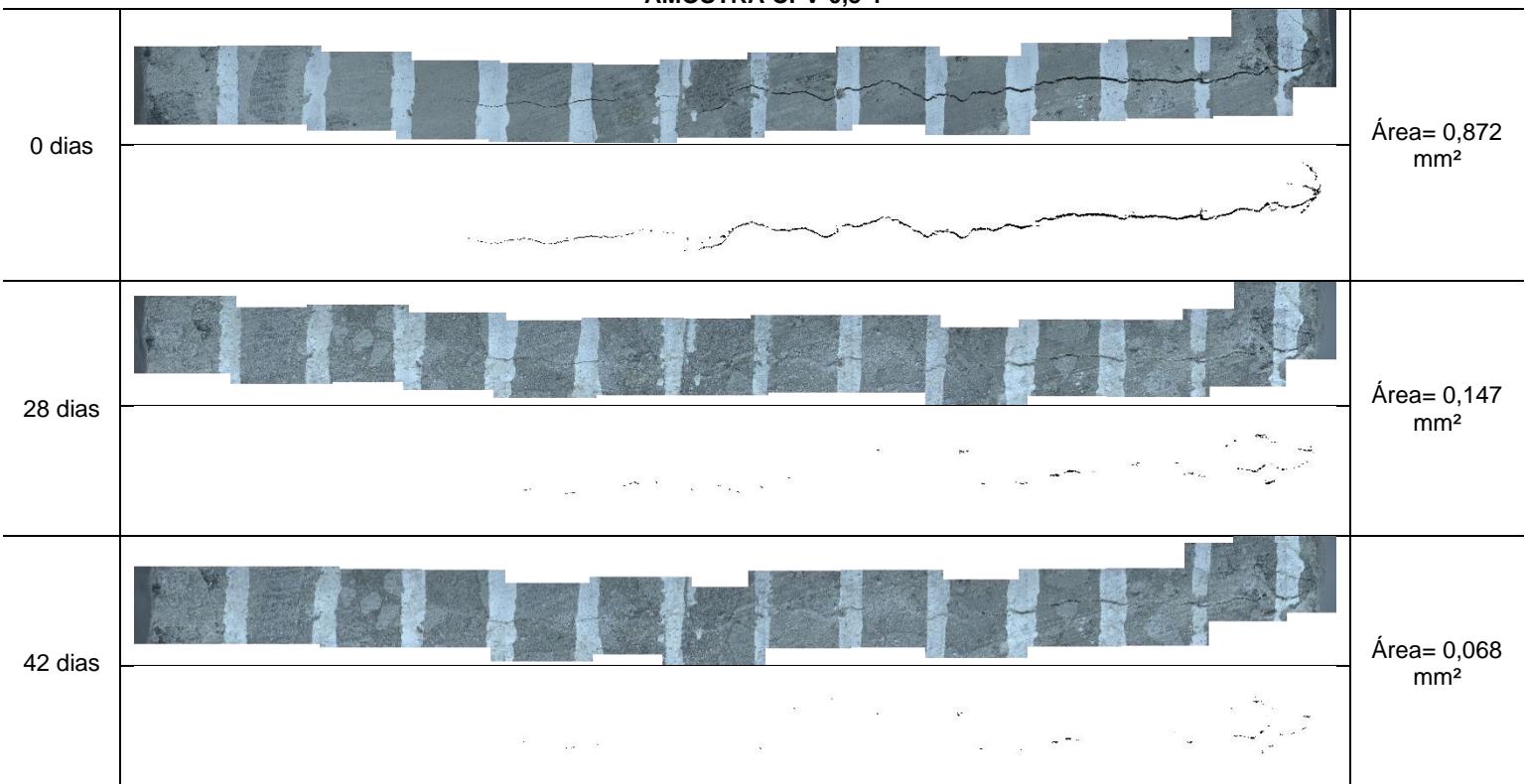
Os registros da análise de imagem dos espécimes dos traços contendo o cimento CPV ARI e a relação a/c de 0,5 são apresentados na Tabela 12. O

comportamento observado foi semelhante ao anterior, com maior comportamento de autocicatrização entre 0 dias e 28 dias, sendo o fenômeno menos intenso após tal idade.

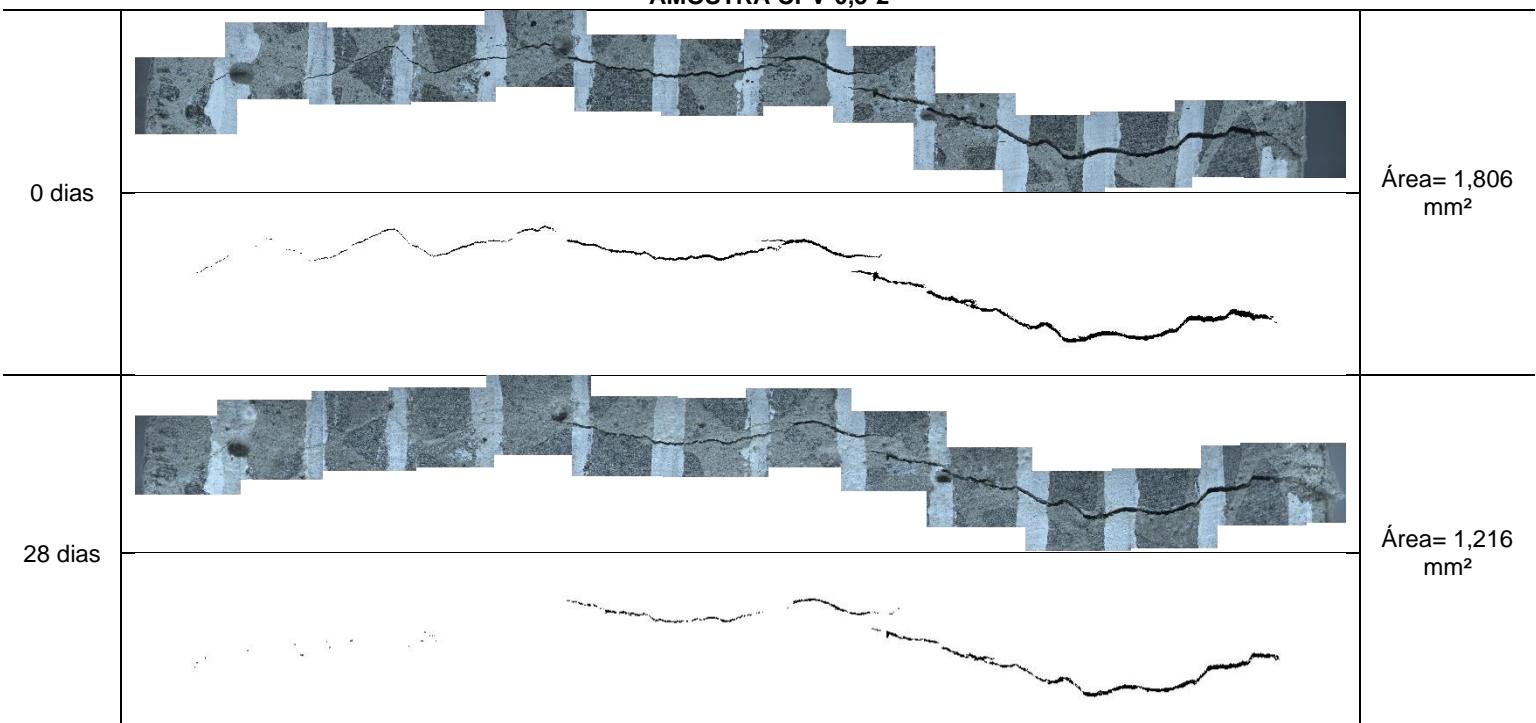
Tabela 12 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,5

(continua)

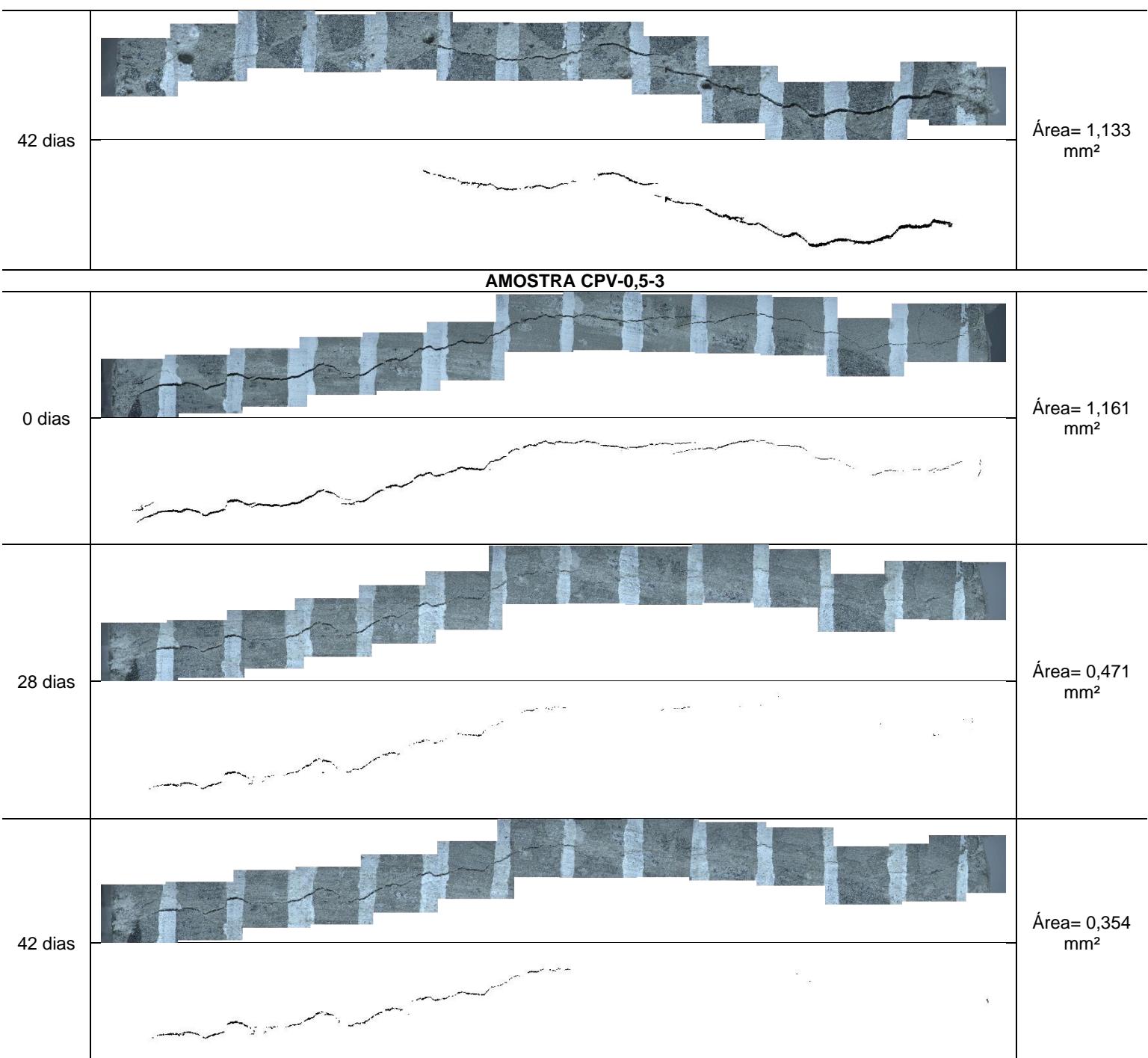
AMOSTRA CPV-0,5-1



AMOSTRA CPV-0,5-2



(conclusão)

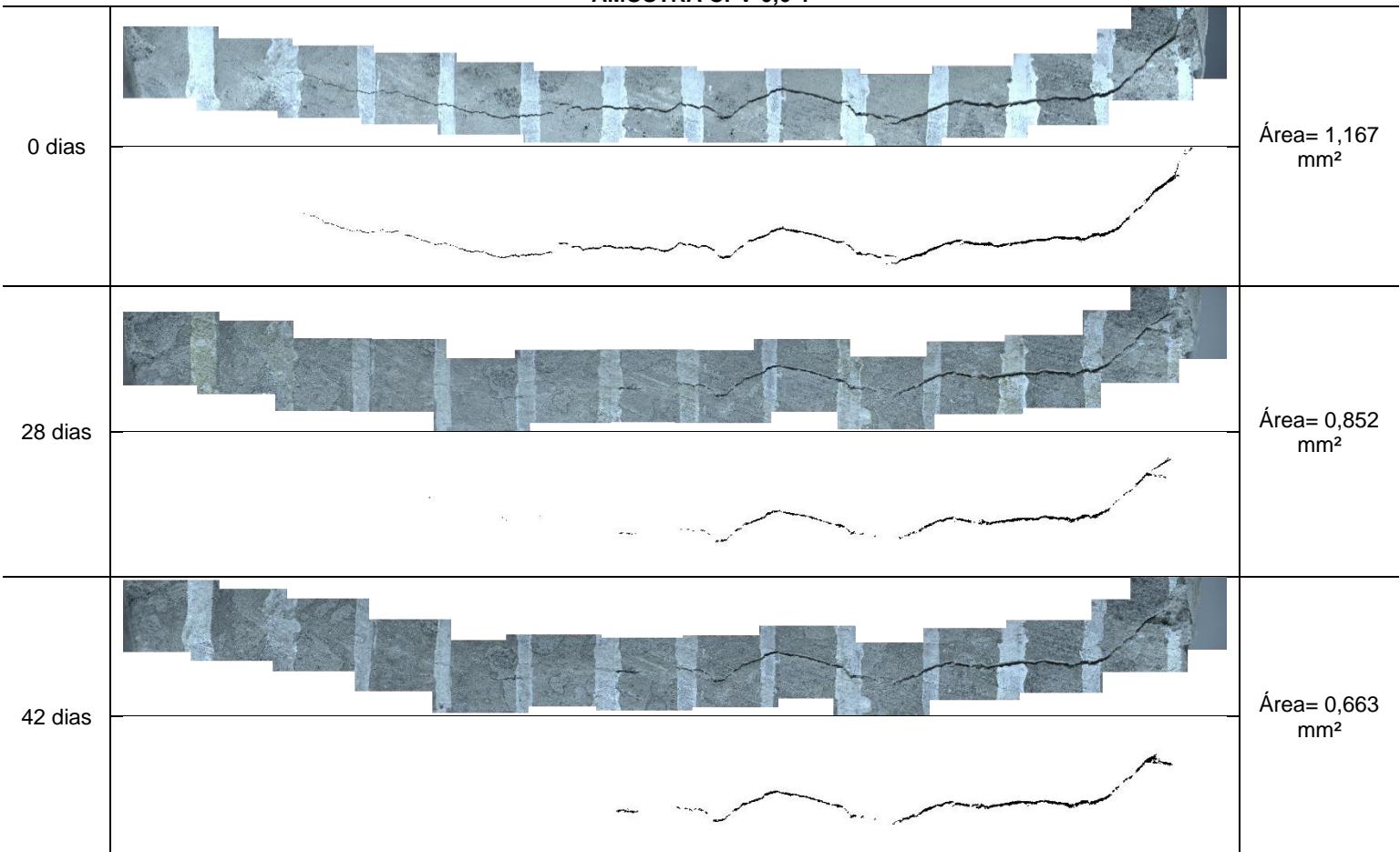
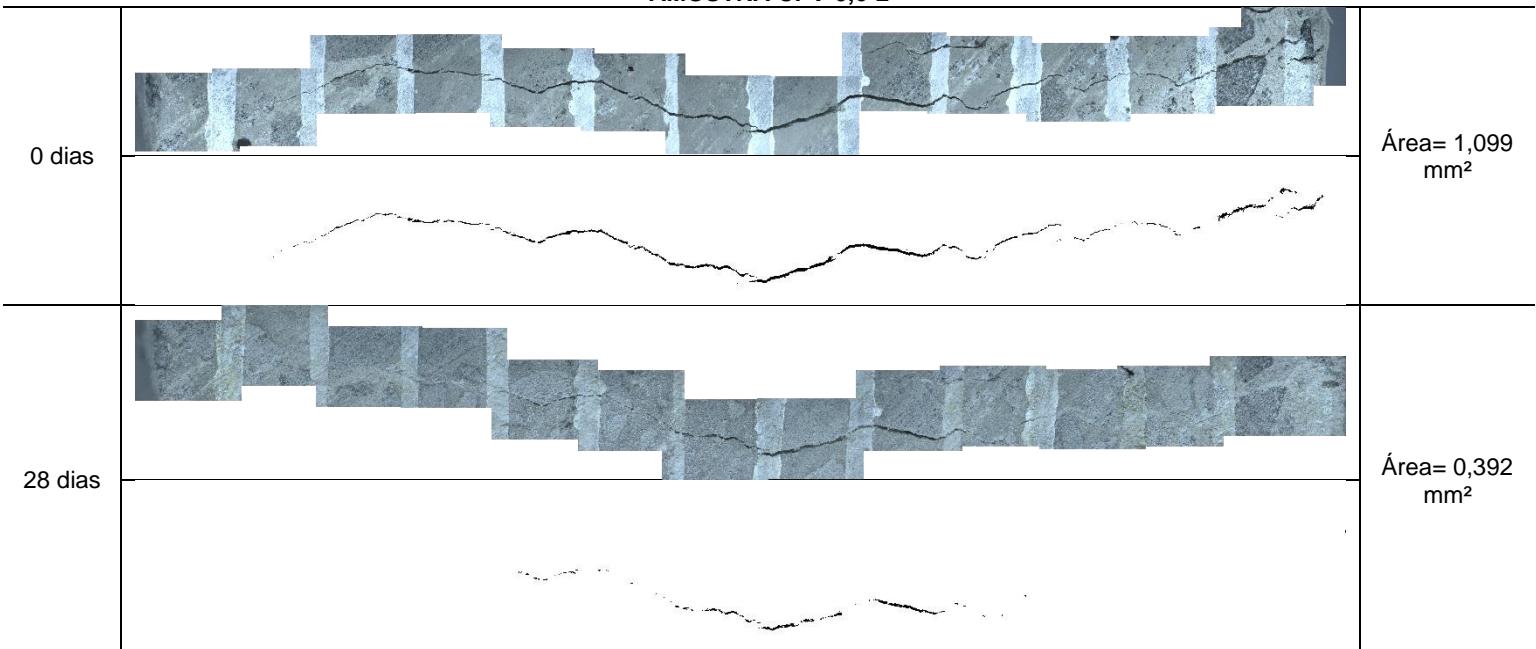


Fonte: Elaborada pelo autor

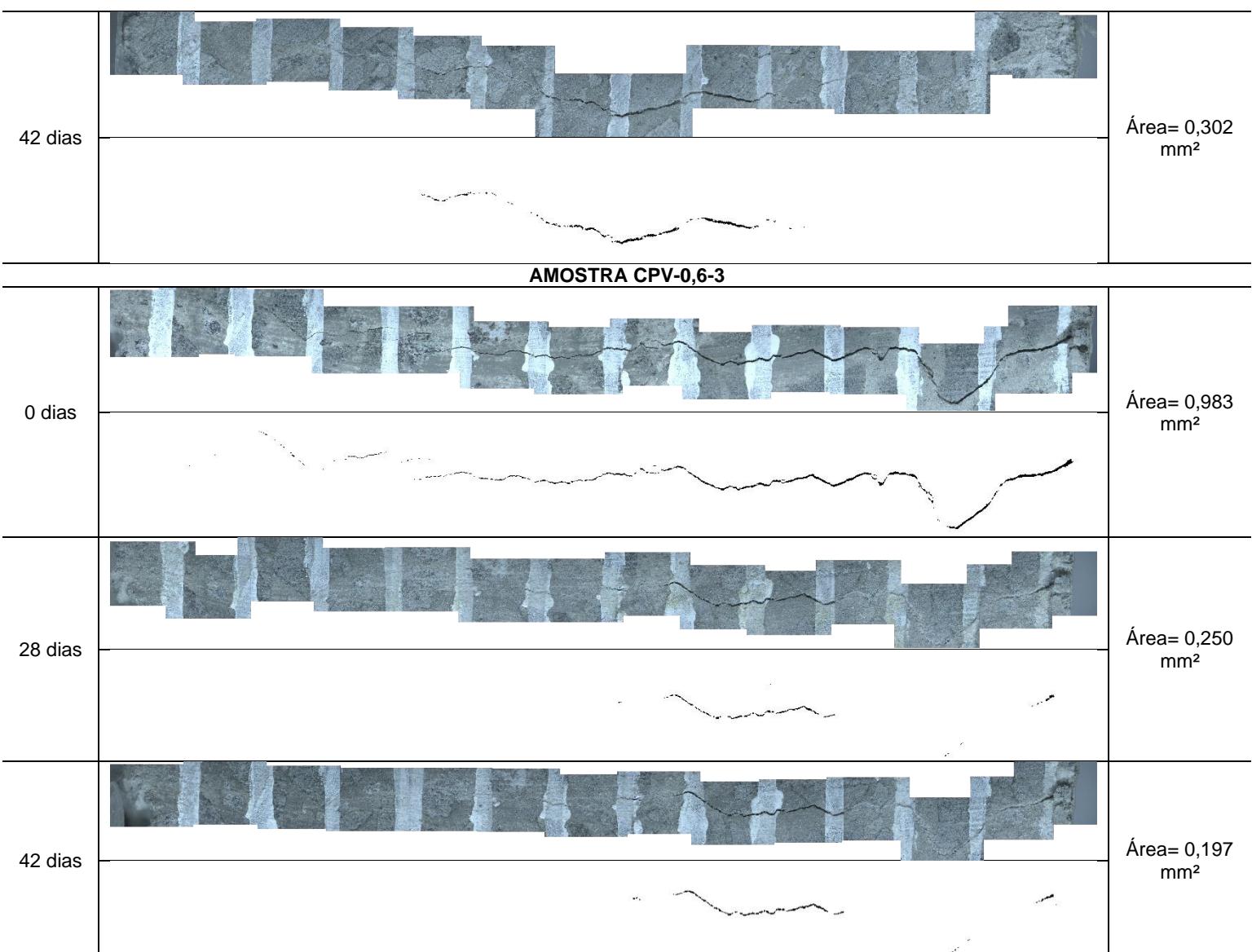
Na Tabela 13 estão dispostos os resultados obtidos da análise de imagem das amostras contendo o cimento CPV ARI com relação a/c de 0,60. A mesma forma de autocicatrização é observada, com maior precipitação dos produtos de cicatrização até 28 dias.

Tabela 13 – Análise de imagem de cicatrização das amostras CPV-0,6,

(conclusão)

AMOSTRA CPV-0,6-1**AMOSTRA CPV-0,6-2**

(conclusão)



Fonte: Elaborada pelo autor

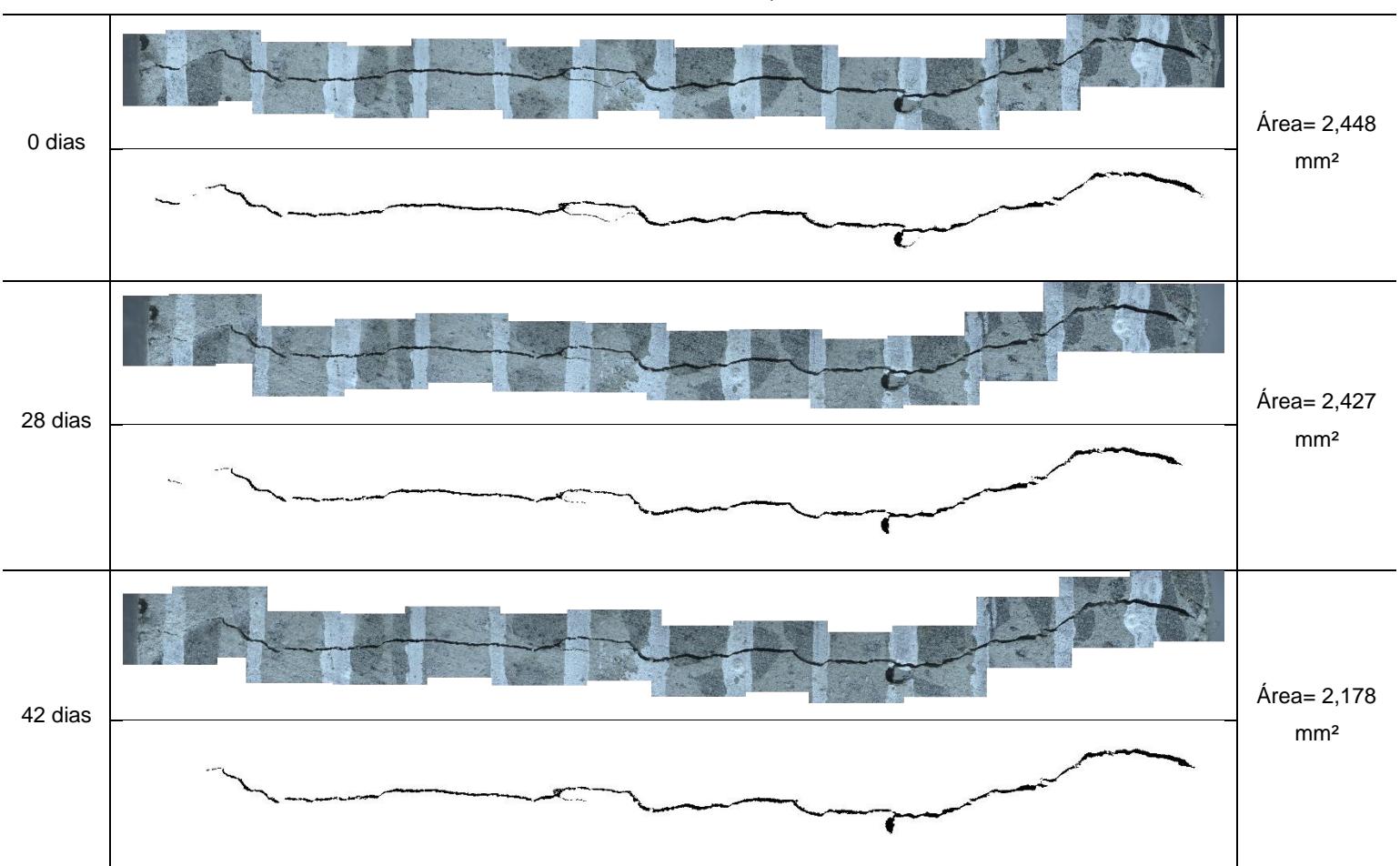
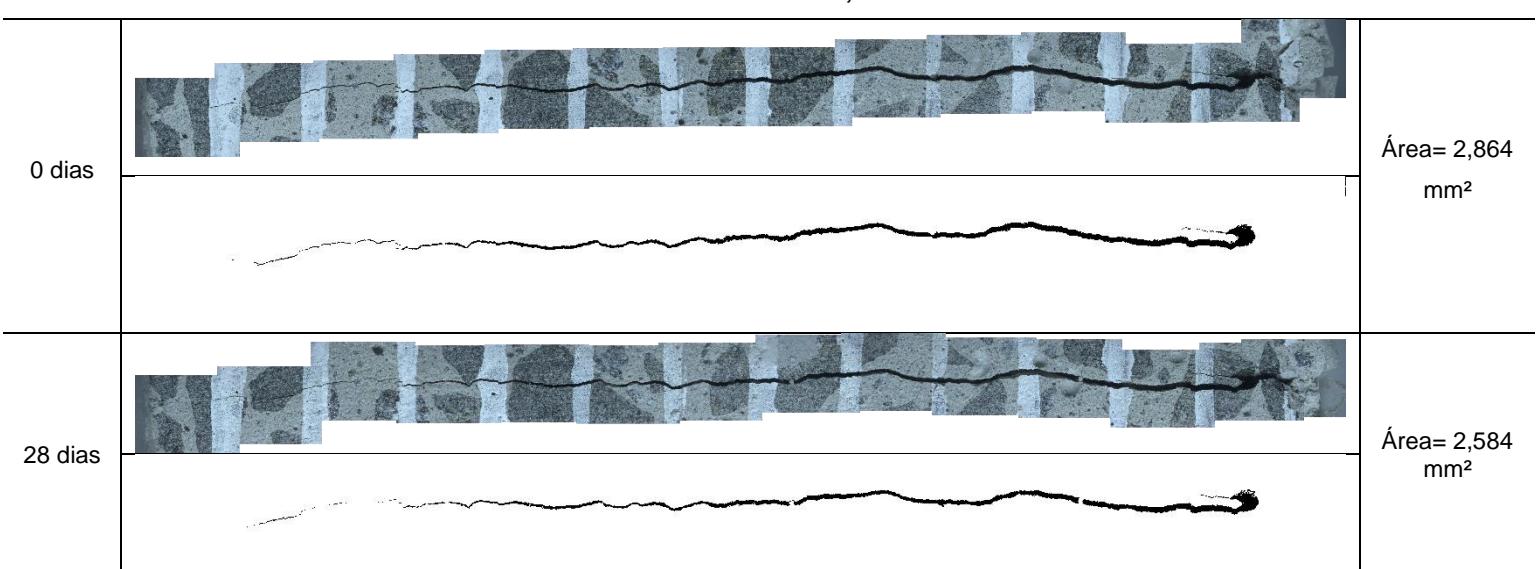
Inicia-se nesse ponto a descrição dos resultados obtidos com análise de imagem dos corpos de prova autocicatrizados contendo o cimento LC³.

Os espécimes submetidos à análise de imagem contendo o cimento ternário do tipo LC³ e relação a/c de 0,4 possuem seus resultados na

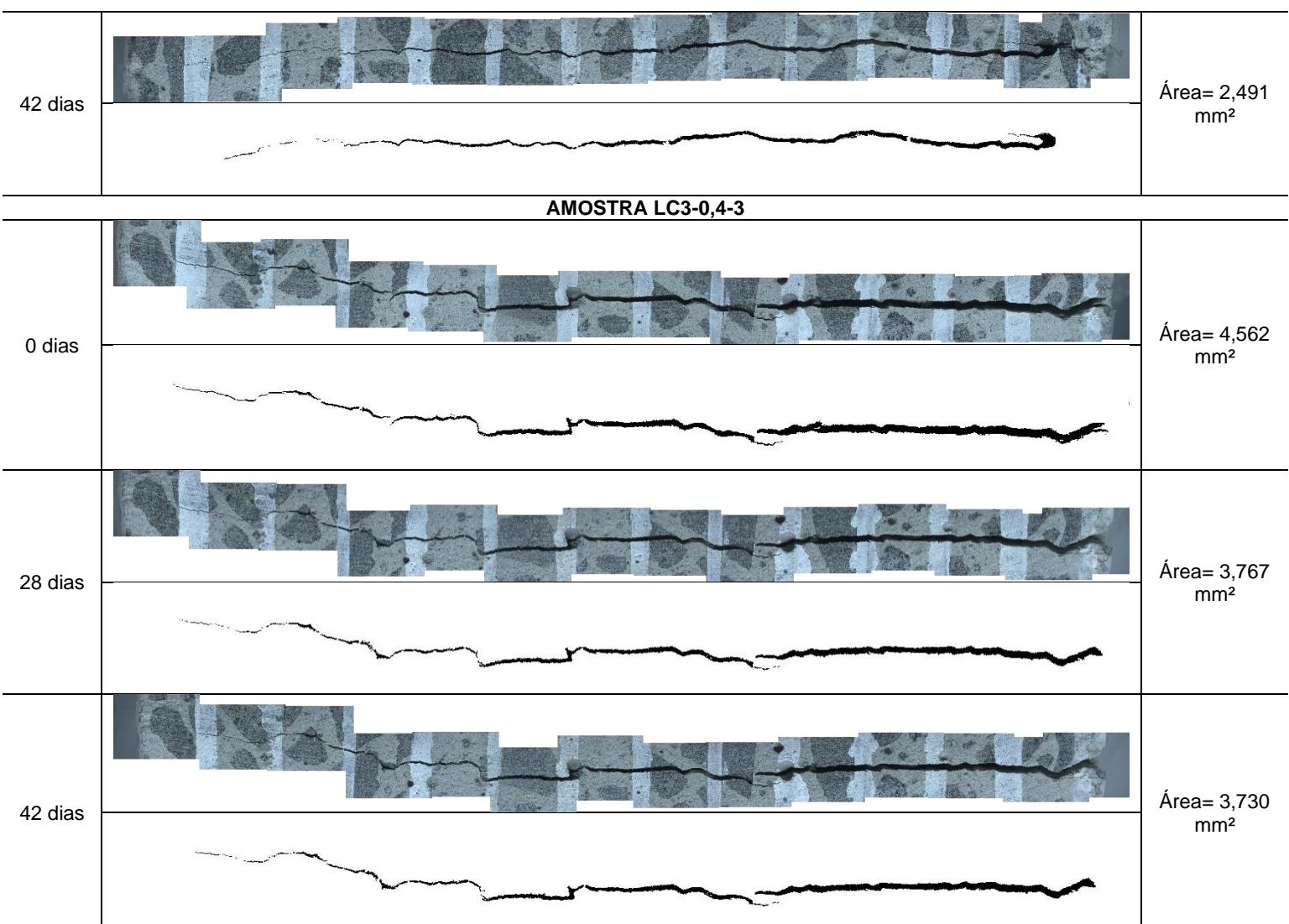
Tabela 14. O processo de cicatrização da fissura foi menos intenso quando comparado ao cimento CPV ARI, sendo que também possuiu o mesmo comportamento de maior potencial de autocicatrização até os 28 dias de cura.

Tabela 14 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,4

(continua)

AMOSTRA LC3-0,4-1**AMOSTRA LC3-0,4-2**

(conclusão)



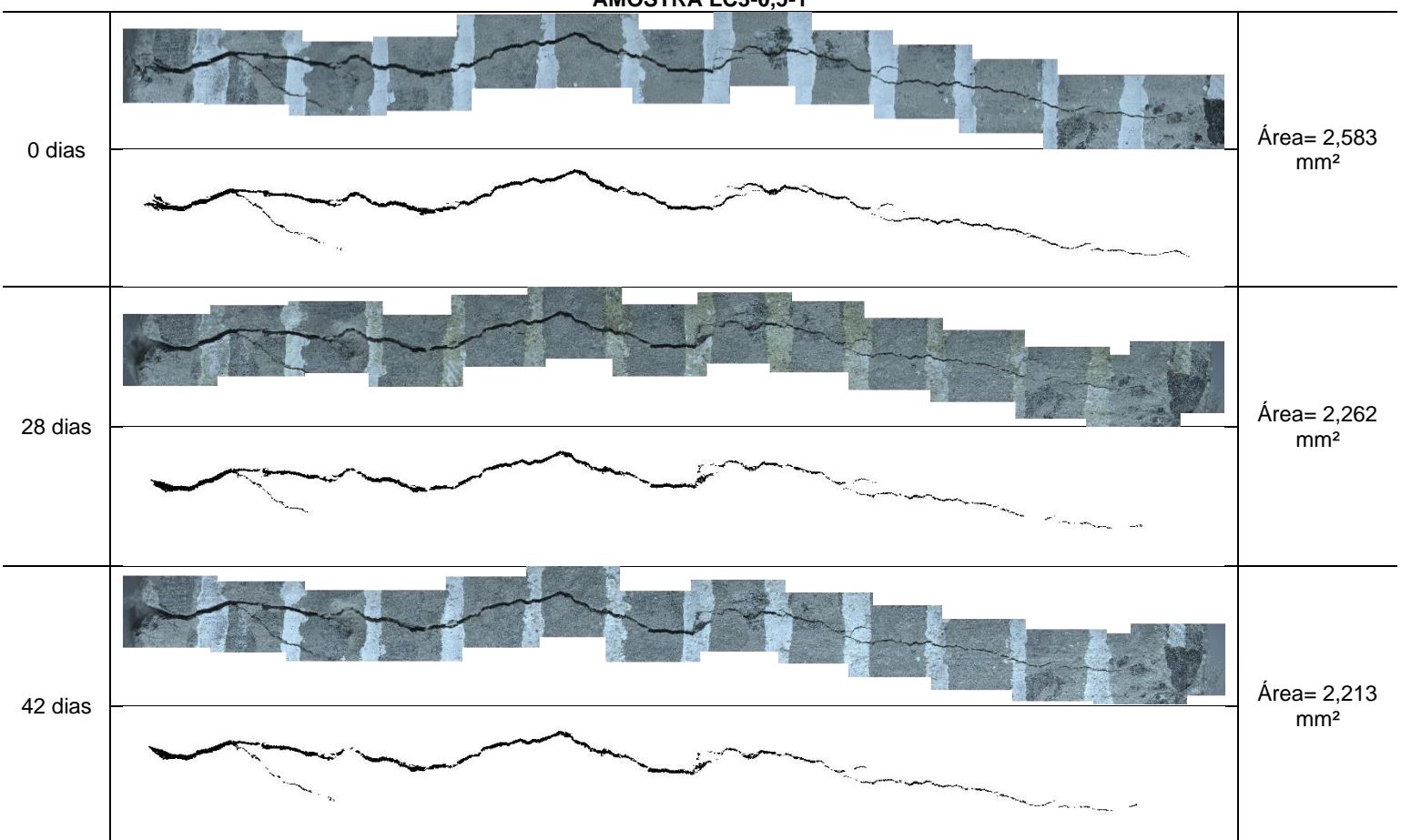
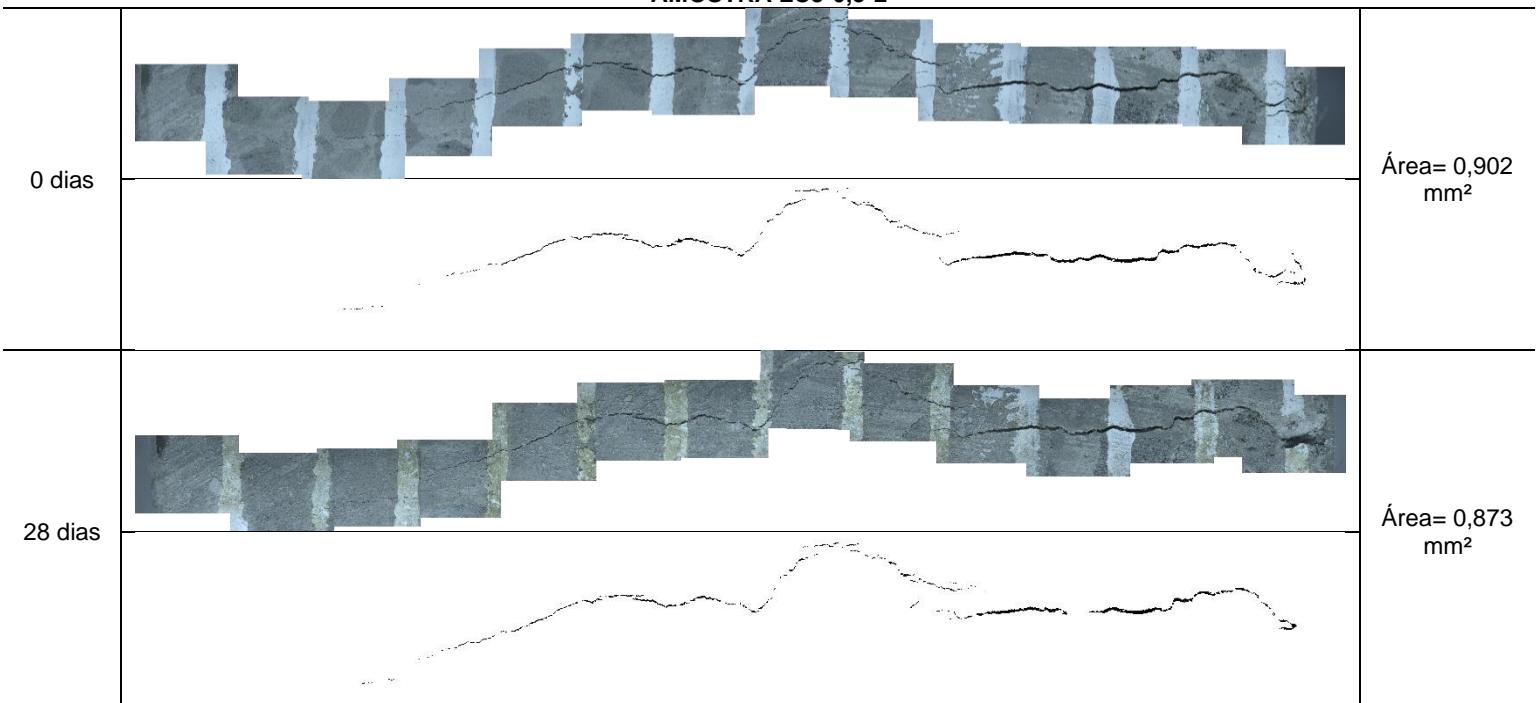
Fonte: Elaborada pelo autor

Na

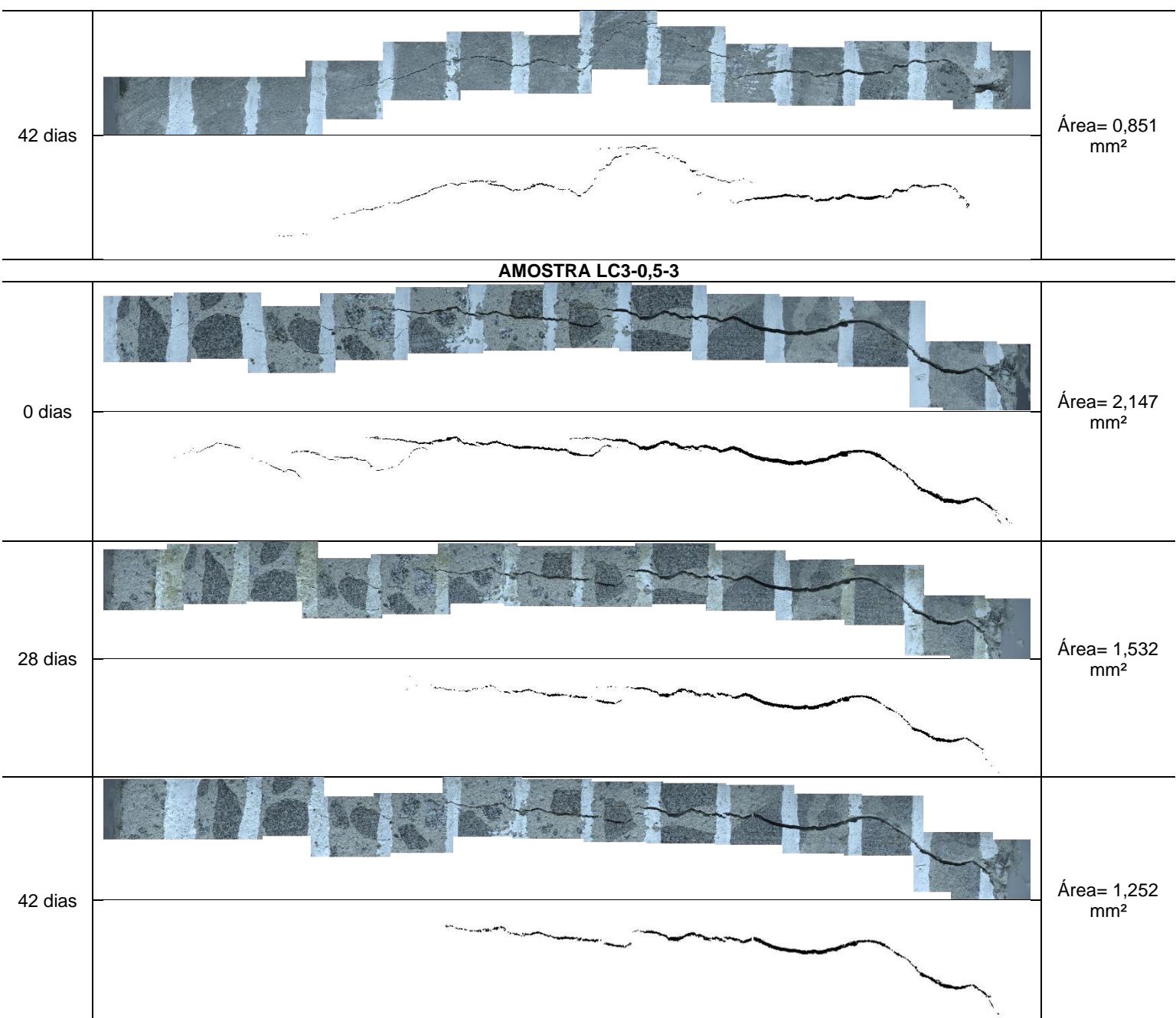
Tabela 15 estão dispostos os resultados da análise de imagem realizada para as amostras contendo o cimento LC³ e relação a/c 0,5. O fenômeno observado segue o mesmo padrão ao anterior, menos intenso quando comparado ao cimento CPV ARI e com maior potencial até a idade de 28 dias.

Tabela 15 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,5

(continua)

AMOSTRA LC3-0,5-1**AMOSTRA LC3-0,5-2**

(conclusão)



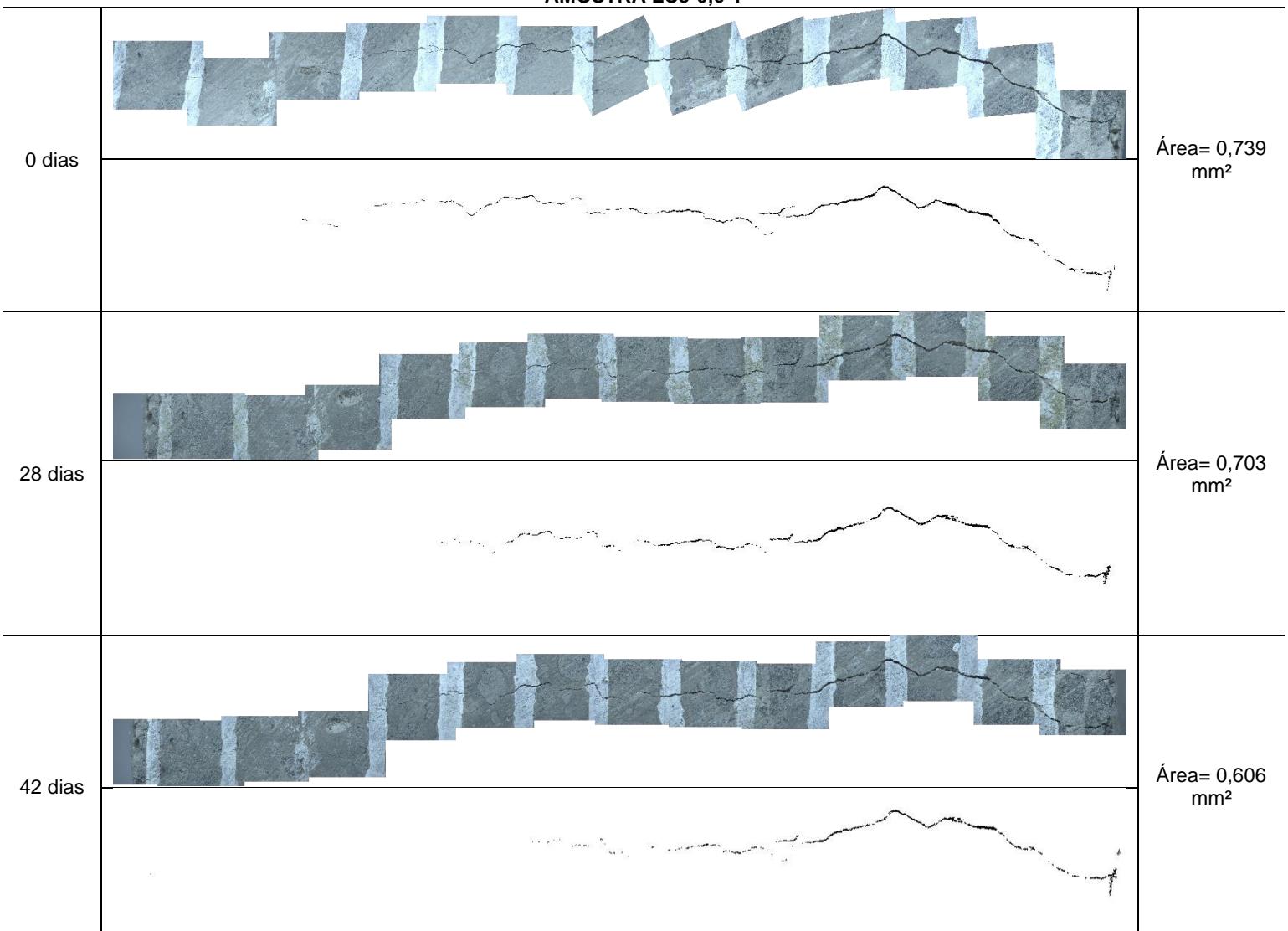
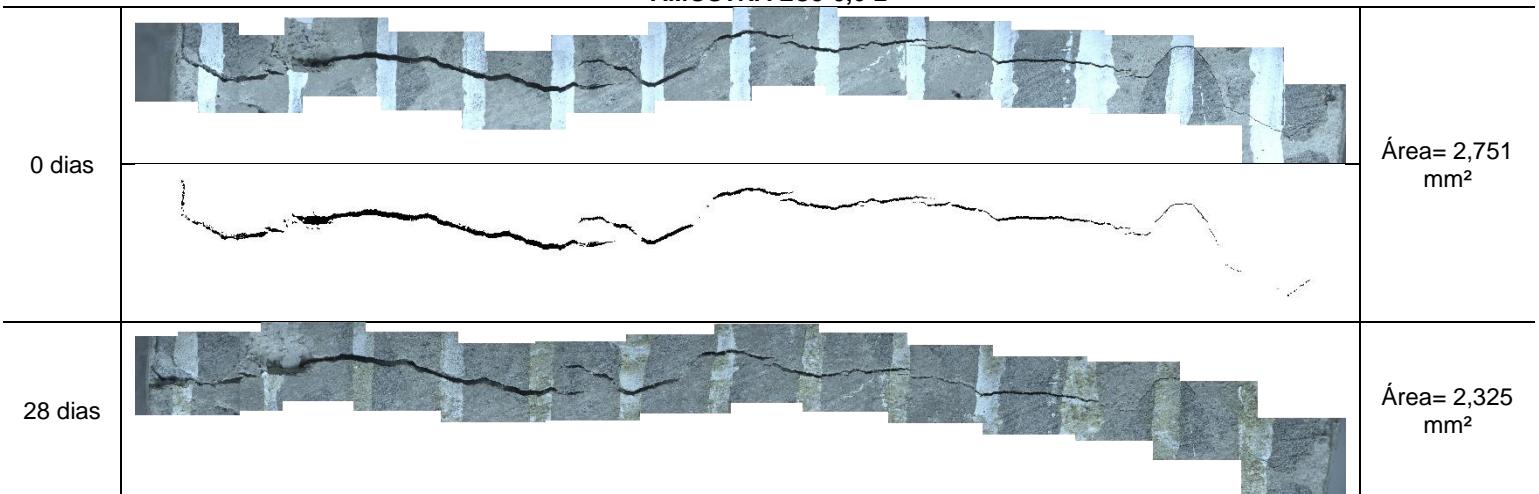
Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, os espécimes contendo o cimento ternário do tipo LC³ e relação a/c de 0,6 que passaram pela análise de imagem possuem seus resultados apresentados na

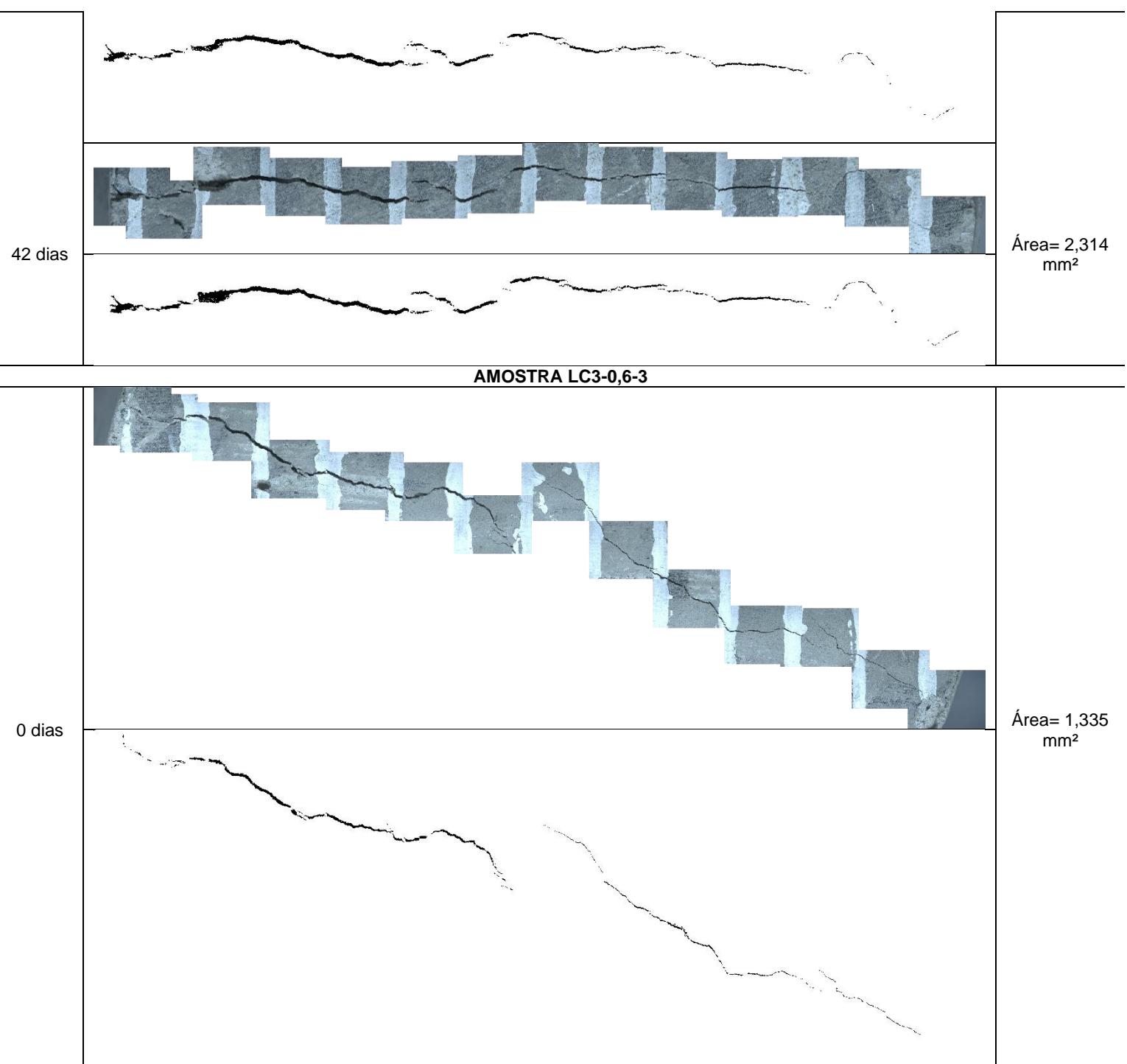
Tabela 16. O padrão já constatado anteriormente seguiu para os corpos de prova, menos intenso quando comparado ao cimento CPV ARI e com maior potencial observado até a idade de 28 dias.

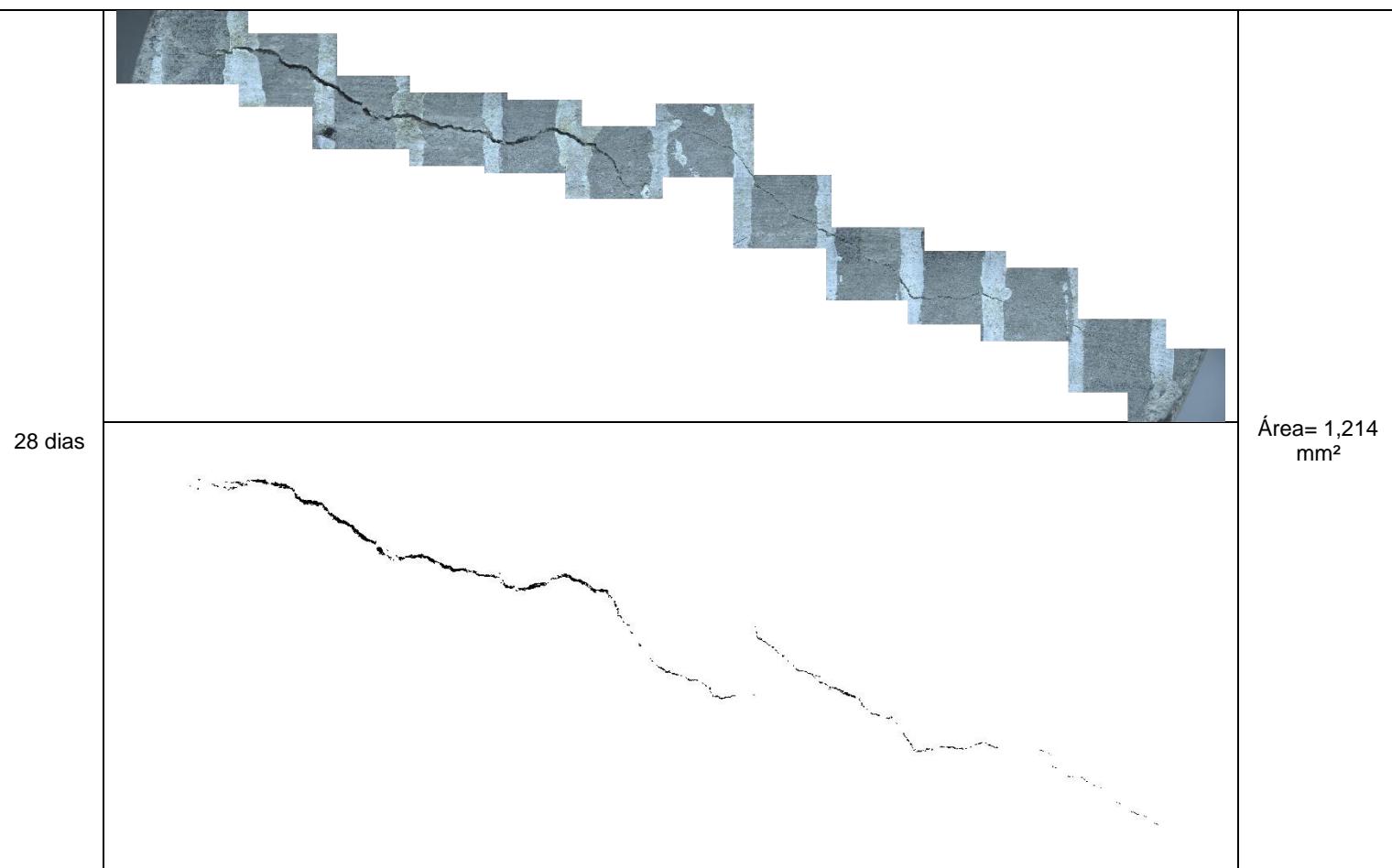
Tabela 16 – Análise de imagem de cicatrização das amostras LC3-0,6

(continua)

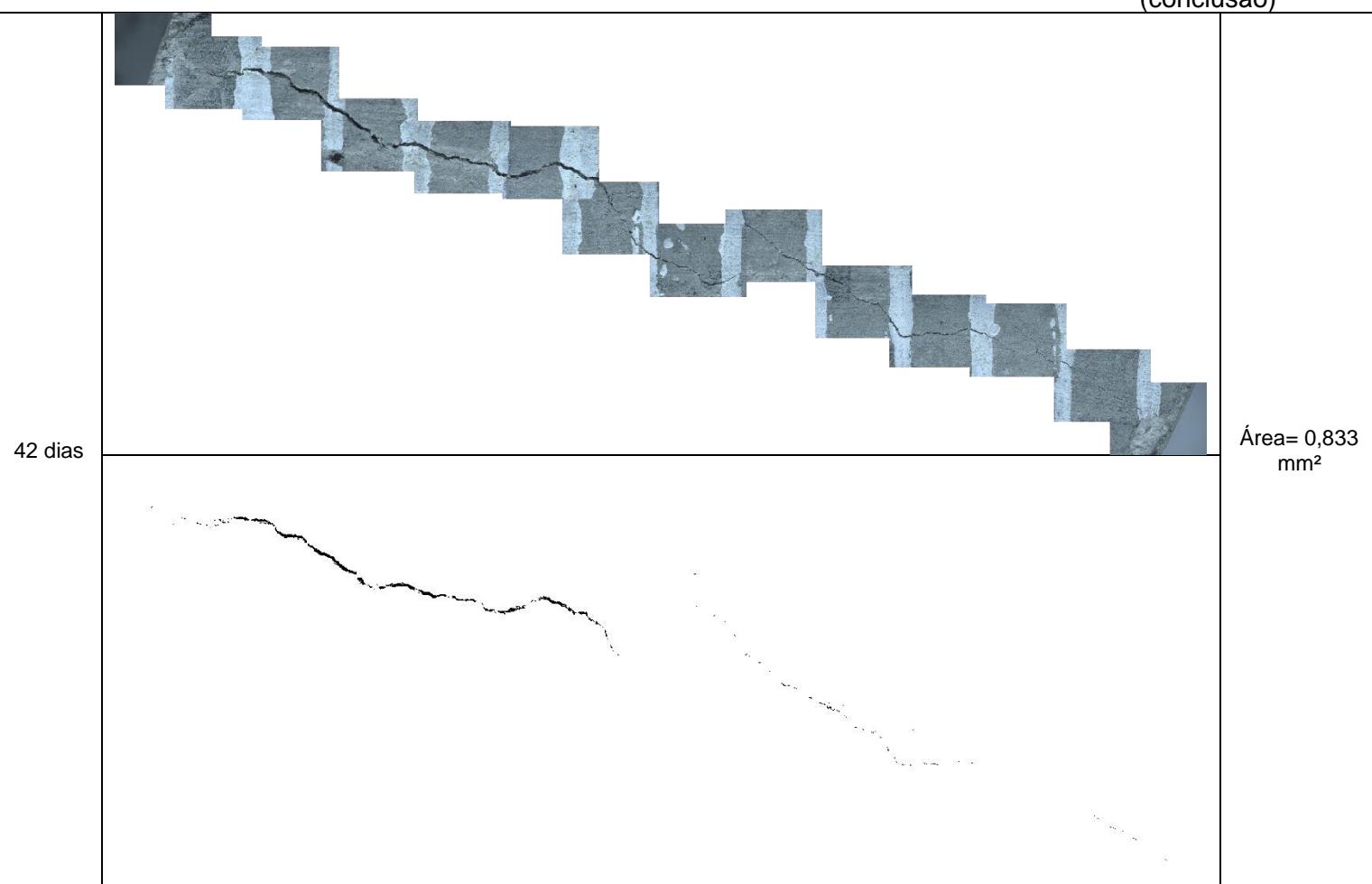
AMOSTRA LC3-0,6-1**AMOSTRA LC3-0,6-2**

(continua)





(conclusão)



Fonte: Elaborada pelo autor

De forma a facilitar o entendimento dos padrões observados e proporcionar melhor comparação dos resultados, foi elaborada a

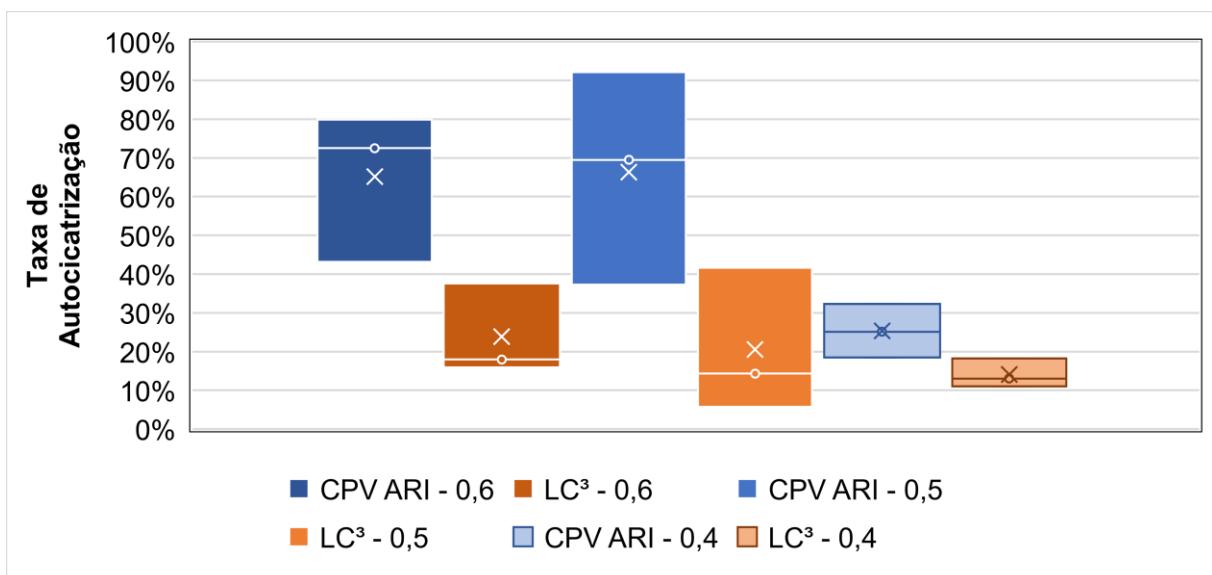
Tabela 17 contendo um resumo dos principais resultados obtidos através da análise de imagem por microscopia. Além disso, também foi confeccionada a Figura 52 e a Figura 53, ilustrando os resultados.

Tabela 17 – Resumo dos resultados obtidos com a análise de imagem

Cimento	Amostra	Relação a/c	Área 0 dias (mm²)	Área 28 dias (mm²)	Área 42 dias (mm²)	Espessura Máxima Fissura (mm)	Taxa de Autocicatrização 0 dias-28 dias (%)	Taxa de Autocicatrização 0-42 dias (%)	Taxa Média de Autocicatrização 0 dias-42 dias (%)
CPV	CPV 0,6-1	0,6	1,167	0,852	0,663	0,120	27,0%	43,1%	65,2%
	CPV 0,6-2		1,099	0,392	0,302	0,112	64,3%	72,5%	
	CPV 0,6-3		0,983	0,250	0,197	0,118	74,5%	79,9%	
LC3	LC3 0,6-1	0,6	0,739	0,703	0,606	0,084	4,8%	17,9%	23,8%
	LC3 0,6-2		2,751	2,325	2,314	0,238	15,5%	15,9%	
	LC3 0,6-3		1,335	1,214	0,833	0,118	9,0%	37,6%	
CPV	CPV 0,5-1	0,5	0,872	0,147	0,068	0,065	83,2%	92,2%	66,3%
	CPV 0,5-2		1,806	1,216	1,133	0,154	32,7%	37,3%	
	CPV 0,5-3		1,161	0,471	0,354	0,081	59,4%	69,5%	
LC3	LC3 0,5-1	0,5	2,583	2,262	2,213	0,145	12,4%	14,3%	20,6%
	LC3 0,5-2		0,902	0,873	0,851	0,099	3,2%	5,7%	
	LC3 0,5-3		2,147	1,532	1,252	0,154	28,7%	41,7%	
CPV	CPV 0,4-1	0,4	0,968	0,783	0,655	0,139	19,1%	32,3%	25,3%
	CPV 0,4-2		1,936	1,513	1,450	0,195	21,8%	25,1%	
	CPV 0,4-3		1,240	1,236	1,010	0,107	0,3%	18,5%	
LC3	LC3 0,4-1	0,4	2,448	2,427	2,178	0,155	0,9%	11,0%	14,1%
	LC3 0,4-2		2,864	2,584	2,491	0,197	9,8%	13,0%	
	LC3 0,4-3		4,562	3,767	3,730	0,275	17,4%	18,2%	

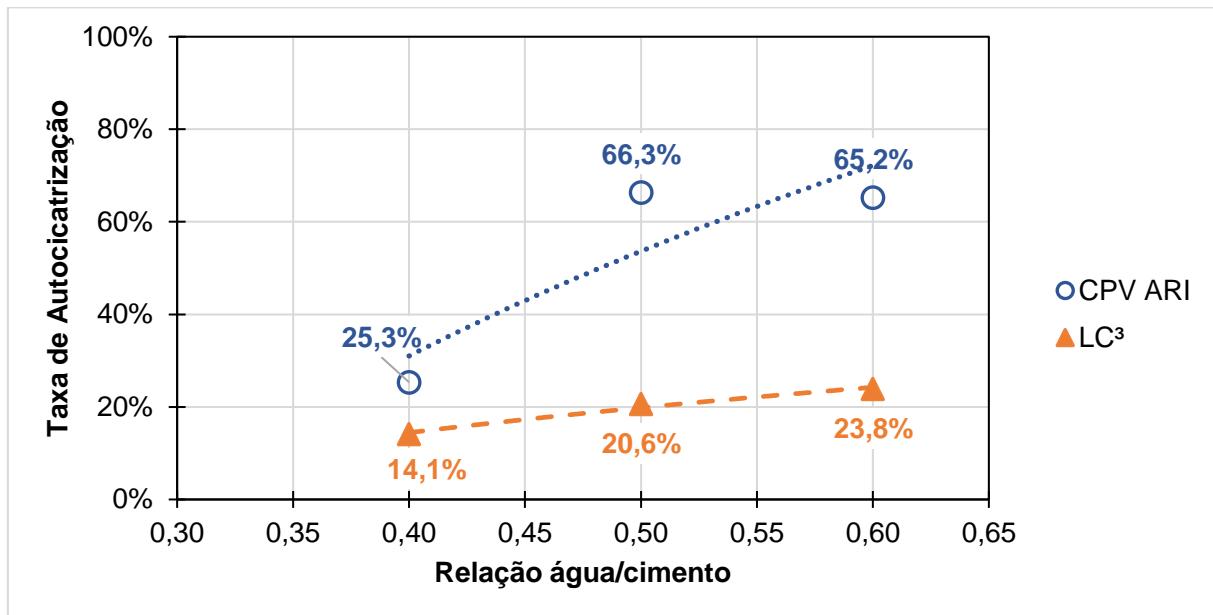
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 52 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos com a análise de imagem das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 53 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtido com a análise de imagem das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor

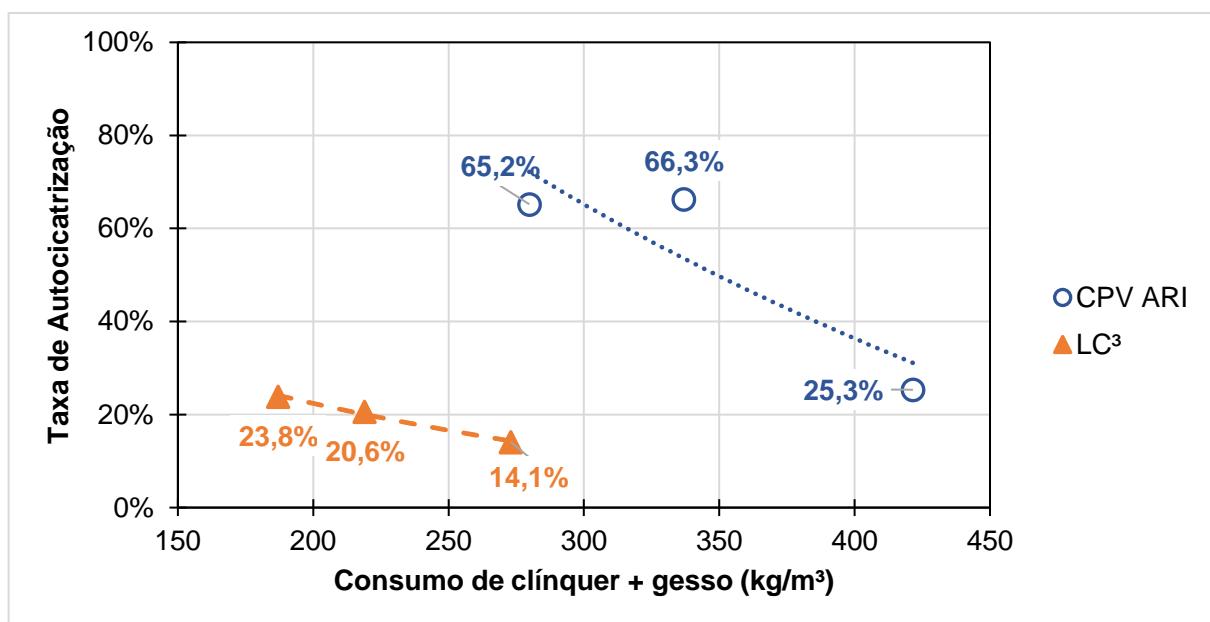
Conforme é possível observar através dos valores obtidos com o ensaio, em todas as relações a/c analisadas o cimento CPV ARI apresentou maiores taxas de autocicatrização, em média 32,8%. Cimentos ternários do tipo LC³ culminam na formação de produtos de hidratação mais estáveis, fato esse que impacta diretamente na percolação e precipitação desses produtos na superfície da fissura. Aliado a isso, em razão da reação entre o pó de calcário e a argila calcinada, além da sua própria reação pozolânica, a matriz cimentícia é mais densa, fato esse que impacta na capacidade de migração para a superfície dos produtos formados. Embora possua grande quantidade de adições em sua composição, uma vez que a argila calcinada reage com o pó de calcário para a formação de produtos de hidratação, a reação pozolânica tem menor impacto no desempenho.

Todos esses fenômenos, já amplamente estabelecidos nos diversos estudos relacionados ao cimento ternário do tipo LC³, podem justificar o comportamento observado de menor capacidade de autocicatrização na análise de imagem (AVET; SCRIVENER, 2018; MOREIRA, 2020; TANG *et al.*, 2019; FRÖHLICH, 2019; TOMCZAK; JAKUBOWSKI, 2018; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021). Esse padrão também foi observado no estudo desenvolvido por Gil (2022), com resultados na análise de microscópio inferiores quando comparados aos demais cimentos estudados no trabalho. Fissuras com espessuras semelhantes no estudo de Zhu *et al.* (2020) demonstram na análise de imagem que o cimento referência acarretou na

cicatrização completa da fissura, enquanto o cimento LC³ possibilitou a cicatrização parcial, sendo este o mesmo comportamento observado no presente trabalho. Ambos os estudos citados relacionam o comportamento observado com as hipóteses apontadas anteriormente.

Dentre os resultados também foi possível identificar que maiores relações a/c culminaram nas maiores taxas de autocicatrização na análise de imagem. Conforme já destacado anteriormente, a maior densificação da matriz dificulta a percolação dos produtos de hidratação, diminuindo a capacidade de precipitação na superfície da fissura (TOMCZAK; JAKUBOWSKI, 2018). Os traços de concreto contendo relações a/c menores dispuseram de maior consumo de cimento, e consequentemente de clínquer, fato esse que culmina na densificação da matriz cimentícia – conforme ilustrado na Figura 54.

Figura 54 – Relação entre taxa de autocicatrização, obtida por análise de imagem, e consumo de clínquer+gesso



Fonte: Elaborada pelo autor

É estabelecido, em diversas pesquisas relacionadas à autocicatrização, que fissuras mais espessas impactam negativamente na capacidade de autocicatrização das matrizes cimentícias (DANISH, MOSABERPANAH; SALIM, 2020). Esse padrão também foi evidenciado no trabalho realizado por Cappellessio (2018), em que a autora destaca que, embora relações a/c menores disponham de maior quantidade cimento anidro, o fenômeno de autocicatrização autógena é proporcional à espessura da fissura. O comportamento, destacado pelos autores, fomenta outro ponto de vista

na análise dos dados do presente trabalho. Considerando que o cimento LC³ retornou maiores resistências à compressão, quando comparado ao cimento CPV ARI, ao se induzir fissuras nas matrizes de maior resistência obteve-se espessuras maiores, o que pode ter impactado diretamente na capacidade inferior em termos de autocicatrização.

Por fim, também foi identificado que o processo de autocicatrização ocorreu principalmente até a idade de 28 dias, e posteriormente o avanço desse fenômeno foi menor. Esse comportamento é corroborado pelos resultados de resistência à compressão, em que a evolução de resistência entre as idades de 28 dias e 42 dias foi muito menor, indicando indiretamente a estabilização do processo de hidratação, principal influenciador da autocicatrização autógena (DANISH; MOSABER PANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.* 2018; GHOSH, 2009; HUANG *et al.*, 2016; PARK; CHOI, 2019).

4.2.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 18 é apresentado um resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

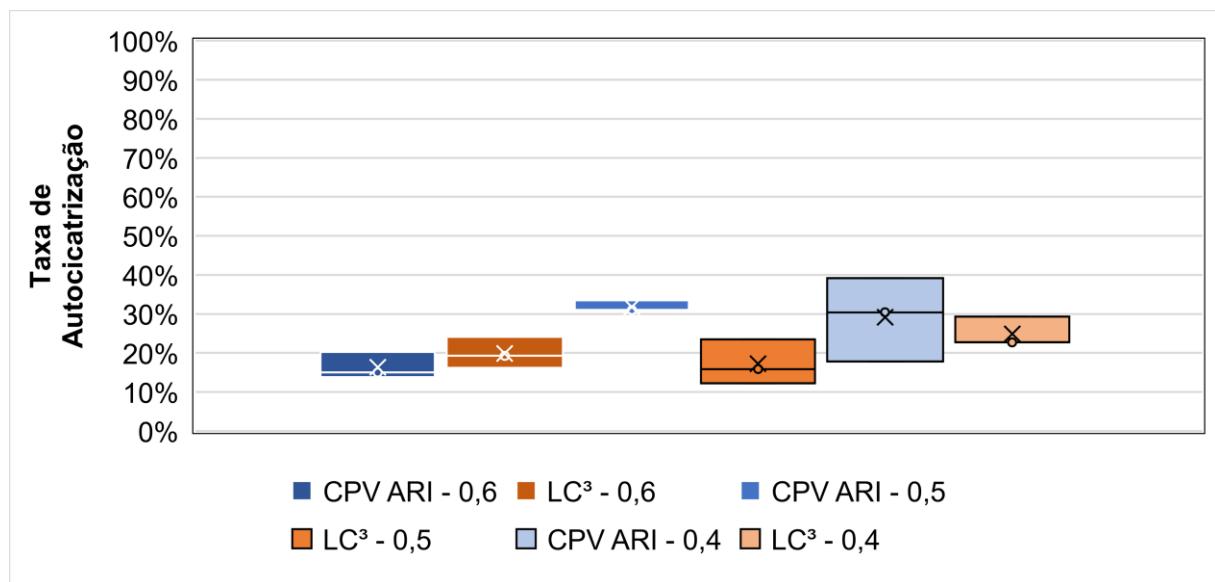
Tabela 18 – Resultados obtidos com a avaliação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Cimento	Amostra	Relação a/c	Taxa de Autocicatrização (%)	Desvio Padrão (%)	Coeficiente de Variação (%)	Taxa de Autocicatrização Média (%)
CPV	CPV 0,6-1	0,6	15,0%	3,4%	21,0%	16,3%
	CPV 0,6-2		13,8%			
	CPV 0,6-3		20,2%			
LC3	LC3 0,6-1	0,6	19,3%	4,0%	20,3%	19,8%
	LC3 0,6-2		16,2%			
	LC3 0,6-3		24,1%			
CPV	CPV 0,5-1	0,5	33,5%	1,5%	4,7%	31,8%
	CPV 0,5-2		31,0%			
	CPV 0,5-3		30,9%			
LC3	LC3 0,5-1	0,5	12,3%	5,7%	33,3%	17,2%
	LC3 0,5-2		15,9%			
	LC3 0,5-3		23,5%			
CPV	CPV 0,4-1	0,4	30,4%	10,7%	36,8%	29,1%
	CPV 0,4-2		17,8%			
	CPV 0,4-3		39,1%			
LC3	LC3 0,4-1	0,4	22,7%	3,8%	15,2%	24,9%
	LC3 0,4-2		29,3%			
	LC3 0,4-3		22,7%			

Fonte: Elaborada pelo autor

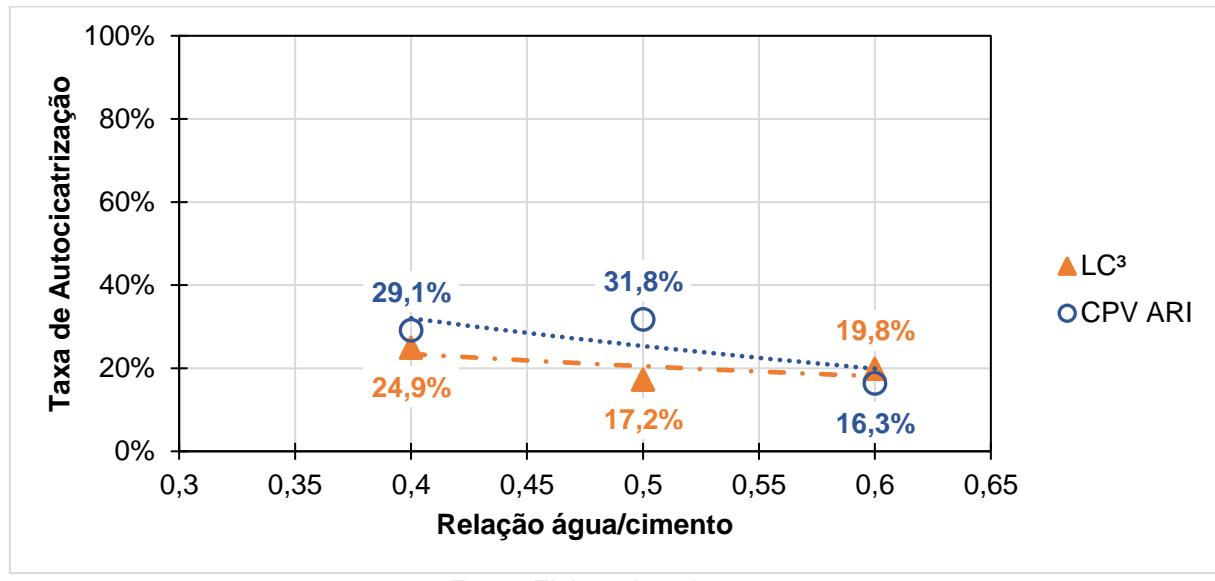
Além disso, desenvolveu-se a Figura 55 e a Figura 56 visando possibilitar uma visualização mais assertiva dos resultados possibilitando identificar seus respectivos padrões.

Figura 55 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos com o ensaio de velocidade de propagação ultrassônica



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtido com o ensaio de velocidade de propagação ultrassônica em função da relação a/c



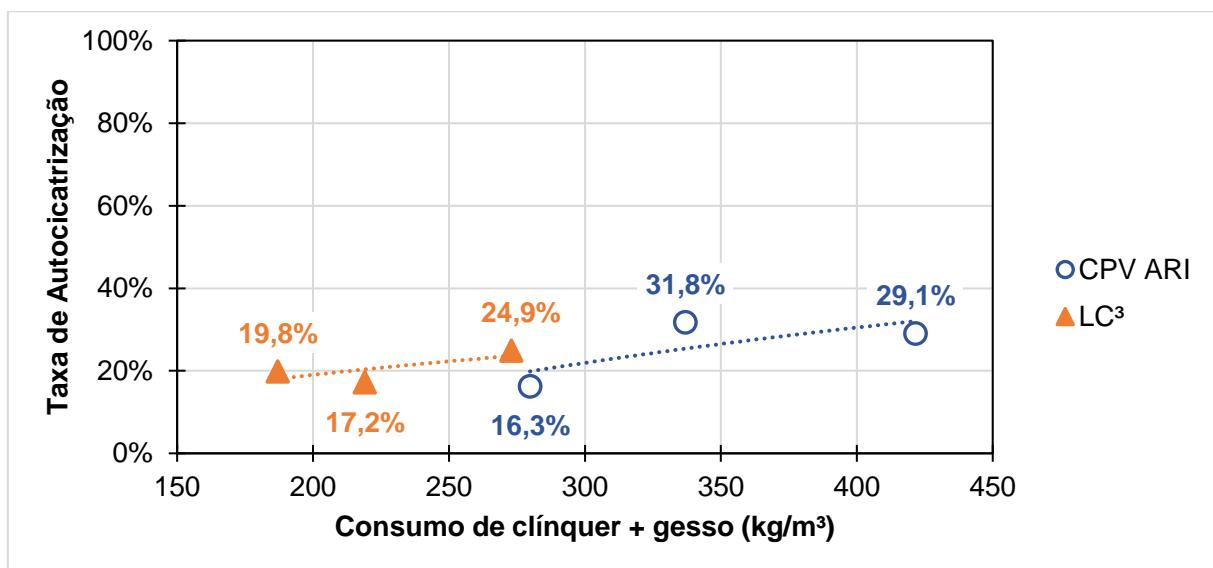
Fonte: Elaborada pelo autor

Com base nos resultados é possível visualizar através das curvas de tendência que, conforme ocorre o aumento da relação a/c, e consequentemente redução do consumo de cimento, menor é a taxa de autocicatrização média das amostras. Tal comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que é consolidado na

literatura que maiores consumos de cimento favorecem o fenômeno autógeno de autocicatrização em função da hidratação contínua propiciado pelas partículas de cimento anidro (DANISH; MOSABER PANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.* 2018; GHOSH, 2009; HUANG *et al.*, 2016; PARK; CHOI, 2019).

Quando comparado ao cimento ternário do tipo LC³, o CPV ARI apresentou maiores taxas de autocicatrização nas relações a/c de 0,4 e 0,5 – superior na média de 4,2% e 14,2%, respectivamente, sendo que a relação a/c 0,6 dispôs de um comportamento inverso, superior em 3,5%, mas com valores muito próximos. Ao longo das reações de hidratação do cimento LC³ existem dois fenômenos principais: reação pozolânica da argila calcinada e reação entre o carbonato de cálcio moído e a argila calcinada. Em decorrência disso, o aporte de clínquer é menor quando comparado aos demais cimentos, fato esse que impacta diretamente na hidratação contínua do cimento, diminuindo a possibilidade de autocicatrização, sendo esse comportamento demonstrado na Figura 57 (AVET; SCRIVENER, 2018; TANG *et al.*, 2019; ZUNINO; MARTIRENA, SCRIVENER, 2021). Com base nisso, pode-se entender que experimentalmente o cimento ternário do tipo LC³ pode ter maior capacidade de autocicatrização em concretos com relação a/c maiores, uma vez que as reações complementares possuem menor efeito, facilitando o efeito de cicatrização.

Figura 57 – Relação entre a taxa de autocicatrização, obtida através do ensaio de velocidade de propagação ultrassônica, e o consumo de clínquer+gesso



Fonte: Elaborada pelo autor

Aliado a isso, entende-se que concretos com maiores resistências possuem comportamento mais frágil, fato esse que impacta diretamente na formação da fissura,

mesmo com o aparato empregado no estudo que ajuda a controlar. Os corpos de prova com relações a/c menores propiciaram a formação de fissuras mais espessas, especialmente na relação a/c 0,4, em função do comportamento frágil do concreto de resistências mais elevadas, conforme ocorreu com o cimento LC³. Esse fato também pode ter impactado negativamente no processo de cicatrização do cimento ternário do tipo LC³ (DANISH, MOSABER PANAH; SALIM, 2020).

Os estudos executados por Gil (2022) e Zhu *et al.* (2020) também identificaram em parte de seus resultados comportamentos superiores de autocicatrização nas análises da matriz cimentícia como um todo, não somente superficialmente na fissura. Esse fato, conforme mencionado anteriormente, provavelmente está atrelado aos produtos de hidratação mais estáveis que corroboram para a evolução da cicatrização na parte interna do concreto e dificultam a migração dos produtos para a superfície.

4.3 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA MATRIZ CICATRIZADA

Os resultados da Tabela 19 estão relacionados ao ensaio de penetração de água sob baixa pressão, utilizado para a análise de durabilidade da cicatrização.

Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de penetração de água sob baixa pressão

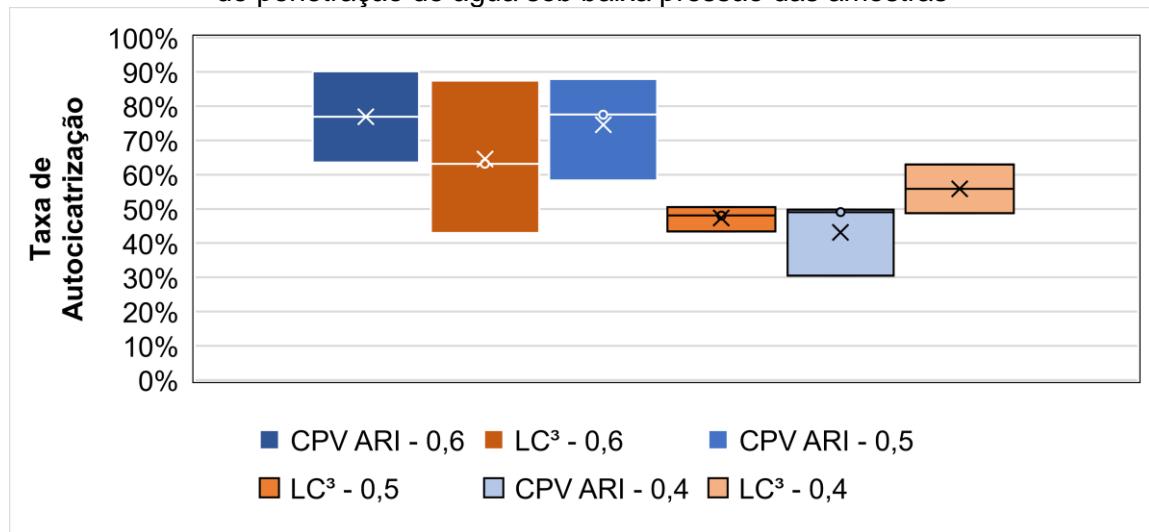
Cimento	Amostra	Relação a/c	Taxa de Cicatrização (%)	Desvio Padrão (%)	Coeficiente de Variação (%)	Taxa de Cicatrização Média (%)
CPV	CPV 0,6-1	0,6	63,5%	18,9%	24,6%	76,9%
	CPV 0,6-2		- *			
	CPV 0,6-3		90,2%			
LC3	LC3 0,6-1	0,6	87,5%	22,3%	34,6%	64,5%
	LC3 0,6-2		63,2%			
	LC3 0,6-3		42,9%			
CPV	CPV 0,5-1	0,5	87,9%	15,0%	20,2%	74,6%
	CPV 0,5-2		58,3%			
	CPV 0,5-3		77,5%			
LC3	LC3 0,5-1	0,5	48,0%	3,6%	7,6%	47,3%
	LC3 0,5-2		43,4%			
	LC3 0,5-3		50,5%			
CPV	CPV 0,4-1	0,4	49,1%	10,9%	25,3%	43,1%
	CPV 0,4-2		49,8%			
	CPV 0,4-3		30,5%			
LC3	LC3 0,4-1	0,4	- *	10,0%	18,0%	55,8%
	LC3 0,4-2		62,9%			
	LC3 0,4-3		48,7%			

* Resultados ausentes em função de quebra do corpo de prova no manuseio para execução do ensaio

Fonte: Elaborada pelo autor

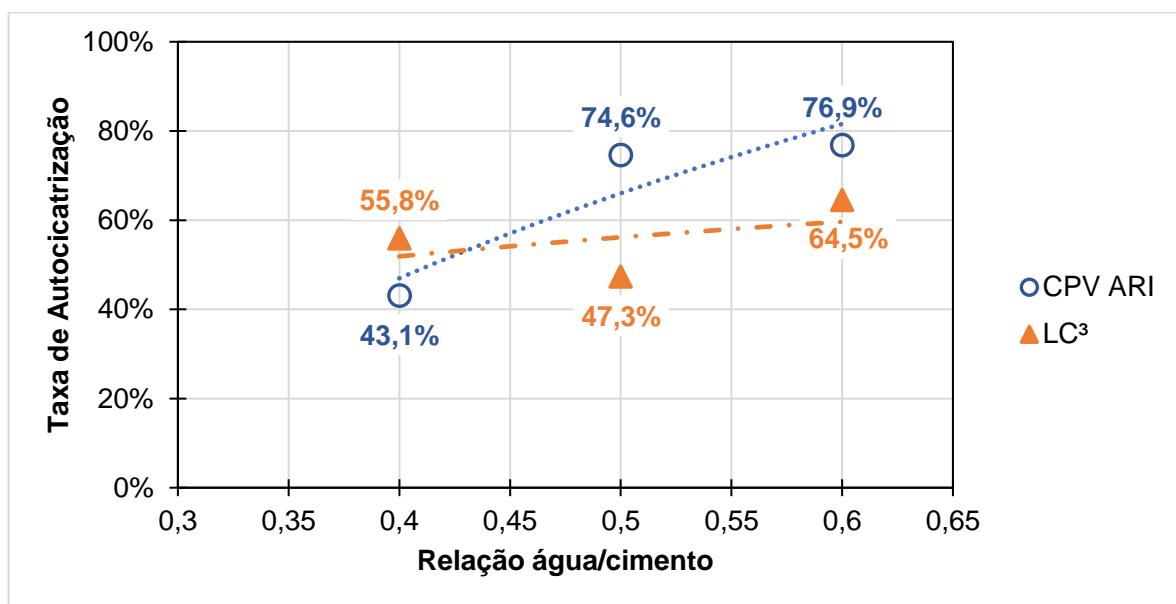
De forma a proporcionar melhor visualização para comparativo entre os comportamentos observados nos ensaios, também se confeccionou a Figura 58 e a Figura 59.

Figura 58 – Resultados da taxa de autocicatrização média obtidos pelas análises do ensaio de penetração de água sob baixa pressão das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 59 – Curvas da taxa de autocicatrização média obtidas pelas análises do ensaio de penetração de água sob baixa pressão das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor

Para análise dos resultados de penetração de água sob baixa pressão, a autocicatrização superficial, avaliada pela análise de imagem por microscopia, e a autocicatrização interna, analisada pelo ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, possuem grande importância para entender o comportamento

determinado no ensaio (COSTA, 2024). Ferrara *et al.* (2018) indicam que para avaliações mais assertivas acerca dos danos internos do corpo de prova é necessário o emprego de metodologias mais intrusivas, danos esse que possuem impacto no ensaio em questão e muitas vezes não são possíveis de identificar, causando variações que influenciam na análise dos resultados.

Com base nos valores obtidos com os ensaios foi possível visualizar uma tendência de melhores taxas de autocicatrização para o cimento CPV ARI, na ordem de 19,8%, evidenciado também através da curva de tendência. Esse comportamento também visualizado e evidenciado na análise de imagem por microscopia e ensaio de velocidade de propagação de ultrassom, em que sugere-se que os produtos de hidratação mais estáveis formados na hidratação do cimento LC³, matriz cimentícia mais densa em razão de produtos complementares formados na reação química desse cimento que dificultam a percolação dos produtos de hidratação e espessuras mais espessas produzidas nos concretos contendo esse ligante culminam no comportamento identificado. Quando analisados individualmente, os resultados indicam que o cimento ternário do tipo LC³ com relação a/c de 0,4 apresentou um padrão diferente às demais análises efetuadas, indicando um comportamento distinto no padrão estabelecido.

Foi determinada a permanência dos produtos formados no processo de autocicatrização das matrizes cimentícias (Tabela 20). Os resultados indicam que grande parte do material precipitado nas fissuras permaneceu após aplicação de água sob pressão, com a maioria dos valores acima de 90% de permanência. Em análise comparativa entre o cimento CPV ARI e o cimento LC³ observou-se que em média os dois mantiveram cerca de 92% do produto de cicatrização precipitado na fissura formada. Neste contexto, entende-se que ambos os cimentos analisados possuem capacidade semelhante quando submetidos à pressão da água sob pressão.

Tabela 20 – Material mantido na fissura após ensaio de penetração de água a baixa pressão

Cimento	Relação a/c	Teor de Produto de Cicatrização Mantido na Fissura (%)	Média Mantida por Cimento (%)
CPV	0,4	93,6%	92,0%
	0,5	99,3%	
	0,6	83,1%	
LC ³	0,4	87,2%	92,0%
	0,5	96,5%	
	0,6	92,3%	

Fonte: Elaborada pelo autor

Cappelesso *et al.* (2023b) destaca que estruturas como barragens, tanques de água, reservatório, piscinas e estruturas em águas profundas (instalações portuárias, túneis submersos e estações petrolíferas) estão constantemente sob ação de pressão de água, acarretando esforços que culminam na formação de fissuras. Os autores ainda destacam que entender o comportamento e a estabilidade das fissuras sob essa condição é de extrema importância para garantir a estabilidade da estrutura. Esse fato é reforçado no estudo de Wang *et al.* (2022), em que os autores desenvolveram um modelo numérico considerando a propagação da fissura através de carregamento estático e dinâmico, identificando que a água sob pressão contribui para a propagação da fissura. Tendo esse cenário em vista, entende-se que a permanência dos produtos de hidratação quando submetidos à pressão de água possui grande importância em termos de durabilidade da estrutura.

De forma a complementar os resultados obtidos, pode-se citar o estudo de Hooshmand *et al.* (2021) que avaliou o vazamento de água sob alta pressão em estruturas fissuradas, bem como o fenômeno de autocicatrização após contato com a água. Os autores identificaram que a água proveniente da infiltração foi capaz de gerar o fenômeno de autocicatrização com materiais resistentes, melhorando as condições de penetração de água, demonstrando o seu impacto positivo nesse aspecto.

4.4 SÍNTESE E ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

Visando apresentar uma síntese dos resultados obtidos com as diferentes formas de análise da autocicatrização, além de possibilitar melhor entendimento comparativo entre os resultados, apresenta-se a Tabela 21. Aliado a isso, também se destaca as hipóteses já discutidas e referenciadas anteriormente, de forma a possibilitar a concentração das informações em um só item do trabalho.

Tabela 21 – Tabela com síntese dos resultados obtidos com a análise de autocicatrização das matrizes cimentícias

Cimento	Relação a/c	Consumo de Cínquer + Gesso	Taxa de Autocicatracção Média – Penetração de Água sob Baixa Pressão	Taxa de Autocicatracção Média – Velocidade de Propagação de onda Ultrassônica	Taxa de Autocicatracção Média – Análise de Imagem
CPV ARI	0,6	280	76,9%	16,3%	65,2%
LC ³		187	64,5%	19,8%	23,8%
CPV ARI	0,5	337	74,6%	31,8%	66,3%
LC ³		219	47,3%	17,2%	20,6%
CPV ARI	0,4	422	43,1%	29,1%	25,3%
LC ³		273	55,8%	24,9%	14,1%

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim sendo, quando comparado os resultados é possível entender que o cimento CPV ARI apresentou majoritariamente resultados superiores em termos de autocicatrização quando comparados ao cimento LC³. Além disso, é possível perceber que a diferença entre os dois cimentos é maior na análise visual, que avalia somente a superfície da fissura, quando comparado à diferença entre os outros métodos de avaliação utilizados, que possibilitam analisar a matriz cimentícia em maior escala.

A hipótese atrelada a esse comportamento observado está relacionada ao processo de hidratação do cimento LC³. Os produtos formados por esse cimento durante o processo de hidratação são mais estáveis, fato esse que dificulta a sua movimentação pela matriz e deposição na superfície da fissura para visualização na análise de imagem. O cimento ternário do tipo LC dispõe de reações de hidratação complementares que podem ter contribuído para a autocicatrização interna do concreto, fato esse que pode explicar que nos ensaios destinados à avaliação da

autocicatrização em escala maior da matriz cimentícia, os resultados ficaram mais próximos ao cimento CPV ARI.

Em relação às diferentes relações a/c estudas, foi possível visualizar que mesmo com consumos de cimento maiores, os valores mais baixos desse parâmetro não impactaram necessariamente em taxas de autocicatrização maiores, conforme esperado pela maior disponibilidade de cimento anidro para reações complementares. Isso provavelmente ocorreu por conta do processo de fissuração ser mais difícil de ser controlado para os concretos com esse parâmetro menor, que acarretam espessuras de fissuras maiores e, consequentemente, maior dificuldade de autocicatrização.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO

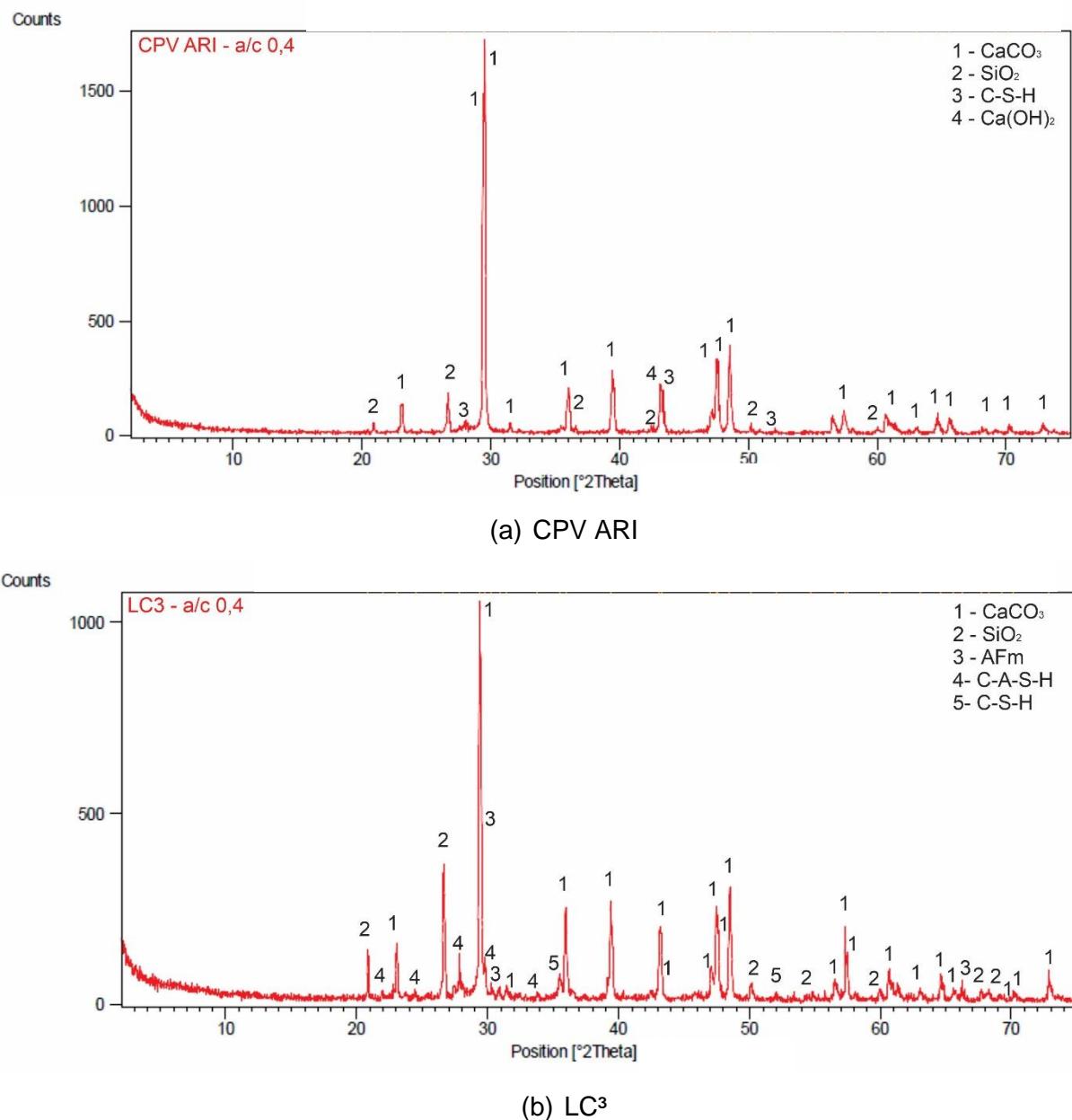
A seguir, na Figura 60 e na Figura 62 são apresentados os resultados obtidos com as análises de DRX dos produtos de autocicatrização formados nas fissuras. Os difratogramas são apresentados por relação a/c possibilitando melhor comparação entre o cimento CPV ARI e o cimento ternário do tipo LC³. De forma a facilitar o entendimento das legendas confeccionadas para os difratogramas, apresenta-se a Quadro 13 com um compilado das principais informações dos compostos determinados.

Quadro 13 – Compilado da nomenclatura das fases cristalinas identificadas através do ensaio de DRX

Nomenclatura Utilizada no Difratograma	Nome do Composto
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
SiO ₂	Dióxido de silício/Sílica
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C-A-S-H	Sílico aluminato de cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 60 – Difratograma de raios-x dos produtos de autocicatrização formados nos traços com a/c de 0,4



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a relação a/c 0,4 foi identificado no concreto autocicatrizado contendo o cimento CPV ARI a seguintes fases cristalinas: CaCO_3 , SiO_2 , C-S-H e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Levando em consideração que o presente estudo avalia o comportamento autogênico de autocicatrização, sendo a hidratação contínua mais impactante nesse fenômeno, a formação do C-S-H era esperada, uma vez que é um dos principais componentes formados durante o processo de hidratação do cimento. Neste mesmo contexto foi observado a formação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, também formado durante a reação química do cimento e, levando em consideração que o cimento CPV ARI dispõe de baixas

quantidades de adições em sua composição que poderiam reagir com esse composto, a sua presença é esperada e, em condições propícias, a sua carbonatação pode aumentar a taxa de cicatrização (DE BELIE *et al.* 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

Conforme destacado anteriormente, um elemento bastante comum e de extrema importância para o mecanismo autogênico de autocicatrização é o CaCO₃, sendo que nesse estudo sua presença foi confirmada pelos ensaios de DRX. De forma complementar, o surgimento desse material já era esperado, uma vez que visualmente já se percebia a formação de cristais brancos na superfície externa da fissura. Em algumas amostras compostas com CPV ARI, foram observadas precipitações de cristais na superfície externa da fissura, similares a stalactites, conforme ilustra a Figura 61. Estas formações podem ser a lixiviação e carbonatação do Ca(OH)₂.

Figura 61 – Formação de produto de autocicatrização de coloração banca e em forma de stalactite



Fonte: Elaborada pelo autor

Al-Tabbaa *et al.* (2019) destacam que quando detectados simultaneamente o C-S-H está presente no interior da fissura, enquanto o CaCO₃ está mais próximo da superfície. Aliado a isso, Huang *et al.* (2016) e Huang, Ye e Damidot (2013) informar que até 80% do material formado no processo de autocicatrização é composto pelo

carbonato de cálcio, corroborando para a justificar a sua presença na análise em questão.

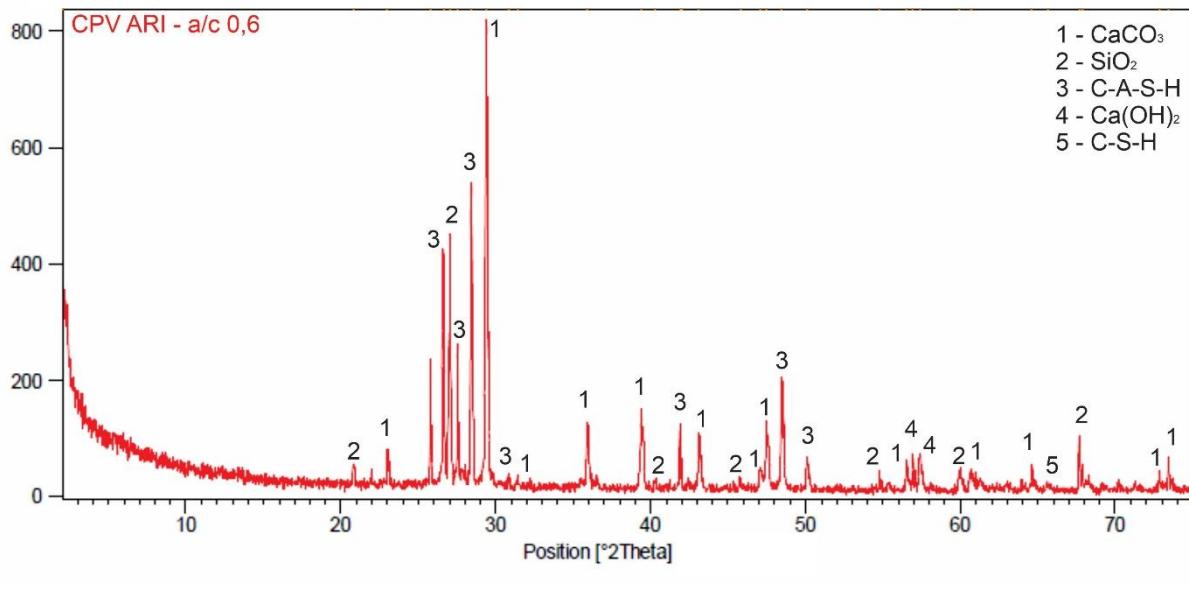
Por fim, também foi visualizado a presença de SiO_2 . Esse produto geralmente está associado a cimentos contendo materiais pozolânicos em sua composição. Assim sendo, a hipótese da sua presença pode estar associada ao procedimento de coleta do material que pode ter implicado na captação de partes da matriz cimentícia, que pode conter esse composto levando em consideração que é parte da composição química do cimento CPV ARI.

Na análise do concreto composto com cimento LC³, com relação a/c de 0,4, foi identificado no produto de cicatrização as seguintes fases cristalinas: CaCO_3 , SiO_2 , AFm, C-A-SH e C-S-H. Da mesma forma que para o cimento CPV ARI, a formação de CaCO_3 e C-S-H também aconteceu para o cimento ternário do tipo LC³ pelos mesmos motivos já citados anteriormente.

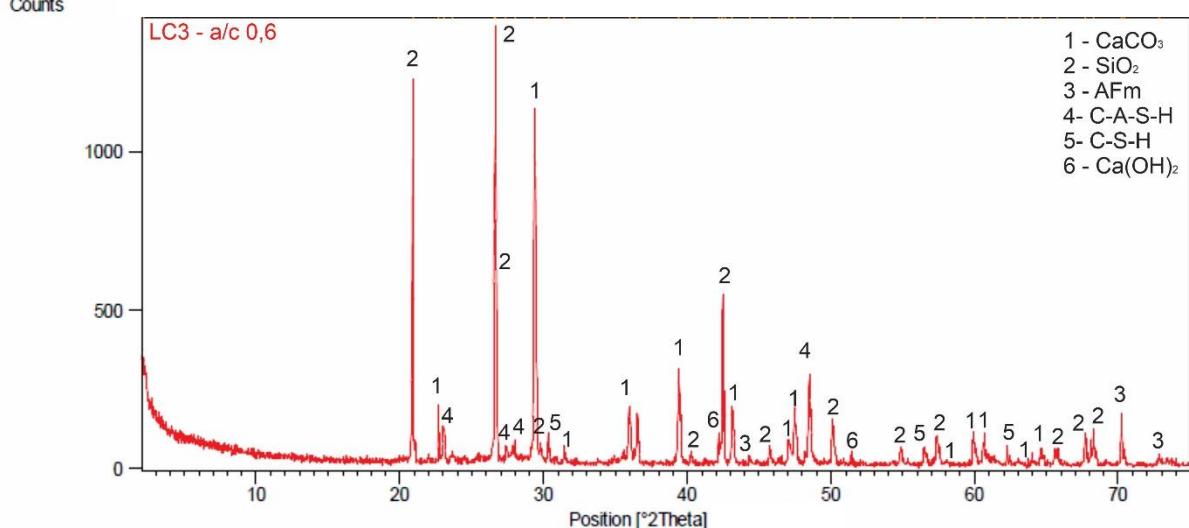
Levando em consideração as particularidades da reação química do LC³, também foi identificado a presença de AFm e C-A-S-H, fases que contém aluminatos em sua composição. A formação da AFm está associada a reação entre o carbonato de cálcio moído e a argila calcinada, que culmina na formação do monossulfoaluminato de cálcio hidratado. Neste mesmo cenário, em função da reação entre o hidróxido de cálcio e a argila calcinada ocorre a formação de fases adicionais de C-S-H, além do C-A-S-H. Esse fato também pode explicar a não determinação do hidróxido de cálcio, que provavelmente foi consumido para a formação dessas fases adicionais (ALUJAS *et al.*, 2015; FRÖHLICH, 2019; KRISHNAN; BISHNOI, 2018; MOREIRA, 2020).

Além disso, novamente foi verificado a presença de SiO_2 que, neste caso, pode ser justificado em função da argila calcinada utilizada, que possui grande quantidade desse material em sua composição e permite sua formação no processo de hidratação.

Figura 62 – Difratograma de raios-x dos produtos de autocicatrização formados nos traços com a/c de 0,6



(a) CPV ARI



(b) LC³

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos resultados com as relações a/c de 0,6, não foram observadas grandes variações em relação ao observado nas relações a/c de 0,4, o que era esperado uma vez que a principal mudança está atrelada ao consumo de cimento, fato esse que não impactaria em formações cristalinas diferentes. Como principal diferença pode-se citar a presença de C-A-S-H no produto de autocicatrização do concreto contendo CPV ARI, que geralmente está atrelado à cimentos pozolânicos,

mas Mehta e Monteiro (2014) destacam que em produtos de hidratação existe a presença de 15 a 20% de alumínio, podendo justificar esse comportamento. Além disso, no cimento LC³ foi observado a presença do hidróxido de cálcio, que pode ter ocorrido por não ser totalmente consumido nas reações de hidratação complementares.

Conforme já mencionado anteriormente, estudos acerca do potencial de autocicatrização do cimento LC³ ainda não possuem ampla disponibilidade na comunidade científica. Assim sendo, entende-se que o que foi observado nos resultados desse estudo está em concomitância com o que se espera do processo de hidratação do cimento em questão, principalmente quando comparado ao cimento CPV ARI.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo foi desenvolvido visando avaliar o fenômeno de autocicatrização de concretos contendo em sua composição o cimento ternário do tipo LC³, bem como seu impacto na durabilidade da matriz cimentícia. As conclusões foram organizadas de forma a responder os objetivos específicos previamente determinados. Tendo em vista as lacunas detectadas no desenvolvimento do trabalho, também são tecidas sugestões para futuros trabalhos.

5.1 CONCLUSÕES

- Em relação ao objetivo específico **a)** Acompanhar o processo de cicatrização em diferentes idades após a fissuração em microscópio ótico:

Identificou-se que até 28 dias de cura o fenômeno de autocicatrização foi mais relevante, em que se determinou taxas de autocicatrização menores entre os períodos de 28 dias e 42 dias. Tal comportamento provavelmente está atrelado ao fato de que as reações de hidratação foram mais intensas até a idade de 28 dias, podendo identificar tal comportamento indiretamente através dos resultados de resistência à compressão, pois houve pouco crescimento desse parâmetro após essa idade, o que pode indicar estabilização do processo de hidratação do cimento. Associado a isso, em idades mais avançadas a matriz cimentícia é mais densa, o que também pode dificultar a movimentação de produtos aptos a contribuir para autocicatrização até a superfície da fissura, impactando negativamente a continuidade do fenômeno;

Foi possível visualizar que nesse estudo o cimento CPV ARI dispôs de um fenômeno de autocicatrização mais satisfatório quando comparado ao cimento LC³ na análise de imagem. Isso provavelmente está atrelado ao fato de que os produtos formados na hidratação do cimento LC³ são mais estáveis, além de gerar matrizes cimentícias mais densas, suportado pelas maiores resistência determinadas no ensaio de resistência à compressão, fatos esses que dificultam a deposição do material de cicatrização na superfície das fissuras analisadas.

- Em relação ao objetivo específico **b)** Determinar a área e a espessura máxima das fissuras formadas nos corpos de prova:

Nesse âmbito, primeiramente foi identificado que relações a/c menores culminam na formação de fissuras mais espessas, mesmo utilizando o aparato

limitador, uma vez que concretos mais resistentes possuem comportamento mais frágil, dificultando controle no processo de formação da fissura. Levando em consideração esse mesmo contexto, o cimento LC³ apresentou as maiores áreas de fissura, justamente por dispor de uma resistência mais elevada quando comparado ao cimento CPV ARI, o tornando mais frágil durante a fissuração.

- Em relação ao objetivo específico **c)** Analisar a capacidade autocicatrizante das matrizes cimentícias através dos ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e penetração de água sob baixa pressão:

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica permitiu observar que o cimento CPV ARI dispôs de maiores taxas de autocicatrização quando comparado ao cimento LC³, comprovando o observado na análise de imagem. Tal cenário pode estar ligado ao fato de que o cimento ternário do tipo LC³ dispõe de um aporte menor de clínquer disponível para a hidratação contínua do cimento e que seus componentes estão envolvidos na reação entre o carbonato de cálcio moído e a argila calcinada e a reação pozolânica da argila calcinada;

Com os resultados obtidos no ensaio de penetração de água sob baixa pressão a mesma tendência de comportamento observada na análise de imagem e ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica também foi identificada. As hipóteses para a explicação desse comportamento são as mesmas levantadas nas demais análises.

- Em relação ao objetivo específico **d)** Entender a capacidade de manutenção dos produtos de autocicatrização após a ação de água sob baixa pressão:

Foi possível visualizar que grande parte desse material permaneceu na superfície da fissura, indicando sua contribuição para a maior capacidade de durabilidade da matriz cimentícia. Além disso, quando comparada a capacidade de permanência entre o cimento CPV ARI e o cimento LC³, foi possível visualizar que ambos possuem comportamento semelhante, reforçando que o cimento ternário do estudo também possui contribuição em termos de durabilidade.

- Em relação ao objetivo específico **e)** Caracterizar de forma mineralógica os produtos de cicatrização formados nas fissuras:

A partir das análises de DRX foi possível identificar que as principais formações cristalinas presentes no produto de autocicatrização do CPV ARI são o C-S-H, Ca(OH)₂ e o CaCO₃, conforme esperado. Essas mesmas formações foram observadas para o cimento ternário do tipo LC³, entretanto também foi identificado a

presença de C-A-S-H e AFm, que possuem aluminatos em sua composição, e são formadas a partir das reações complementares relacionadas à argila calcinada. O que foi determinado está em concordância com o que se espera das reações de hidratação de ambos os cimentos estudados.

- Em relação ao objetivo específico **f)** Verificar a influência da relação água/cimento e do consumo de cimento na capacidade de autocicatrização:

Em grande parte da literatura é apontado que relações a/c menores possuem impacto positivo em termos de autocicatrização, já que muitas vezes estão atrelados a consumos de cimento maiores e podem favorecer a hidratação contínua do cimento após formação das fissuras. Entretanto nesse estudo, além disso, foi identificado que esse parâmetro tem influência direta na formação da fissura, impactando de forma negativa a autocicatrização. Uma vez que se entende que relações a/c menores e consumos de cimento maiores são acompanhadas de resistências mecânicas mais elevadas, pode-se concluir que esse quesito possui extremo impacto na formação da fissura, bem como suas características geométricas que acarretam maiores áreas e espessuras de abertura, pelo comportamento mais frágil do concreto, influenciando na eficiência da autocicatrização.

- Em relação ao objetivo específico **g)** Avaliar a resistência à compressão do cimento ternário do tipo LC³ comparado ao cimento CPV ARI em diferentes idades:

Com base nos resultados de resistência à compressão foi identificado que o cimento LC³ possuiu um comportamento superior ao cimento CPV ARI. Esse fato está associado às reações de hidratação complementares acarretadas pela interação entre o carbonato de cálcio moído e a argila calcinada, além da reação pozolânica da argila calcinada, que culminam numa matriz cimentícia mais robusta e menos porosa, contribuindo para as características mecânicas do concreto. Neste sentido, o cimento LC³ dispõe de um benefício sustentável importante levando em consideração que sua emissão de CO₂ é menor quando comparada aos demais cimentos, além da possibilidade de redução do consumo de cimento para uma mesma resistência à compressão, intensificando a redução dessas emissões.

Tendo em vista todos os resultados obtidos entende-se que o cimento ternário tipo LC³ dispõe de capacidade autocicatrizante quando comparado a outros cimentos, entretanto de menor impacto. Tal fato provavelmente está atrelado às suas diferenças em termos de reações de hidratação que atenuam sua capacidade cicatrizante. Além

disso, foi verificado que o fechamento da fissura é estável e pode trazer contribuições para a matriz cimentícias em termos de durabilidade.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da realização desse estudo, bem como ao longo da análise de resultados foram observados alguns pontos a serem analisados nessa mesma temática e podem contribuir para obtenção maior certeza sobre o assunto:

- a) Avaliar outras argilas calcinadas, como por exemplo o resíduo de cerâmica vermelha, buscando entender se possuem capacidade semelhante às argilas com menor grau de calcinação;
- b) Estudar a autocicatrização do cimento ternário do tipo LC³ em fissuras com menores espessuras;
- c) Analisar o fechamento interno das fissuras através de métodos que possibilitem entender o comportamento da matriz cimentícia como um todo, como por exemplo a microtomografia;
- d) Desenvolver estudos que permitam a visualização do volume de cicatrização da fissura, e não somente a área através da sua superfície.
- e) Verificar teores ótimos de argila calcinada para propiciar melhor capacidade autocicatrizante;
- f) Monitorar a presença de hidróxido de cálcio durante a reação de hidratação do cimento LC³, correlacionando com o processo de autocicatrização;
- g) Utilizar cura interna para promover maior potencial de autocicatrização;

REFERÊNCIAS

- AITCIN, P.-C.; NEVILLE, A.; ACKER, P. Integrated View of Shrinkage Deformation. **Concrete International**, v. 19, n. 9, p. 35–41, 1 set. 1997.
- ALAZHARI, Mohamed *et al.* Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 160, p. 610-619, jan. 2018.
- AL-TABBAA, Abir *et al.* First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 208, p. 669-685, maio 2019.
- ALUJAS, Adrian *et al.* Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: influence of calcination temperature and impact of calcination products on opc hydration. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 108, p. 94-101, maio 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117**: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1586**: Standard Guide for Quality Assurance of Mortars. West Conshohocken, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1012**: The Development of ASTM Method C 1012 with Recommended Acceptance Limits for Sulfate Resistance of Hydraulic Cements. West Conshohocken, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1556**: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. West Conshohocken, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1876**: Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete, 2019.
- ANDRÉS, Leng M. Vizcaíno *et al.* Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements. **Advances In Cement Research**, [S.L.], v. 27, n. 9, p. 546-556, 1 out. 2015.
- ANGLANI, Giovanni *et al.* Durability of self-healing cementitious systems with encapsulated polyurethane evaluated with a new pre-standard test method. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 55, n. 5, p. 1-16, jun. 2022.
- ANTONI, M. *et al.* Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 1579-1589, dez. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889:** Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973:** Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:** Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:** Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

AVET, François; SCRIVENER, Karen. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 107, p. 124-135, maio 2018.

AVET, François; SOFIA, Lionel; SCRIVENER, Karen. Concrete Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Compared with Conventional Cements. **Advances In Civil Engineering Materials**, S.I., v. 8, n. 3, p. 1-12, 3 jun. 2019.

AZARSAA, Pejman; GUPTA, Rishi; BIPARVA, Alireza. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 99, p. 17-31, maio 2019.

BARBALHO, Enéas de Andrade; SILVA, Eugênia Fonseca da; RÊGO, João Henrique da Silva. Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-15, nov. 2019.

BARBHUIYA, Salim; NEPAL, Jaya; DAS, Bibhuti Bhushan. Properties, compatibility, environmental benefits and future directions of limestone calcined clay cement (LC3) concrete: a review. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 79, p. 107794, nov. 2023.

BARY, B.; SELLIER, A.. Coupled moisture—carbon dioxide—calcium transfer model for carbonation of concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 34, n. 10, p. 1859-1872, out. 2004.

BEAUDOIN, James; ODLER, Ivan. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. In: HEWLETT, Peter C.; LISKA, Martin. **Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2019. p. 157-250.

BEKAS, D.G. et al. Self-healing materials: a review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 87, p. 92-119, fev. 2016.

BONIĆ, Zoran et al. Damage of Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations Caused by Environmental Effects. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 117, p. 411-418, 2015.

BULLARD, Jeffrey W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1208-1223, dez. 2011.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton et al. Bacteria-based self-healing concrete exposed to frost salt scaling. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 139, p. 105016, maio 2023a.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 2018. 295 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CAPPELLESSO, Vanessa et al. A review of the efficiency of self-healing concrete technologies for durable and sustainable concrete under realistic conditions. **International Materials Reviews**, [S.L.], v. 68, n. 5, p. 556-603, 18 jan. 2023b.

CHAURASIA, Leena et al. A novel approach of biominerilization for improving micro and macro-properties of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 195, p. 340-351, jan. 2019.

CHEMROUK, Mohamed. The Deteriorations of Reinforced Concrete and the Option of High Performances Reinforced Concrete. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 125, p. 713-724, 2015.

COSTA, Júlia da Rosa. **Análise comparativa de diferentes agentes de autocicatrização em concretos**. 2024. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

CUENCA, Estefania; POSTOLACHI, Valentin; FERRARA, Liberato. Cellulose nanofibers to improve the mechanical and durability performance of self-healing Ultra-High Performance Concretes exposed to aggressive waters. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 374, p. 130785, abr. 2023.

DAMIDOT, D. et al. Thermodynamics and cement science. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 7, p. 679-695, jul. 2011.

DANISH, Aamar; MOSABERPANAH, Mohammad Ali; SALIM, Muhammad Usama. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: a critical review on efficiency of implemented treatments. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 6883-6899, maio 2020.

DE BELIE, Nele et al. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, [S.L.], v. 5, n. 17, 16 maio 2018.

DIAS, Raquel Pedroso et al. Cimento LC³: emissões, inovações e capacidade de produção no brasil. **Revista Técnico-Científica**, n. 28, 2022.

DIN 1048 (Part 5) Testing concrete: testing of hardened concrete specimens prepared in mould. Deutsches Institut für Normung, Germany, 1991.

DONG, Biqin et al. Self-healing features in cementitious material with urea-formaldehyde/epoxy microcapsules. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 106, p. 608-617, mar. 2016.

DU, Wei et al. Influence of Electromagnetic Inductive Microcapsules on Self-Healing Ability of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Mortar. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 14, p. 3081, 18 jul. 2023.

DU, Wei et al. Study on the Influence of Thermoplastic Microcapsules on the Sulfate Resistance and Self-Healing Performance of Limestone Calcined Clay Cement Concrete. **Molecules**, [S.L.], v. 29, n. 20, p. 4797, 10 out. 2024.

DURGA, Chereddy; RUBEN, Nerella. Assessment of Various Self Healing Materials to Enhance the Durability of Concrete Structures. **Annales de Chimie - Science Des Matériaux**, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 75-79, 8 jul. 2019.

ESAKER, Mohamed et al. Self-healing of bio-cementitious mortar incubated within neutral and acidic soil. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 96-112, abr. 2021.

FAVIER, Aurélie R.; DUNANT, Cyrille F.; SCRIVENER, Karen L.. Alkali Silica Reaction Mitigating Properties of Ternary Blended Cement with Calcined Clay and Limestone. **Rilem Bookseries**, [S.L.], p. 577-577, 2015.

FERNANDEZ, Rodrigo; MARTIRENA, Fernando; SCRIVENER, Karen L.. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 113-122, jan. 2011.

FERRARA, Liberato *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**, [S.L.], v. 167, p. 115-142, abr. 2018.

FRÖHLICH, Jéssica. **Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC³: estudo dos produtos da hidratação**. 2019. 224 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

GARAY, Thaís Machado; BOROWSKI, João Vitor Bitencourt; SILVA, Deividi Maurente Gomes da; PETRY, Natália dos Santos; MASUERO, Angela Borges; MOLIN, Denise Carpêna Coinho dal. Self-healing evaluaon by opcal microscope: an approach to image acquision, processing and analysis. **Congresso Internacional Sobre Patologia e Reabilitação das Construções**, [S.L.], p. 1298-1306, 2021.

GHOSH, Swamp Kumar. **Self-healing materials: fundamentals, desing strategies and aplications**. Pune: WILEY-VCH, 2009. 291 p.

GIL, Leonardo Masiero. **ANÁLISE DO MECANISMO AUTOGÊNICO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS CONTENDO CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³**. 2022. 128 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

GRIFFITHS, Steve *et al.* Decarbonizing the cement and concrete industry: a systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 180, p. 113291, jul. 2023.

GUPTA, Souradeep. Comparison of improved autogenous and bio-based self-healing techniques in fiber-reinforced mortar: effect of bacteria incorporation strategy and fiber hybridization. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 45, p. 103607, jan. 2022.

HELENE, P. *et al.* Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 544-563, maio 2018.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia da Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HERNANDEZ, Jose Fernando Martirena; SCRIVENER, Karen. Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba. In: CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE, 1., 2015, Dordrecht. **RILEM Bookseries**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 323-329.

HOOSHMAND, Ahmad *et al.* Investigation of leakage and self-healing of direct tension cracks under sustained loading and high-water pressure. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 267, p. 120879, jan. 2021.

HOOTON, R. Doug; BICKLEY, John A.. Design for durability: the key to improving concrete sustainability. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 67, p. 422-430, set. 2014.

HUANG, Guangtong *et al.* The self-healing performance and mechanism of limestone calcined clay composites coupling with crystalline admixture in chloride-rich environments. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 463, p. 140097, fev. 2025.

HUANG, Haoliang *et al.* Self-healing in cementitious materials: materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, [S.L.], v. 92, p. 499-511, fev. 2016.

HUANG, Haoliang; YE, Guang. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca²⁺ ions in the healing agent. **Journal Of Intelligent Material Systems And Structures**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 309-320, 27 fev. 2015.

HUANG, Haoliang; YE, Guang; DAMIDOT, Denis. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 52, p. 71-81, out. 2013.

HUYNH, Nguyen Ngoc Tri; IMAMOTO, Kei-Ichi; KIYOHARA, Chizuru. Biomineralization Analysis and Hydration Acceleration Effect in Self-healing Concrete using *Bacillus subtilis natto*. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 20, n. 10, p. 609-623, 1 out. 2022.

INDIAN STANDART. **IS 4032**: Method of chemical analysis of hydraulic cement. New Delhi, 1985.

J.V.B. Borowski, A. Schrank, M.H. Vainstein (2024) **Ilhoa: A Novel Automated Pipeline for Enhanced Crack Analysis**. Automation in Construction.

Kan, Li-Li *et al.* "Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composites (ECC)", **ACI Materials J.**, Vol.107, No.6, Nov-Dec 2010, pp.617-624.

KHAN, Mohammad S. H.; NGUYEN, Quang Dieu; CASTEL, Arnaud. Performance of limestone calcined clay blended cement-based concrete against carbonation. **Advances In Cement Research**, [S.L.], v. 32, n. 11, p. 481-491, nov. 2020.

KRISHNAN, Sreejith; BISHNOI, Shashank. Understanding the hydration of dolomite in cementitious systems with reactive aluminosilicates such as calcined clay. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 108, p. 116-128, jun. 2018.

- KUMM, Talita Campos. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento portland.** 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- LAHMANN, Daniel; EDVARDSEN, Carola; KESSLER, Sylvia. Autogenous self-healing of concrete: experimental design and test methods - a review. **Engineering Reports**, [S.L.], p. 1-33, 31 ago. 2022.
- LAHMANN, Daniel; EDVARDSEN, Carola; KESSLER, Sylvia. Autogenous self-healing of concrete: experimental design and test methods – A review. **Engineering Reports**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-33, 31 ago. 2022.
- LIN, Run-Sheng; HAN, Yi; WANG, Xiao-Yong. Macro–meso–micro experimental studies of calcined clay limestone cement (LC3) paste subjected to elevated temperature. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 116, p. 103871, fev. 2021.
- LOTHENBACH, Barbara *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 848-860, jun. 2008.
- MA, Hui; QIAN, Shunzhi; ZHANG, Zhigang. Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of Medium-Early-Strength Engineered Cementitious Composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 68, p. 92-101, out. 2014.
- MALACARNE, Camila Salvi. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC³ - cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário - a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul.** 2019. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- MARAGHECHI, Hamed *et al.* Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 1-17, 20 set. 2018.
- MARQUES, Henrique Fernandes *et al.* Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 21912-21930, 2020.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MILLER, Sabbie A. *et al.* Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 114, p. 115-124, dez. 2018.
- MILLER, Sabbie *et al.* Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 074029, 1 jul. 2016.

MOHAMMADI, Mojtaba *et al.* Self-Healing Potential and Phase Evolution Characterization of Ternary Cement Blends. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 1-16, 3 jun. 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. **Concrete Repair Mortars Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030)** Source: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/concrete-repair-mortar-market>. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/concrete-repair-mortar-market>. Acesso em: 26 mar. 2025.

MOREIRA, Christian. **Efeitos do teor de gipsita na microestrutura de pastas de cimento de LC³**. 2020. 184 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

NAMNOUM, Carol Youssef *et al.* Determination of the origin of the strength regain after self-healing of binary and ternary cementitious materials including slag and metakaolin. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 41, p. 102739, set. 2021.

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

NGUYEN, Quang Dieu; AFROZ, Sumaiya; CASTEL, Arnaud. Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. **Journal Of Marine Science And Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 301, 25 abr. 2020.

NGUYEN, Quang Dieu; KIM, Taehwan; CASTEL, Arnaud. Mitigation of alkali-silica reaction by limestone calcined clay cement (LC3). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 137, p. 137-151, nov. 2020.

ONGHERO, Lucas. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibra de vidro**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PACHECO, Fernanda. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocatrização do concreto**. 2020. 350 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

PARK, Byoungsun; CHOI, Young Cheol. Prediction of Self-Healing Potential of Cementitious Materials Incorporating Crystalline Admixture by Isothermal Calorimetry. **International Journal Of Concrete Structures And Materials Volume**, v. 36, n. 13, p. 1-14, 01 jul. 2019.

PEREZ, A. *et al.* Influence of the Manufacturing Process on the Performance of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement. In: CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE, 1., 2015, Dordrecht. **RILEM Bookseries**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 283-289.

PUERTA-FALLA. *et al.* The influence of metakaolin on limestone reactivity in cementitious materials. In: CALCINED CLAYS FOR SUSTAINABLE CONCRETE, 1.,

2015, Dordrecht. **RILEM Bookseries**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 11-19.

QIAN, Chunxiang; ZHENG, Tianwen; RUI, Yafeng. Living concrete with self-healing function on cracks attributed to inclusion of microorganisms: theory, technology and engineering applications: a review. **Science China Technological Sciences**, [S.L.], p. 1-17, 18 ago. 2021.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland – estudo em pasta**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

RODRIGUEZ, Claudia; TOBON, Jorge I.. Influence of calcined clay/limestone, sulfate and clinker proportions on cement performance. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 251, p. 119050, ago. 2020.

SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M.; BOLIO, H. Sustainable cement production—present and future. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 7, p. 642-650, jul. 2011.

SCRIVENER, Karen *et al.* Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). **Green Materials**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 3-14, mar. 2019a.

SCRIVENER, Karen *et al.* More sustainable constructions using limestone calcined clayd cements (LC³). In: INTERNATIONAL ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 5., 2019, Coventry. **Proceedings of the international conference on sustainable construction materials and technologies**. Coventry: Coventry University, 2019b. p. 1-6.

SCRIVENER, Karen *et al.* Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). **Green Materials**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 3-14, 1 mar. 2019.

SHARMA, Meenakshi *et al.* Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 149, p. 106564, nov. 2021.

SIDIQ, Amir; GRAVINA, Rebecca; GIUSTOZZI, Filippo. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 205, p. 257-273, abr. 2019.

SILVA, Amanda Fernandes Pereira da *et al.* Patologias em estruturas de concreto armado: estudo de caso. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 363-374, 2021a.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E.A.B.. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 566-574, abr. 2012.

SNELLINGS, Ruben. Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials. **Rilem Technical Letters**, [S.L.], v. 1, p. 50-55, 16 ago. 2016.

SNOECK, Didier. **Self-Healing and Microstructure of Cementitious Materials with Microfibres and Superabsorbent Polymers**. 2015. 364 f. Tese (Doutorado) - Ghent University, Gante, 2015.

SOUZA, Diego J. de; SANCHEZ, Leandro F.M.. Understanding the efficiency of autogenous and autonomous self-healing of conventional concrete mixtures through mechanical and microscopical analysis. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 172, p. 107219, out. 2023.

SUPRIYA *et al.* Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 417, p. 137466, set. 2023.

SWIFT, Taylor; ANTONOFF, Jack. **You're On Your Own, Kid**. In: SWIFT, Taylor. *Midnights*. Nova Iorque: Republic Records, 2022. 1 CD. Faixa 5.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Concretos com cimentos brasileiros de escório e alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 2013. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

TANG, Jin *et al.* Synergistic effect of metakaolin and limestone on the hydration properties of Portland cement. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 223, p. 177-184, out. 2019.

TOMCZAK, Kamil; JAKUBOWSKI, Jacek. The effects of age, cement content, and healing time on the self-healing ability of high-strength concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 187, p. 149-159, out. 2018.

TSANGOURI, Eleni *et al.* Reservoir-Vascular Tubes Network for Self-Healing Concrete: performance analysis by acoustic emission, digital image correlation and ultrasound velocity. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 12, n. 10, p. 4821, 10 maio 2022.

VAN BREUGEL, K. Is there a market for self-healing cement-based materials. In: **Proceedings of the first international conference on self-healing materials**. 2007. p. 1-9.

VAN MULLEM, Tim *et al.* Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 203, p. 541-551, abr. 2019.

VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 27 maio 2013.

VAN WYLLICK, Aurélie *et al.* Conditions for CaCO₃ Biomineratization by Trichoderma Reesei with the Perspective of Developing Fungi-Mediated Self-Healing Concrete. **Global Challenges**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-8, 21 dez. 2023.

VANTADORI, Sabrina *et al.* Synergy assessment of hybrid reinforcements in concrete. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 147, p. 197-206, ago. 2018.

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

WANG, Lei *et al.* Self-healing behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) blended with limestone calcined clay cement (LC3). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 370, p. 130633, mar. 2023.

WANG, Xianfeng *et al.* Self-healing concrete incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: preparation and application. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 301, p. 124119, set. 2021.

WANG, Yan-Jie *et al.* Numerical investigation on crack propagation process of concrete gravity dams under static and dynamic loads with in-crack reservoir pressure. **Theoretical And Applied Fracture Mechanics**, [S.L.], v. 117, p. 103221, fev. 2022.

WEI, Wenzhu *et al.* Enhancing crack self-healing properties of low-carbon LC3 cement using microbial induced calcite precipitation technique. **Frontiers In Materials**, [S.L.], v. 11, p. 1-14, 15 nov. 2024.

WHITE, S. R. *et al.* Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, [S.L.], v. 409, n. 6822, p. 794-797, 15 fev. 2001.

XIAO, XI *et al.* Development of a functionally graded bacteria capsule for self-healing concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 136, p. 104863, fev. 2023.

ZHANG, Wei *et al.* Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 189, p. 107892, maio 2020.

ZHU, He *et al.* Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 259, p. 119805, out. 2020.

ZUNINO, Franco; MARTIRENA, Fernando; SCRIVNER, Karen. Limestone Calcined Clay Cements (LC3). **ACI Materials Journal**, [S.L.], v. 118, n. 3, p. 49-60, 1 maio 2021. American Concrete Institute.

RANGEL, Heitor Antonio Tschaen. **Avaliação da autocicatrização de diferentes concretos por meio do ensaio de migração de cloretos**. 2024. 56 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.

ANEXO A – RESULTADOS ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 22 – Resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão

Idade	Identificação Corpo de Prova	0,6		0,5		0,4	
		CPV ARI	LC ³	CPV ARI	LC ³	CPV ARI	LC ³
7 dias	CP 1	28,5	38,5	39,2	49,3	54,1	63,2
	CP 2	28,0	37,8	38,8	49,4	54,5	63,8
	CP3	28,1	38,3	39,1	49,4	54,4	63,5
28 dias	CP 1	34,1	47,5	47,3	60,6	62,5	75,5
	CP 2	33,9	48,2	47,4	59,6	63,4	74,9
	CP3	34,0	47,8	47,2	59,9	63,0	75,2
42 dias	CP 1	34,4	48,9	47,5	61,5	69,3	74,9
	CP 2	33,5	48,2	49,1	64,5	69,1	79,4
	CP3	34,2	48,7	48,4	63,0	69,2	77,2

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 23 – Análises relacionadas ao ensaio de resistência à compressão

Relação água/cimento	Cimento	Idade	Resistência à Compressão Média (MPa)	Resistência à Compressão Potencial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
0,6	CPV ARI	7 dias	28,2	28,5	0,25
		28 dias	34,0	34,1	0,10
		42 dias	33,8	34,4	0,49
	LC ³	7 dias	38,2	38,5	0,37
		28 dias	47,8	48,2	0,37
		42 dias	48,6	48,9	0,35
0,5	CPV ARI	7 dias	39,0	39,2	0,21
		28 dias	47,3	47,4	0,09
		42 dias	48,3	49,1	0,81
	LC ³	7 dias	49,4	49,4	0,06
		28 dias	60,1	60,6	0,52
		42 dias	63,0	64,5	1,48
0,4	CPV ARI	7 dias	54,3	54,5	0,23
		28 dias	63,0	63,4	0,48
		42 dias	69,2	69,3	0,10
	LC ³	7 dias	63,5	63,8	0,30
		28 dias	75,2	75,5	0,31
		42 dias	77,2	79,4	2,27

Fonte: Elaborada pelo autor

ANEXO B – QUANTIFICAÇÃO DA ÁREA DAS FISSURAS

Tabela 24 – Quantificação da área das fissuras com base nos dados obtidos com a análise de imagem por microscopia

Amostra	Relação água/cimento	0 dias				28 dias				42 dias			
		Área Imagem (mm ²)	Quant Pixels Total	Área Fissura (mm ²)	Quant Pixels Fissura	Área Imagem (mm ²)	Quant Pixels Total	Área Fissura (mm ²)	Quant Pixels Fissura	Área Imagem (mm ²)	Quant Pixels Total	Área Fissura (mm ²)	Quant Pixels Fissura
CPV 0,6-1	0,6	132,6	112710000,0	991682,0	1,167	132,2	112350000,0	724142,0	0,852	138,0	117330000,0	563948,0	0,663
CPV 0,6-2		129,5	110100000,0	934030,0	1,099	134,5	114330000,0	333204,0	0,392	151,5	128760000,0	256611,0	0,302
CPV 0,6-3		131,5	111780000,0	836024,0	0,983	105,3	89520000,0	212841,0	0,250	118,6	100860000,0	167712,0	0,197
LC3 0,6-1		156,8	133320000,0	628050,0	0,739	156,5	133020000,0	597901,0	0,703	154,9	131700000,0	515320,0	0,606
LC3 0,6-2		131,0	111330000,0	2338515,0	2,751	152,3	129480000,0	1976472,0	2,325	135,9	115560000,0	1966696,0	2,314
LC3 0,6-3		405,2	344490000,0	1134704,0	1,335	427,5	363390000,0	1032106,0	1,214	393,3	334380000,0	707786,0	0,833
CPV 0,5-1	0,5	117,7	100080000,0	741182,0	0,872	113,2	96210000,0	124662,0	0,147	107,8	91710000,0	57999,0	0,068
CPV 0,5-2		158,7	134940000,0	1535150,0	1,806	150,2	127710000,0	1033310,0	1,216	152,6	129720000,0	963029,0	1,133
CPV 0,5-3		146,1	124200000,0	987134,0	1,161	144,6	122910000,0	400309,0	0,471	159,1	135210000,0	301020,0	0,354
LC3 0,5-1		131,1	111450000,0	2195821,0	2,583	131,6	111900000,0	1922730,0	2,262	133,1	113130000,0	1881149,0	2,213
LC3 0,5-2		141,3	120120000,0	767133,0	0,902	148,4	126150000,0	742251,0	0,873	157,5	133920000,0	723108,0	0,851
LC3 0,5-3		145,5	123660000,0	1825314,0	2,147	139,7	118770000,0	1302234,0	1,532	133,3	113280000,0	1064466,0	1,252
CPV 0,4-1	0,4	116,3	98850000,0	823236,0	0,968	109,3	92940000,0	666033,0	0,783	118,5	100710000,0	556951,0	0,655
CPV 0,4-2		132,9	112950000,0	1645699,0	1,936	129,8	110340000,0	1286214,0	1,513	212,5	180630000,0	1232232,0	1,450
CPV 0,4-3		109,0	92700000,0	1050770,0	1,236	117,6	99930000,0	1053833,0	1,240	108,4	92190000,0	858923,0	1,010
LC3 0,4-1		110,0	93510000,0	2081316,0	2,448	127,2	108090000,0	2063523,0	2,427	121,1	102930000,0	1851550,0	2,178
LC3 0,4-2		120,2	102180000,0	2434510,0	2,864	93,4	79380000,0	2196644,0	2,584	105,1	89340000,0	2117483,0	2,491
LC3 0,4-3		128,7	109380000,0	3877832,0	4,562	115,1	97830000,0	3202340,0	3,767	122,3	103980000,0	3170628,0	3,730

Fonte: Elaborada pelo autor

ANEXO C – RESULTADOS DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Tabela 25 – Resultados obtidos com o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos corpos de prova fissurados

Cimento	Amostra	Relação água/cimento	0 dias						42 dias						Média	
			Leituras			Velocidade			Média	Leituras			Velocidade			
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	
CPV	CPV 0,6-1	0,6	87,1	78,3	76,6	1148,1	1277,1	1305,5	1243,6	70,7	58,6	74,1	1414,4	1706,5	1349,5	1490,1
	CPV 0,6-2		86,8	86,6	78,4	1152,1	1154,7	1275,5	1194,1	78,6	68,6	69,3	1272,3	1457,7	1443,0	1391,0
	CPV 0,6-3		103,6	87,8	88,1	965,3	1139,0	1135,1	1079,8	69,4	69,4	82	1440,9	1440,9	1219,5	1367,1
LC3	LC3 0,6-1	0,6	86,1	77,6	86,9	1161,4	1288,7	1150,7	1200,3	70,4	61,8	71,2	1420,5	1618,1	1404,5	1481,0
	LC3 0,6-2		85,4	86,8	93,6	1171,0	1152,1	1068,4	1130,5	72,8	71,8	77	1373,6	1392,8	1298,7	1355,0
	LC3 0,6-3		100,2	98,9	92,6	998,0	1011,1	1079,9	1029,7	74,2	73,6	81,2	1347,7	1358,7	1231,5	1312,6
CPV	CPV 0,5-1	0,5	101,6	85,5	74,3	984,3	1169,6	1345,9	1166,6	56,2	58,2	70,2	1779,4	1718,2	1424,5	1640,7
	CPV 0,5-2		76,8	86,2	98,5	1302,1	1160,1	1015,2	1159,1	70,2	67,2	58,2	1424,5	1488,1	1718,2	1543,6
	CPV 0,5-3		86,5	76,9	74,5	1156,1	1300,4	1342,3	1266,2	55,2	56,3	66	1811,6	1776,2	1515,2	1701,0
LC3	LC3 0,5-1	0,5	85,0	86,6	85,5	1176,5	1154,7	1169,6	1166,9	80,6	78,4	67,5	1240,7	1275,5	1481,5	1332,6
	LC3 0,5-2		74,0	74,9	74,8	1351,4	1335,1	1336,9	1341,1	59,8	59	67,4	1672,2	1694,9	1483,7	1616,9
	LC3 0,5-3		92,5	85,0	74,4	1081,1	1176,5	1344,1	1200,5	67	60,2	69,8	1492,5	1661,1	1432,7	1528,8
CPV	CPV 0,4-1	0,4	92,6	71,6	71,2	1079,9	1396,6	1404,5	1293,7	65	56,4	54	1538,5	1773,0	1851,9	1721,1
	CPV 0,4-2		84,6	73,7	73	1182,0	1356,9	1369,9	1302,9	66	56,7	66,6	1515,2	1763,7	1501,5	1593,4
	CPV 0,4-3		89	104,4	74,1	1123,6	957,9	1349,5	1143,7	56	66,1	62,3	1785,7	1512,9	1605,1	1634,6
LC3	LC3 0,4-1	0,4	115,2	198,2	190,6	868,1	504,5	524,7	632,4	89,4	177,2	141,2	1118,6	564,3	708,2	797,0
	LC3 0,4-2		131,2	105,1	97,6	762,2	951,5	1024,6	912,8	89,9	79,4	84,1	1112,3	1259,4	1189,1	1187,0
	LC3 0,4-3		100,6	97,3	86,9	994,0	1027,7	1150,7	1057,5	78,1	70,3	79,4	1280,4	1422,5	1259,4	1320,8

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 26 – Resultados obtidos com o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica dos corpos de prova íntegros

Cimento	Amostra	Relação água/cimento	0 dias						42 dias						Média	
			Leituras			Velocidade			Média	Leituras			Velocidade			
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	
CPV	CPV 0,6-1	0,6	59,5	70,9	84,9	1680,7	1410,4	1177,9	1423,0	51,2	61,8	57,6	1953,1	1618,1	1736,1	1769,1
	CPV 0,6-2		58,4	61,9	59,2	1712,3	1615,5	1689,2	1672,3	51,5	52,3	50,2	1941,7	1912,0	1992,0	1948,6
	CPV 0,6-3		66,6	63,6	61,9	1501,5	1572,3	1615,5	1563,1	49,8	53,6	51,6	2008,0	1865,7	1938,0	1937,2
LC3	LC3 0,6-1	0,6	59,8	61,4	59,4	1672,2	1628,7	1683,5	1661,5	50,4	52,8	50,3	1984,1	1893,9	1988,1	1955,4
	LC3 0,6-2		59,2	62,9	60,4	1689,2	1589,8	1655,6	1644,9	50,4	52,4	50,9	1984,1	1908,4	1964,6	1952,4
	LC3 0,6-3		81,4	61,6	60,5	1228,5	1623,4	1652,9	1501,6	59,6	60,2	58,4	1677,9	1661,1	1712,3	1683,8
CPV	CPV 0,5-1	0,5	57,8	61,6	58,2	1730,1	1623,4	1718,2	1690,6	49	52,1	50	2040,8	1919,4	2000,0	1986,7
	CPV 0,5-2		57,2	51,2	57,2	1748,3	1953,1	1748,3	1816,5	56,5	50,2	48,9	1769,9	1992,0	2045,0	1935,6
	CPV 0,5-3		56,8	58,6	57,9	1760,6	1706,5	1727,1	1731,4	49,7	52,3	55,8	2012,1	1912,0	1792,1	1905,4
LC3	LC3 0,5-1	0,5	57,6	52,2	58,2	1736,1	1915,7	1718,2	1790,0	48,9	50,3	48,4	2045,0	1988,1	2066,1	2033,1
	LC3 0,5-2		66,1	62,2	57,2	1512,9	1607,7	1748,3	1622,9	48,5	52,2	49,9	2061,9	1915,7	2004,0	1993,9
	LC3 0,5-3		57,7	61,2	50,1	1733,1	1634,0	1996,0	1787,7	48,2	50,5	48,5	2074,7	1980,2	2061,9	2038,9
CPV	CPV 0,4-1	0,4	57,0	51,4	50,0	1754,4	1945,5	2000,0	1900,0	48,8	50,2	47,3	2049,2	1992,0	2114,2	2051,8
	CPV 0,4-2		57,2	60,5	48,0	1748,3	1652,9	2083,3	1828,2	46,2	50,3	41,1	2164,5	1988,1	2433,1	2195,2
	CPV 0,4-3		57,1	49,8	48,9	1751,3	2008,0	2045,0	1934,8	47,2	48,4	46,9	2118,6	2066,1	2132,2	2105,7
LC3	LC3 0,4-1	0,4	56,9	51,4	57,2	1757,5	1945,5	1748,3	1817,1	49,2	49,8	47,6	2032,5	2008,0	2100,8	2047,1
	LC3 0,4-2		49,5	51,1	48,0	2020,2	1956,9	2083,3	2020,2	47,9	49,9	47,1	2087,7	2004,0	2123,1	2071,6
	LC3 0,4-3		49,4	51,1	57,2	2024,3	1956,9	1748,3	1909,8	48,3	48,9	47,2	2070,4	2045,0	2118,6	2078,0

Fonte: Elaborada pelo autor

ANEXO D – RESULTADOS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO

Tabela 27 – Resultados ensaio de penetração de água sob baixa pressão

Cimento	Amostra	Relação água/cimento	Espessura CP	0 dias						42 dias					
				Tempo (s)	Área da Fissura (mm²)	Área do Tubo (mm²)	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Coeficiente de Permeabilidade	Tempo (s)	Área da Fissura (mm²)	Área do Tubo (mm²)	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Coeficiente de Permeabilidade
CPV	CPV 0,6-1	0,6	31,0	130	1,16657	1075,21	250	50	0,0005953306	260	0,851845	1075,21	250	50	0,000217359
	CPV 0,6-2		32,0	-	1,098754	1075,21	250	50	-	-	0,391967	1075,21	250	50	-
	CPV 0,6-3		31,0	617	0,983461	1075,21	250	50	0,0001057457	1609	0,250376	1075,21	250	50	0,0000103235
LC3	LC3 0,6-1	0,6	31,0	101	0,738811	1075,21	250	50	0,0004852917	767	0,703345	1075,21	250	50	0,0000608364
	LC3 0,6-2		31,0	27	2,750932	1075,21	250	50	0,0067593784	62	2,325026	1075,21	250	50	0,0024878647
	LC3 0,6-3		31,0	27	1,334813	1075,21	250	50	0,0032797995	43	1,214121	1075,21	250	50	0,0018732004
CPV	CPV 0,5-1	0,5	30,0	262	0,871896	1075,21	250	50	0,0002136553	365	0,146647	1075,21	250	50	0,0000257946
	CPV 0,5-2		30,0	119	1,805877	1075,21	250	50	0,0009742974	192	1,215537	1075,21	250	50	0,0004064594
	CPV 0,5-3		32,0	82	1,161218	1075,21	250	50	0,0009697923	148	0,470906	1075,21	250	50	0,0002178972
LC3	LC3 0,5-1	0,5	32,0	127	2,58307	1075,21	250	50	0,0013928724	214	2,261811	1075,21	250	50	0,0007238048
	LC3 0,5-2		31,0	114	0,902422	1075,21	250	50	0,0005251648	195	0,87315	1075,21	250	50	0,0002970604
	LC3 0,5-3		30,0	34	2,147216	1075,21	250	50	0,0040545914	49	1,531893	1075,21	250	50	0,0020071625
CPV	CPV 0,4-1	0,4	31,0	68	0,96842	1075,21	250	50	0,0009448125	108	0,783488	1075,21	250	50	0,0004812817
	CPV 0,4-2		30,0	36	1,935922	1075,21	250	50	0,0034525147	56	1,513044	1075,21	250	50	0,0017346577
	CPV 0,4-3		30,0	23	1,23968	1075,21	250	50	0,0034604453	33	1,236077	1075,21	250	50	0,0024048163
LC3	LC3 0,4-1	0,4	30,0	15	2,448367	1075,21	250	50	0,0104793789	-	2,427432	1075,21	250	50	-
	LC3 0,4-2		31,0	23	2,863849	1075,21	250	50	0,0082606256	56	2,584031	1075,21	250	50	0,0030612614
	LC3 0,4-3		30,0	18	4,561717	1075,21	250	50	0,0162706938	29	3,767095	1075,21	250	50	0,0083398602

Fonte: Elaborada pelo autor

**ANEXO E – BASE DE DADOS UTILIZADA PARA INTERPRETAÇÃO DOS
DIFRATOGRAMAS**

Quadro 14 – Compilado da nomenclatura das fases cristalinas identificadas através do ensaio de DRX

Nomenclatura Utilizada no Difratograma	Nome do Composto	Número ICSD
CaCO ₃	Carbonato de cálcio	20179
SiO ₂	Dióxido de silício/Sílica	100341
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado	100074
C-A-S-H	Sílico aluminato de cálcio hidratado	654
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio	202220
AFm	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado	83437

Fonte: Elaborada pelo autor