

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LEONARDO MASIERO GIL

**ANÁLISE DO MECANISMO AUTOGÊNICO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM
ARGAMASSAS CONTENDO CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³**

São Leopoldo

2022

LEONARDO MASIERO GIL

**ANÁLISE DO MECANISMO AUTOGÊNICO DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM
ARGAMASSAS CONTENDO CIMENTOS TERNÁRIOS DO TIPO LC³**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof^a.Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2022

Aos meus pais e irmão que, muitas vezes, acreditaram mais em mim do que eu mesmo, e me deram força durante todo esse período.

AGRADECIMENTOS

Acredito que a realização desse trabalho só foi possível em razão da grande rede de apoio que eu dispus ao longo de todo período de execução. Estive rodeado de pessoas que me ajudaram a suportar toda a pressão que muitas das vezes eu que colocava em mim.

Assim sendo, gostaria de iniciar agradecendo meus pais, Maxemina e Raul, que sempre me proporcionaram as melhores oportunidades na vida e me tranquilizaram nos momentos de maior ansiedade, me ajudando, inclusive, no programa experimental do trabalho, fazendo argamassa, moldando corpos de prova, limpando fôrmas e cortando aço. Obrigado por sempre me incentivarem e compreenderem minha ausência e estresse.

Paralelamente, quero agradecer ao meu irmão Augusto e a minha cunhada Patricia, colegas de profissão, que em ocasiões difíceis me motivaram com os melhores conselhos e palavras como pessoas que já passaram por experiências parecidas, me acalmando e orientado.

À minha orientadora Prof.^a Dra. Marlova por ter me guiado e incentivado durante essa etapa tão importante da graduação, compartilhando conhecimentos e acreditando sempre que eu seria capaz de executar o trabalho.

Aos colegas de trabalho da Votorantim Cimentos, Mauricio, Ebersson, João, Amanda, Alberto, equipe DTM TEC, equipe de vendas IMO e equipe de vendas IND/INFRA. Vocês foram pessoas essenciais no meu desenvolvimento profissional, sendo exemplo de líderes na minha carreira e espelhos do profissional que busco ser um dia. Dentre esses colegas, em especial, gostaria de agradecer à Jadna e Eliziane que me ajudaram em diversos momentos da minha vida e sempre me cuidaram como mães, me incentivando e acreditando muito mais em mim do que eu mesmo.

Aos colegas do Laboratório de Materiais da Construção Civil, Leonardo Himmer, Igor Wiskow, André Stein e Bianca Cadore, do Laboratório de Microscopia e Sedimentologia, Monique Chiele, e do Laboratório de Metalurgia Física, Éder Fernandes, que sempre foram solícitos em me auxiliar em todos os ensaios realizados.

Também quero agradecer aos meus amigos, Nathália Bangel, Jéssica de Moraes, Nicole de Britto, Brenda Hencker, Isadora Müller, Rodrigo Ebling, Eduarda Foscarini, Igor Bernardes e Thaís de Paoli, que estão presentes em grande parte da

minha vida e sempre entenderam minha ausência, me ajudando a descontraír durante os momentos de grande incerteza da graduação.

Por fim, agradeço a empresa Votorantim Cimentos pela disponibilização de grande parte dos materiais empregados na pesquisa.

*“And I was catching my breath
Floors of a cabin creaking under my step
And I couldn't be sure
I had a feeling so peculiar
This pain wouldn't be for
Evermore”
(SWIFT, 2020)*

RESUMO

A construção civil é, notoriamente, um dos setores que mais gera impactos ambientais. Tal fato decorre, principalmente, da quantidade de resíduos gerados, extração de recursos naturais e emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂). Assim sendo, é notado um aumento no interesse de desenvolvimento de pesquisas acerca da elaboração de novos materiais que possibilitem a utilização de resíduos em sua composição, que disponham de maiores quantidades de outros componentes com menor pegada de CO₂ e permitam construir estruturas com maior durabilidade e, conseqüentemente, maior vida útil. Em concomitância com isso, a construção civil possui uma constante preocupação no desenvolvimento de estruturas cada vez mais duráveis, utilizando a menor quantidade de recursos possíveis. As estruturas são constantemente submetidas a ações físicas, químicas e biológicas que, em grande parte dos casos, culminam na formação de fissuras comprometendo seu comportamento mecânico e possibilitando a penetração de agentes agressivos, acarretando a perda de desempenho em função de outras patologias. Um fenômeno que pode contornar tal problema é a autocicatrização, que acontece de forma autônoma, quando a matriz cimentícia é preparada afim de possuir tais propriedades, e autógena, quando acontece de forma natural a partir dos compostos utilizados na mistura. Levando em consideração o que foi exposto, o objetivo do trabalho é avaliar o fenômeno de autocicatrização autógena de argamassas contendo o cimento ternário do tipo LC³. Assim sendo, foi realizado a comparação desse tipo de cimento com cimentos atualmente normatizados no Brasil, o CII F40 e o CII 32 RS. Além disso, também foram avaliadas diferentes formas de cura (submersa em água e através de ciclos de molhagem e secagem) visando entender seu impacto no processo de autocicatrização e, conseqüentemente, sua viabilidade. A metodologia contou com o ensaio de resistência à compressão dos diferentes cimentos ao longo das idades, análise visual das fissuras formadas através de microscopia e o ensaio de absorção de água por capilaridade no estado cicatrizado e não cicatrizado. O ensaio de resistência à compressão possibilitou visualizar que aos 28 dias o cimento ternário do tipo LC³ já dispunha de resistência no mesmo patamar do CII F 40, sendo esse comportamento mantido até os 63 dias. Através da análise visual foi possível identificar que a cicatrização das fissuras contendo cimento LC³ apresentou menor capacidade de autocicatrização, pois as espessuras de cicatrização observadas em

sua maioria foram menores em relação aos demais cimentos e, na maioria dos casos, também ocorreram de forma pontual. A cura através de ciclos de molhagem e secagem também pareceu ser menos efetiva do que a submersa em água na análise visual. Os resultados de absorção de água por capilaridade, de forma indireta, parecem indicar taxas mais elevadas de autocicatrização nas amostras produzidas com cimento LC³, quando comparadas aos demais cimentos. Através do mesmo ensaio também foi possível avaliar um comportamento satisfatório da autocicatrização de ambos os métodos de cura avaliados no trabalho.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dados de produção do cimento ao longo do tempo	20
Figura 2 – Emissões de gases de efeito estufa associados a produção do concreto	22
Figura 3 – Avanço do mecanismo de corrosão nas estruturas de concreto armado.	25
Figura 4 – Número de publicações acerca da autocicatrização ao longo dos anos ..	28
Figura 5 – Principais processos relacionados ao mecanismo autogênico da autocicatrização	34
Figura 6 – Principais componentes formados na cicatrização e influência da maior disponibilidade de íons Ca^{2+} na mineralogia dos produtos formados.....	36
Figura 7 – Representação do mecanismo de precipitação do CaCO_3 na autocicatrização	37
Figura 8 – Metodologia adotada por Cappellesso (2018) na fissuração do corpo de prova	41
Figura 9 – Metodologia utilizada para indução das fissuras utilizada por Silva <i>et al.</i> (2021b).....	43
Figura 10 – Processo de divisão das partes (a) e (b) e de fissuração (c) empregado por San Martin (2021)	44
Figura 11 – Ilustração dos corpos de prova utilizados no estudo.....	45
Figura 12 – Confinamento do corpo de prova utilizado por Van Mullem <i>et al.</i> (2020) para controle da espessura da fissura	46
Figura 13 – Comparativo entre emissões de CO_2 do cimento ternário $\text{LC}^3\text{-50}$ e os demais cimentos brasileiros	50
Figura 14 – Cinética da reação das fases do clínquer ao longo do tempo.....	54
Figura 15 – Calorimetria típica de um cimento LC^3 comparado com um cimento referência (OPC)	55
Figura 16 – Resultados de porosidade e absorção de composições binárias contendo argila calcinada	57
Figura 17 – Porosidade de composição de LC^3 composta por metaculim com diferente quantidade de calcinação em (a) 1 dia e (b) 7 dias.....	58
Figura 18 – Resultados de resistência à compressão de diferentes tipos de LC^3 comparados ao cimento referência	59
Figura 19 – Coeficiente de carbonatação para diferentes quantidades de CaO em mistura com $\text{LC}^3\text{-50}$, cimento Portland (CP) e cimento Portland Pozolânico (PPC)...	60

Figura 20 – Potencial mitigador da reação álcali-agregado do cimento LC ³	60
Figura 21 – Resultados de teor de cloretos do cimento LC ³	61
Figura 22 – Resultados de resistência à compressão do estudo executado por Antoni <i>et al.</i> (2012)	63
Figura 23 – Resistência à compressão do LC ³ -50 com diferentes quantidades de caulinita calcinada	65
Figura 24 – Impacto de diferentes teores de caulinita da argila calcinada no teor de cloretos presentes em matriz composta com LC ³ em (a) 6 meses e (b) 18 meses...65	
Figura 25 – Relação do cimento LC ³ e o cimento referência com diferentes teores de gipsita	68
Figura 26 – Fluxograma do programa experimental.....	70
Figura 27 – Histograma (a) e curva (b) de distribuição granulométrica dos cimentos e MCS empregados no trabalho.....	72
Figura 28 – Representação gráfica da composição granulométrica.....	74
Figura 29 – Representação da seção transversal do corpo de prova moldado com dimensões em milímetros.....	79
Figura 30 – Processo de fissuração dos corpos de prova.....	81
Figura 31 – Sistema de nomenclatura utilizada para facilitar o entendimento dos resultados.....	82
Figura 32 – Registro do ensaio de índice de consistência do: (a) T-LC ³ , (b) T-F40 e (c) T-CPIV	83
Figura 33 – Resultados do ensaio de resistência à compressão	84
Figura 34– Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-1	87
Figura 35 – Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-2	87
Figura 36 – Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-3	88
Figura 37 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-1	89
Figura 38 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-2	89
Figura 39 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-3	90
Figura 40 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-1	91
Figura 41 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-2	91
Figura 42 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-3	92
Figura 43 – Autocicatrização da amostra F40-MS-1	93
Figura 44 – Autocicatrização da amostra F40-MS-2	93
Figura 45 – Autocicatrização da amostra F40-MS-3	94

Figura 46 – Autocicatrização da amostra LC ³ -SUB-1.....	95
Figura 47 – Autocicatrização da amostra LC ³ -SUB-2.....	95
Figura 48 – Autocicatrização da amostra LC ³ -SUB-3.....	96
Figura 49 – Autocicatrização da amostra LC ³ -MS-1.....	97
Figura 50 – Autocicatrização da amostra LC ³ -MS-2.....	97
Figura 51 – Autocicatrização da amostra LC ³ -MS-3.....	98
Figura 52 – Formação de produtos de hidratação fora das fissuras induzidas nos corpos de prova (a) CPIV-MS-1, (b) F40-SUB-2 e (c) LC ³ -MS-2	98
Figura 53 – Absorção de água por capilaridade de todos os traços e tipos de cura avaliados após da lixiviação com ácido.....	102
Figura 54 – Absorção de água por capilaridade de todos os traços e tipos de cura avaliados antes da lixiviação com ácido.....	103
Figura 55 – Absorção de água por capilaridade do cimento LC ³ para os dois tipos de cura avaliados	104
Figura 56 – Absorção de água por capilaridade do cimento CPII F40 para os dois tipos de cura avaliados	104
Figura 57 – Absorção de água por capilaridade do cimento CPIV 32 RS para os dois tipos de cura avaliados.....	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Limite de abertura de fissuras conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)	27
Quadro 2 – Especificações de classe de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014)	27
Quadro 3 – Mecanismos que podem gerar a autocicatrização das estruturas.....	30
Quadro 4 – Revisão acerca dos diferentes agentes de autocicatrização	31
Quadro 5 – Técnicas empregadas no encapsulamento de agentes cicatrizantes	33
Quadro 6 – Fatores que podem influenciar na autocicatrização	38
Quadro 7 – Classificação de diferentes aspectos que impactam na autocicatrização	39
Quadro 8 - Levantamento de ensaios utilizados para a indução de fissuras de diferentes tipos de concreto	40
Quadro 9 – Revisão de diferentes métodos empregados para a avaliação da recuperação de propriedades depois da cicatrização	47
Quadro 10 – Compostos envolvidos na hidratação do cimento Portland	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de FRX dos MCS empregados na pesquisa.....	72
Tabela 2 – Resultados da caracterização física dos cimentos e MCS utilizados na pesquisa.....	73
Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo empregado no estudo	74
Tabela 4 – Resultados de massa unitária e massa específica do agregado utilizado no estudo	75
Tabela 5 – Traços unitários propostos para o estudo	77
Tabela 6 – Traços em massa empregados no estudo	77
Tabela 7 – Resultados do ensaio de índice de consistência.....	84
Tabela 8 – Resumo dos resultados observados da análise visual	99
Tabela 9 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade	106
Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento LC ³	120
Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento LC ³	120
Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento LC ³	120
Tabela 13 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento CPII F40	121
Tabela 14 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento CPII F40	121
Tabela 15 – Resultados de resistência à compressão aos 63 dias para o cimento CPII F40	121
Tabela 16 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento CPIV 32RS	122
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento CPIV 32RS	122
Tabela 18 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento CPIV 32RS	122
Tabela 19 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras após lixiviação com ácido	124

Tabela 20 – Resultados de absorção de água por capilaridade das amostras após lixiviação com ácido	125
Tabela 21 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras antes da lixiviação com ácido	126
Tabela 22 – Resultados de absorção de água por capilaridade das amostras antes da lixiviação com ácido	127

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFm	Aluminate ferrite mono
AFt	Aluminate ferrite tri
C ₂ S	Silicato dicálcico ou belita
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico ou alita
C ₄ AF	Ferroaluminato tricálcico
CH	Hidróxido de cálcio ou Portlandita
CPII F	Cimento Portland Composto – com fíler calcário
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	Hemicarboaluminato
LC ³	Limestone Calcined Clay Cement
Mc	Monocarboaluminato
MCS	Material Cimentício Suplementar
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Megapascal
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PIB	Produto Interno Bruto
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO.....	23
2.1.1 Formação de fissuras	24
2.1.2 Fundamentos da autocicatrização	28
2.1.2.1 Autocicatrização autônoma	31
2.1.2.2 Autocicatrização autógena	33
2.1.2.2.1 <i>Fatores impactantes no mecanismo autogênico</i>	38
2.1.3 Revisão de métodos utilizados para análise da autocicatrização	40
2.2 CIMENTO LC ³	48
2.2.1 Reações de hidratação	50
2.2.1.1 Cimento Portland.....	51
2.2.1.2 Cimento LC ³	54
2.2.1.2.1 <i>Reação entre o hidróxido de cálcio e a argila calcinada</i>	56
2.2.1.2.2 <i>Reação entre argila calcinada e o carbonato de cálcio moído</i>	57
2.2.2 Desempenho mecânico e durabilidade do cimento LC³	58
2.2.3 Fatores que impactam no desempenho do cimento LC³	62
2.2.3.1 Teor de clínquer na composição	62
2.2.3.2 Proporção entre argila calcinada e calcário.....	63
2.2.3.3 Teor de caulinita da argila calcinada	64
2.2.3.4 Finura dos elementos	66
2.2.3.5 Teor de gipsita.....	67
3 METODOLOGIA	69
3.1 MATERIAIS	70
3.1.1 Cimentos e materiais cimentícios suplementares	71
3.1.2 Agregado miúdo	74
3.1.3 Aditivo	75
3.1.4 Água	75

3.2 MÉTODOS	76
3.2.1 Correção da quantidade de carbonato de cálcio moído na composição do LC ³	76
3.2.2 Especificação dos traços	77
3.2.3 Produção das misturas de argamassa	78
3.2.4 Determinação do índice de consistência	78
3.2.5 Moldagem dos corpos de prova	78
3.2.6 Cura dos corpos de prova	79
3.2.7 Ensaio de resistência à compressão.....	80
3.2.8 Fissuração dos corpos de prova	80
3.2.9 Avaliação da autocicatrização	81
3.2.9.1 Absorção de água por capilaridade	81
3.2.9.2 Análise visual por microscopia	82
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	83
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	84
4.3 AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO.....	86
4.3.1 Análise visual por microscopia.....	86
4.3.2 Absorção de água por capilaridade.....	102
5 CONCLUSÃO	108
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIAS.....	111
APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	120
APÊNDICE B – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	123

1 INTRODUÇÃO

O avanço do desenvolvimento da construção civil está, geralmente, associado ao avanço econômico de um país, contribuindo significativamente para o incremento do Produto Interno Bruto (PIB). Embora traga benefícios econômicos, a construção civil é um dos setores que mais gera impactos ambientais. Tal fato decorre, principalmente, da quantidade de resíduos gerados, exploração de elevados volumes de recursos naturais não renováveis e emissão de gases poluentes, em especial o dióxido de carbono (CO₂). (MARQUES *et al.*, 2020; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA *et al.*, 2020). Marques *et al.* (2020) salientam que com a escassez dos recursos naturais, e o aumento com a preocupação ambiental, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas a fim de garantir sustentabilidade.

Seguindo na linha de materiais mais sustentáveis e com menores impactos ambientais, 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 ao clínquer.

O clínquer é o principal componente do cimento, sendo o responsável por conferir a capacidade ligante, e garantindo seu endurecimento. A produção do clínquer é realizada em fornos rotativos, que atingem temperaturas de 1450°C, sendo este processo responsável por gerar uma grande quantidade de CO₂. Este fato, associado a necessidade de extração de materiais naturais para a produção do cimento, o torna um material de construção civil de elevado impacto ambiental (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

Aliado a isso, a construção civil também possui uma constante preocupação no desenvolvimento de estruturas cada vez mais duráveis, utilizando a menor quantidade de recursos possíveis, garantindo maior vida útil e evitando geração de resíduos por demolição (HELENE; ANDRADE, 2010). Qian, Zheng e Rui (2021) e Vantadori *et al.* (2018) corroboram ao afirmar que o concreto possui um comportamento frágil, pois tem como uma de suas características a baixa resistência à tração. Por conta disso as estruturas de concreto geralmente contam com a incorporação de armaduras de aço, garantindo que irão resistir aos esforços a qual estão sendo submetidas (QUININO, 2015).

Mesmo com a incorporação de elementos que garantem sua estabilidade mecânica, ainda existem outros fatores que podem acarretar a degradação das estruturas de concreto. Bonić *et al.* (2015) e Chemrouk (2015) destacam que o concreto pode ser deteriorado por ações físicas (retração, ação de gelo e degelo e variações volumétricas em decorrência de oscilações térmicas), químicas (ataque por sulfato, corrosão da armadura e reações expansivas de agregados) e biológicas (ação de microrganismos). Como consequência disso, são formadas fissuras que, além de prejudicarem o desempenho mecânico da estrutura, também facilitam a penetração de agentes agressivos, intensificando o processo de deterioração (VAN MULLEM *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

Um fenômeno que pode contornar tal problema é a autocicatrização das fissuras formadas na matriz cimentícia. A autocicatrização é classificada como a capacidade que um material tem de se regenerar sem que ocorra nenhuma intervenção externa. O fenômeno pode acontecer de forma autônoma, quando a matriz cimentícia é preparada a fim de possuir tais propriedades, e autógena, quando acontece de forma natural a partir dos compostos utilizados na mistura (GHOSH, 2009; RILEM 221-SHC, 2013; VAN MULLEM *et al.*, 2020).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o fenômeno autógeno da autocicatrização em argamassas compostas pelo cimento ternário do tipo LC³.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

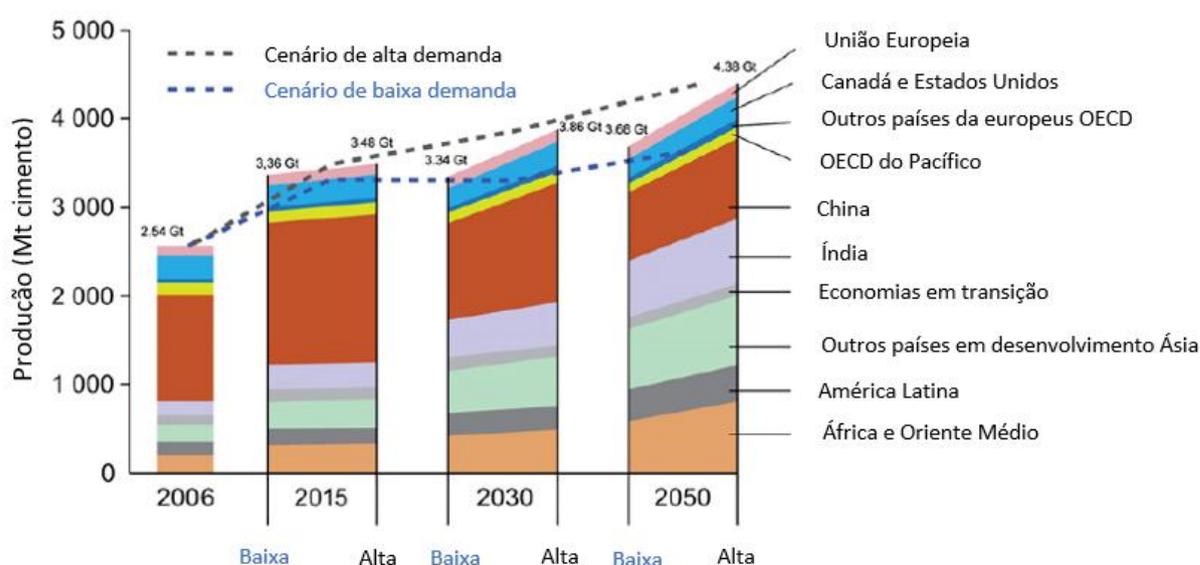
- a) Mensurar a espessura máxima de cicatrização dentro de uma fissura;
- b) Acompanhar o processo de cicatrização em diferentes idades pós fissuração;
- c) Analisar o impacto de diferentes condições de cura no fenômeno de autocicatrização;

- d) Comparar o processo de autocicatrização de cimentos atualmente normatizados com o cimento ternário do tipo LC³;
- e) Avaliar a resistência à compressão dos cimentos analisados em diferentes idades.

1.3 JUSTIFICATIVA

O cimento é o material mais empregado na construção civil, estando presente nas mais diversas tipologias de construção, principalmente nas estruturas de concreto. O constante desenvolvimento da sociedade, com conseqüente urbanização e modernização das cidades, acarreta um incremento no consumo deste material (MILLER *et al.*, 2018). Schneider *et al.* (2011) desenvolveram a Figura 1 a partir de dados da *International Energy Agency* para o avanço da produção de cimento. Miller *et al.* (2016) observaram um consumo mundial de cimento de 3,8 gigatoneladas em 2012, acima da previsão de cenário de alta demanda estimada por Schneider *et al.* (2011). Também em 2016 os valores estimados foram superados, registrando-se um consumo de 4,58 gigatoneladas, conforme Schneider (2019), que também reavaliou a projeção para 2050, prevendo valores na ordem de 4,6 gigatoneladas.

Figura 1 – Dados de produção do cimento ao longo do tempo



Fonte: Schneider *et al.* (2011, p. 643), texto traduzido para o português

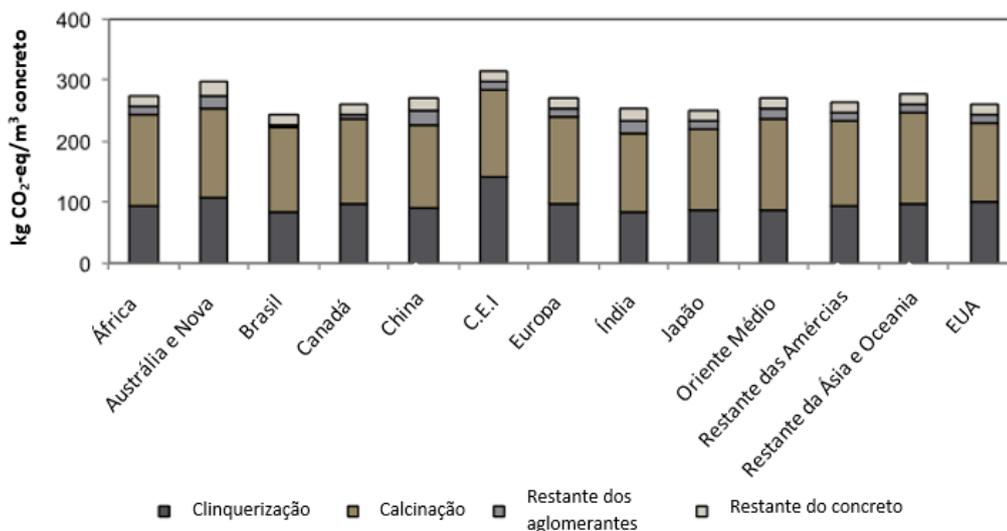
A preocupação acerca do crescimento do consumo de cimento está, justamente, relacionada ao impacto ambiental atrelado a sua produção. No estudo publicado por Schneider (2019) o autor informa que a indústria do cimento é a terceira maior consumidora de energia elétrica, e responsável por cerca de 6% a 7% das emissões de CO₂. Esse valor tão expressivo é decorrente da produção do clínquer, que é produzido em fornos com altas temperaturas e onde ocorre a descarbonatação do calcário, composto basicamente por CaCO₃ (MILLER *et al.*, 2018; SCHNEIDER *et al.*, 2011; SCHNEIDER, 2019).

Miller *et al.* (2016) citam que algumas ações para reduzir a emissão de CO₂ na indústria do cimento são: substituição da matéria prima do cimento, utilização de combustíveis alternativos, desenvolvimento de fornos mais eficientes e elaboração de captura e estocagem de carbono.

A utilização de cimentos que apresentam materiais suplementares em substituição parcial ao clínquer é destacada por Miller *et al.* (2018) como muito promissoras 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).

Uma vez que o concreto é o material mais empregado na confecção das estruturas, e o cimento é o seu principal componente, o composto também possui grande impacto ambiental (MILLER *et al.*, 2016). A Figura 2 indica que a maior parte de emissões de gases de efeito estufa do concreto são oriundos, justamente, da produção do cimento.

Figura 2 – Emissões de gases de efeito estufa associados a produção do concreto



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

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. 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.

Tendo em vista o contexto apresentado, esta pesquisa visa avaliar e entender como ocorre o processo de autocicatrização do cimento com composição ternária do tipo LC³. Tal tema possui relevância uma vez que associa um cimento com menor quantidade de emissão de CO₂ a um fenômeno que pode proporcionar maior durabilidade para as estruturas de concreto, reduzindo a necessidade de reparos e manutenção e prolongando a vida útil. Além disso, o cimento LC³ também é vantajoso pois vem sendo apresentado, por diferentes bibliografias, que possui um desempenho semelhante ou superior em relação aos demais cimentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO

O concreto é o material mais empregado pelo ser humano na construção de suas obras, mesmo não sendo tão resistente quanto o aço. Tal fato decorre, principalmente, da elevada resistência à ação da água, quando comparado com o aço e a madeira, da possibilidade de executar estruturas com grande variedade de formas e tamanhos e por ser o material mais econômico e rapidamente disponibilizado nas obras. Em função da ampla disponibilidade dos seus materiais constituintes, o concreto acaba possuindo essa vantagem econômica em relação aos demais materiais utilizados na execução das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Neville (2016) cita que o concreto era composto por somente três materiais: cimento, agregados e água, sendo que o cimento empregado, quase sempre, era o cimento Portland. O avanço do setor da construção civil desencadeou a necessidade de executar estruturas de concreto contendo elevado desempenho e características especiais para sua aplicação. Neste cenário, foram desenvolvidos novos materiais e novos tipos de concreto, bem como o domínio de métodos de dosagem (HELENE; ANDRADE, 2010).

Dentre as novas tecnologias empregadas na produção do concreto, destaca-se os aditivos químicos. Este é um material utilizado em pequena quantidade visando promover características específicas ao concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Além dos aditivos, também pode-se destacar o início do emprego de adições minerais, também chamadas de materiais cimentícios suplementares (MCS), que inicialmente foram utilizadas por motivos econômicos, uma vez que substituem parte do cimento e, em alguns casos, são resíduos de processos industriais. Entretanto, com o desenvolvimento de pesquisas e a crescente preocupação com a questão ambiental, os MCS ganharam grande popularidade em função dos diversos benefícios que promovem (NEVILLE, 2016).

Conforme citado anteriormente, existe uma grande preocupação acerca do desenvolvimento de estruturas com elevada durabilidade, sendo este um tema muito estudado pelo meio técnico (ZHANG *et al.*, 2020). Chemrouk (2015) classifica a durabilidade do concreto armado como sendo a capacidade do concreto e do aço de manterem suas propriedades, tanto físicas quanto mecânicas, atendendo requisitos

de segurança durante a vida útil de projeto especificada. As formas de degradação do concreto podem ser divididas em três grupos: físicas, biológicas e químicas. Grande parte destes mecanismos acarretam, tanto diretamente, quanto indiretamente, a formação de fissuras (BONIĆ *et al.*, 2015).

Tendo em vista o cenário apresentado acima, o item a seguir abordará diferentes formas com que as fissuras podem ser geradas.

2.1.1 Formação de fissuras

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, conseqüentemente, alta suscetibilidade à formação de 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 (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 degelo, 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 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 a 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 (Ca_2SO_4);

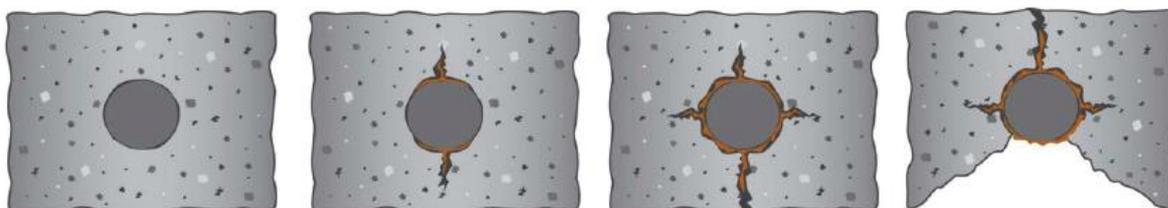
- Sulfato de sódio (Na_2SO_4);
- Sulfato de potássio (K_2SO_4);
- Sulfato de magnésio (MgOSO_4).

Chemrouk (2015) ainda salienta que os sulfatos reagem com o aluminato tricálcico (C3A) 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 fissuras.

Outra forma de degradação química do concreto é através da corrosão da armadura, desencadeada tanto por ataque de cloretos, quanto pela carbonatação. Silva *et al.* (2021a) destacam que as 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, conseqüentemente, na corrosão. Por outro lado, no processo de carbonatação o CO_2 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 fissuras e, em casos mais avançados, o deslocamento (HELENE, 1993; SILVA *et al.* 2021a). A Figura 3 ilustra o avanço da corrosão de armadura na estrutura.

Figura 3 – 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 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 fissuras (BONIC *et al.*, 2015).

Tendo em vista a diversidade de fatores que podem acarretar a formação de fissuras nas estruturas do concreto, apresenta-se o Quadro 1, que reproduz as informações da Tabela 13.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014). 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 mais agressivos.

Quadro 1– Limite de abertura de fissuras conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)

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 CAIII	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, 2014, p. 80)

Para entendimento do Quadro 1 é necessário conhecer as diferenças na classe de agressividade ambiental, sendo assim apresenta-se o Quadro 2, contendo as informações da Tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quadro 2 – Especificações de classe de agressividade ambiental de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014)

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	
<p>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).</p> <p>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.</p> <p>c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústria químicas.</p>			

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 17)

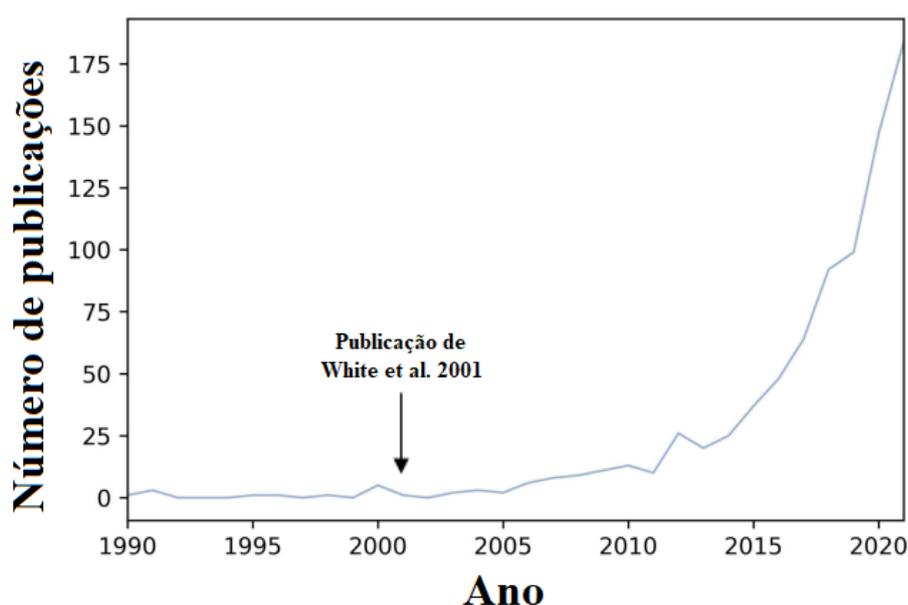
Visando sanar os problemas gerados pela formação das fissuras, pode-se executar ações de manutenção e reparação. Entretanto em estruturas de grandes dimensões tais ações podem gerar um custo muito elevado, além de, em alguns casos, ser muito difícil de executar em função do local onde a fissura é formada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

É importante destacar que a autocicatrização autógena não é capaz de cicatrizar qualquer fissura, principalmente por conta da sua espessura. 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 Fundamentos da 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 (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.

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 Cappellesso (2018) destacam que a autocicatrização pode ser desencadeada de diferentes formas e por diferentes agentes. Tittelboom e De Belie (2013) compilaram as informações apresentadas no Quadro 3, 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 3 – 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 de tereftaleno (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
	Interno	
	48°C	Derretimento do revestimento de parafina e liberação de agente retardador de hidratação
	93°C	Derretimento do filme de EVA em volta de fio espiral e liberação de epóxi
Formação de fissuras	+ 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 4, com informações organizadas por 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 4 – Revisão acerca dos diferentes agentes de autocicatrização

Agente	Número de componentes		Viscosidade (mPas)	Forma de cura	Tempo de cura	Expansão		Resistência (MPa)
	1	>2				Sim	Não	
Cianoacrilato	X	-	<10	Úmida	Segundos	-	X	20
Epóxi	X	-	-	Úmida, ar, calor	60°C, <100min	-	X	-
	X	-	250-500	Úmida, ar	-	-	X	22
	X	-	-	Úmida, ar	-	-	X	25
	-	X	-	Contato	-	-	X	-
	-	X	-	Contato	± 1 h	-	X	-
	-	X	200	Contato	-	-	X	17,6
	-	X	150	Contato	30 min	-	X	5,1
	-	X	80	Contato	30 min	-	X	4,2
	-	X	360	Contato	40 min	-	X	45
Metil Metacrilato	X	-	-	Calor	-	-	X	-
	-	X	± 1	Contato	30 min	-	X	50-75
	-	X	± 1	Contato	-	-	X	-
	-	X	34	Contato	1 h	-	X	50
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

2.1.2.1 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). Cappellesso (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.

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 encapsulação 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	Porcentagem de substituição em relação ao peso do cimento (%)	Performance
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 - Reduz 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

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

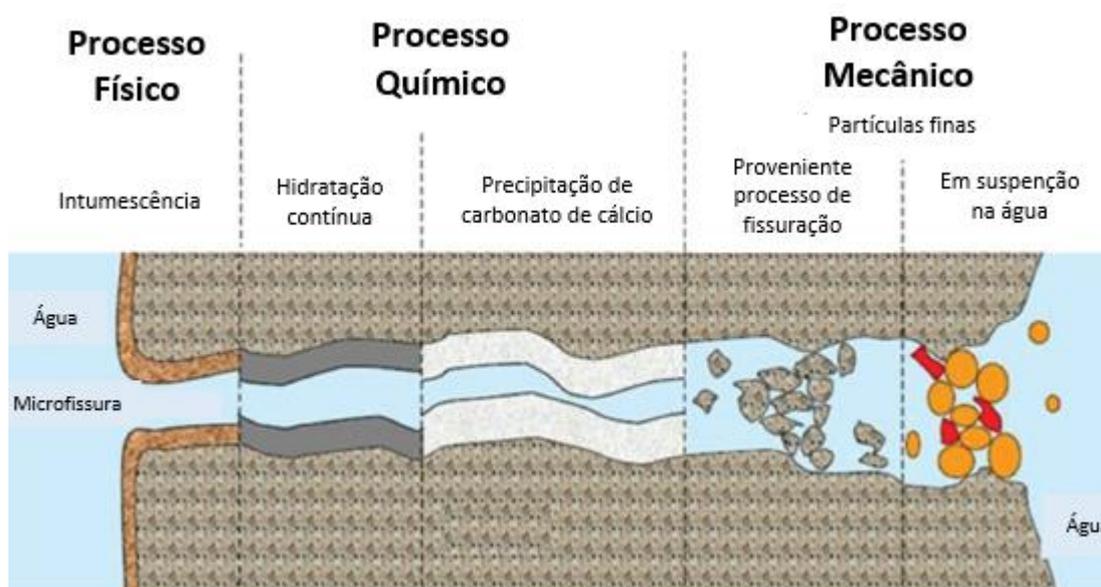
2.1.2.2 Autocicatrização autógena

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 que desencadeia 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. Cappellesso (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; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.* 2018; GHOSH, 2009; HUANG *et al.*, 2016; PARK; CHOI, 2019). A RILEM 221-SHC (2013) apresenta a Figura 5 mostrando, além dos processos químicos, as causas físicas e mecânicas que podem acarretar a autocicatrização

Figura 5 – 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).

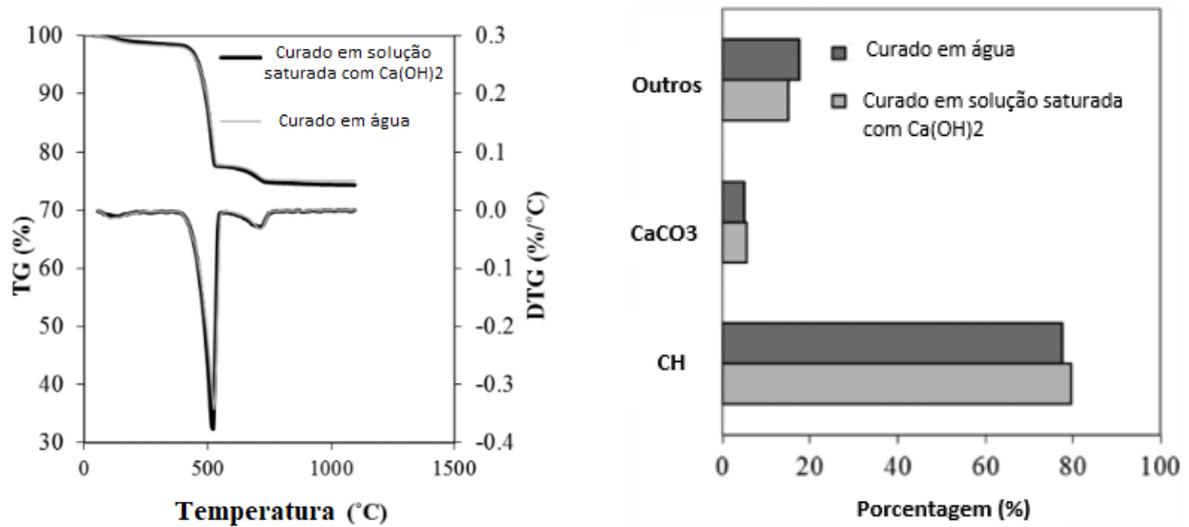
Os processos químicos estão relacionados a hidratação contínua e precipitação de CaCO_3 , já destacados pelos autores citados anteriormente como mais relevantes no mecanismo autogênico da autocicatrização.

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 (CAPPELLESSO, 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) desenvolveram um estudo visando avaliar o Ca(OH)_2 como agente cicatrizante, através da maior disponibilidade do íon Ca^{2+} , submetendo as amostras em solução saturada com este componente. Em suas conclusões os autores destacam que a maior disponibilidade do íon pareceu não influenciar na mineralogia dos produtos precipitados nas fissuras. Além disto, também observaram que os produtos comumente formados são o C-S-H, o Ca(OH)_2 (CH) e o CaCO_3 , sendo que o CH é encontrado em quantidades muito maiores do que o C-S-H, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – 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.

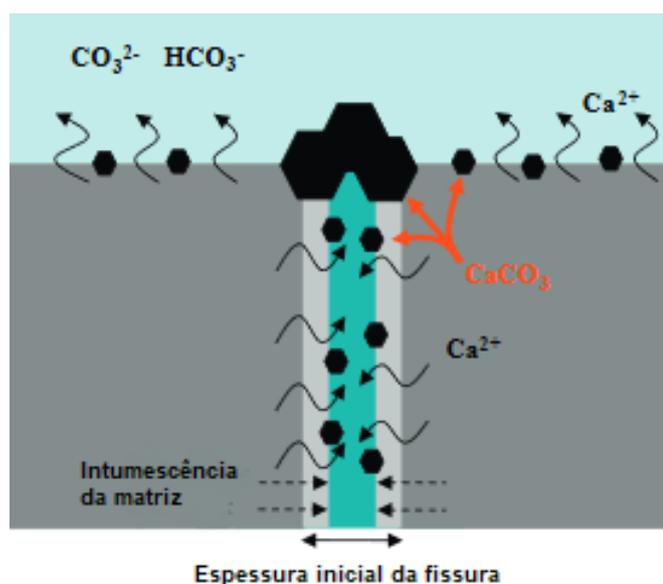
O segundo processo químico citado é a precipitação de CaCO_3 . Os íons Ca^{2+} , presentes na solução dos poros do concreto, reagem com os íons CO_3^{2-} , provenientes da água que penetra na fissura, acarretando na formação de CaCO_3 dentro dela. As equações a seguir mostram detalhadamente como ocorre 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; MOSABERPAHAH; 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 pozolâncias, iniciam suas reações, consumindo o hidróxido de cálcio, principal fonte Ca^{2+} e dificultando a precipitação do CaCO_3 (DE BELIE *et al.*, 2018; 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; SELIER, 2004; HUANG *et al.*, 2016; SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

Figura 7 – 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 diferente o processo de autocicatrização.

2.1.2.2.1 Fatores impactantes no mecanismo autogênico

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 foi elaborado o Quadro 7, 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

Fator de influência		Considerações	Referências
Características do concreto	Teor de clínquer no cimento	A quantidade de íons Ca^{2+} disponíveis está relacionada ao teor de clínquer do cimento. Tal fato 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, conseqüentemente, 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 autogêneo pela presença de cimento não hidratado.	Cappellesso (2018); Snoeck (2015)
	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 <i>et al.</i> (2018); Snoeck (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 <i>et al.</i> (2018); Tittelboom e De Belie (2013)
Características da fissura	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: Elaborado pelo autor

2.1.3 Revisão de métodos utilizados para análise da autocicatrização

A forma de avaliar a autocicatrização ainda não dispõe de uma prescrição normativa. Os estudos relacionados ao tema adotam diferentes ensaios para analisar o fenômeno. Este item tem por objetivo apresentar uma revisão de diferentes metodologias empregadas em pesquisas realizadas acerca do tema, tanto na indução das fissuras quanto na forma de analisar a ocorrência da autocicatrização.

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 degelo, 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 a indução de fissuras de diferentes tipos de concreto

Ensaio	Concreto simples	Concreto reforçado com fibra	Concreto têxtil	UHPC reforçado com fibras
Compressão	Comum	Possível	Possível	Possível
Tração direta	Difícilmente 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

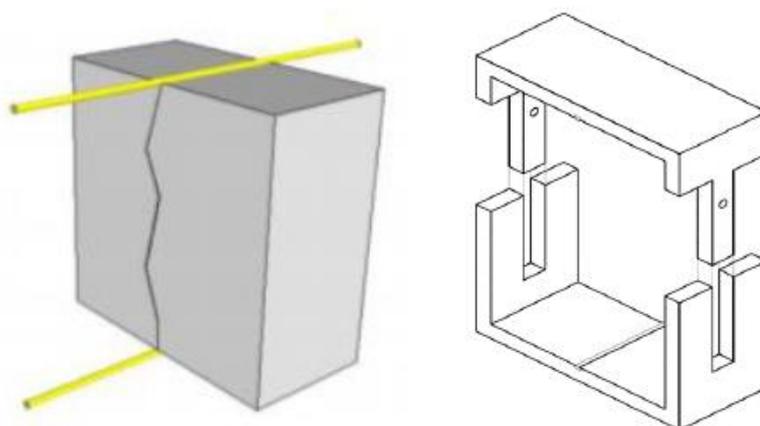
Fonte: Ferrara *et al.* (2018, p. 118), texto traduzido para o português

Cappellesso (2018) estudou o comportamento de diferentes tipos de cimento na autocicatrização do concreto. Avaliou diferentes relações água/cimento 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, Cappellesso (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 bitola 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 8. 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 8 – Metodologia adotada por Cappellesso (2018) na fissuração do corpo de prova



Fonte: Cappellesso (2018, p. 61)

Com o objetivo de avaliar a autocicatrização em compósitos cimentícios contendo perlita expandida, encapsulando diferentes concentrações de soluções bacterianas, Mello (2019) utilizou corpos de prova de argamassa para realização do seu estudo. As amostras de argamassa continham dimensões de 40x40x160 mm e as fissuras foram induzidas por meio do ensaio de tração na flexão por 3 pontos. Para evitar colapso da argamassa, o autor utilizou uma barra de aço CA 60 a 10 mm da base do corpo de prova. A condição de exposição foi uma câmara úmida, a fim de evitar o mecanismo autógeno.

Visando efetuar suas análises, Mello (2019), fez registros visuais das fissuras, bem como a sua mensuração, através de microscópio ótico. Para corroborar com a análise visual, também executou o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Alazhari *et al.* (2018) também avaliaram o encapsulamento de bactérias, junto de nutrientes, em perlita expandida. O estudo foi realizado em discos de argamassa que possuíam 100 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. A abertura da fissura ocorreu através do ensaio de tração por compressão diametral, em que os espécimes avaliados foram revestidos com uma tira polimérica reforçada com carbono para garantir que não ocorresse rompimento total. A fim de controlar o tamanho máximo da fissura formada, se fez o uso de transformador diferencial variável linear (LVDT). Como condição de exposição os corpos de prova foram mantidos submersos até o início das investigações acerca da autocicatrização.

Na análise da autocicatrização os autores supracitados utilizaram um microscópio ótico e espectrometria de absorção por infravermelho para visualizar e mensurar a fissura. Além disto, também foi avaliado a penetração de água pela superfície da argamassa fissurada.

Assim como Alazhari *et al.* (2018) e Mello (2019), Esaker *et al.* (2021) pesquisaram a utilização de perlita expandida encapsulando bactérias, entretanto quando encubadas em solos com diferentes valores de pH. O compósito empregado no estudo foi a argamassa, sendo moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 40 mm de altura e corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm, contendo uma barra de aço ao seu centro.

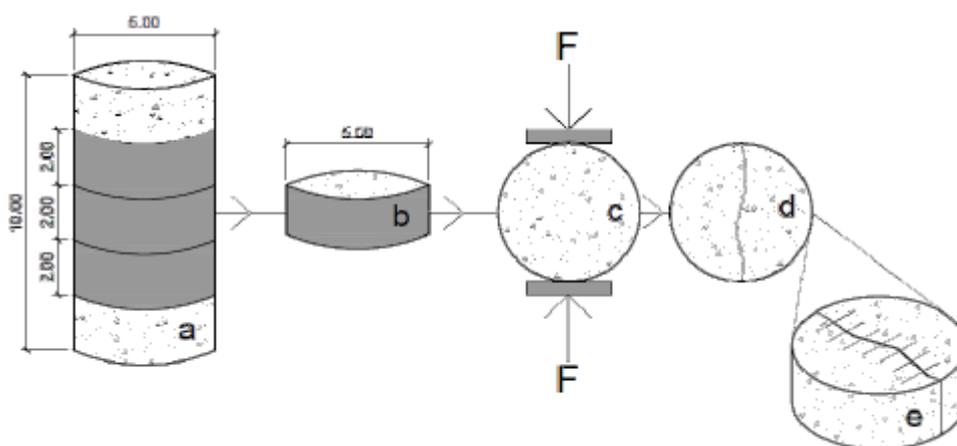
Os prismas de argamassas produzidos por Esaker *et al.* (2021) foram destinados para a avaliação da autocicatrização através do ensaio de absorção de água por capilaridade. A formação das fissuras se deu pelo ensaio de tração na flexão

em 3 pontos, sendo a carga aplicada até que fossem visivelmente perceptíveis. Para ajudar no controle da espessura das fissuras formadas se fez uso de LVDT.

Esaker *et al.* (2021) investigaram visualmente a autocicatrização com os corpos de prova cilíndricos. A fissura foi formada pelo ensaio de tração por compressão diametral, sendo que a espécime de argamassa foi envolta em uma fibra adesiva de carbono para evitar colapso total. O carregamento aconteceu até que se notasse a formação da fissura em ambas as faces. O acompanhamento visual do fenômeno foi feito por imagens geradas em microscópio ótico. Além disto, o produto formado na autocicatrização foi caracterizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios x por dispersão em energia.

Silva *et al.* (2021b) desenvolveram um estudo visando avaliar influência da concentração de hidróxido de cálcio no fenômeno de autocicatrização de argamassas. Os corpos de prova moldados possuíam 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após moldagem, eles foram cortados em 5 partes, resultando em discos com espessura de 20 mm, sendo que as extremidades descartadas. A abertura da fissura ocorreu através do ensaio de tração por compressão diametral, utilizando limitadores laterais para evitar colapso. No estudo foi avaliado o comportamento dos corpos de prova totalmente submersos em água e em ciclos de molhagem e secagem, com e sem a renovação de água. A análise da autocicatrização aconteceu através de microscopia ótica em regiões previamente estabelecidas no comprimento da fissura, com medição da sua respectiva espessura. A Figura 9 ilustra parte do processo utilizado pelo autor.

Figura 9 – Metodologia utilizada para indução das fissuras utilizada por Silva *et al.* (2021b)

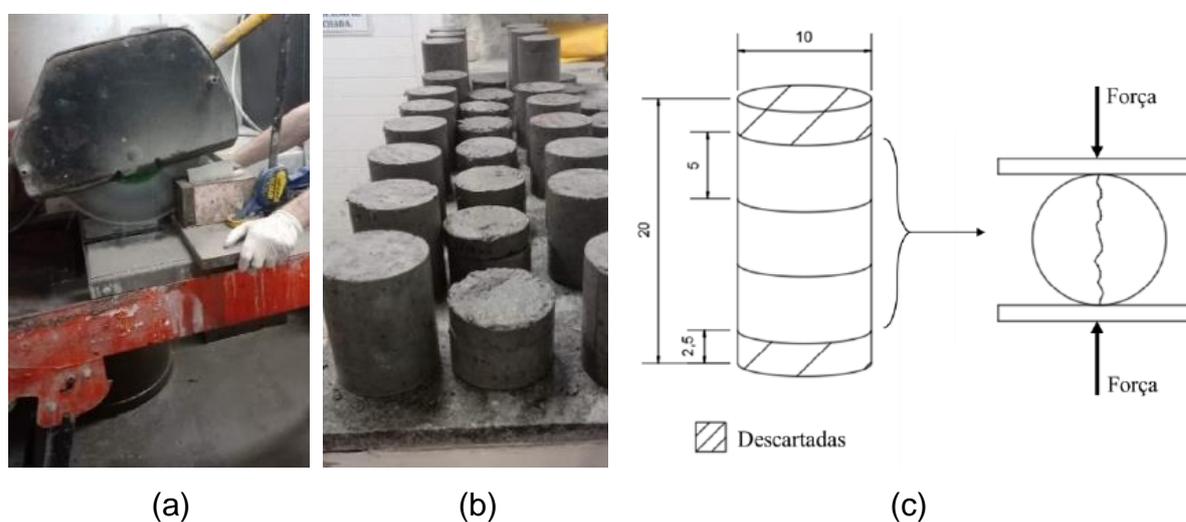


Fonte: Silva *et al.* (2021b, p. 06)

Em pesquisa realizada por San Martin (2021) uma metodologia semelhante a aplicada por *Silva et al.* (2021b) foi executada. No estudo em questão a autora avaliou a autocicatrização de concreto produzido com aditivo cristalizante a ser empregado em cortinas de concreto em uma obra. A mistura de concreto foi retirada de caminhões betoneiras e os corpos de prova moldados eram cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Em laboratório, os corpos de prova, ao atingirem determinada idade, foram divididos em 5 partes diferentes, sendo duas delas (as das extremidades) com 25 mm de espessura, e as demais com 50mm. Os discos com menor espessura foram descartados, enquanto o restante passou pelo ensaio de compressão diametral para formação da fissura. A Figura 10 ilustra esta metodologia empregada pela autora.

San Martin (2021) avaliou 4 condições de exposição: submersa sem renovação da água, submersa com renovação constante de água, ciclos de molhagem e secagem e expostos à ação natural. Visando investigar o fenômeno de autocicatrização a autora utilizou microscopia ótica, para análises visuais, e propagação ultrassônica, para avaliação de variações na velocidade de propagação.

Figura 10 – Processo de divisão das partes (a) e (b) e de fissuração (c) empregado por San Martin (2021)



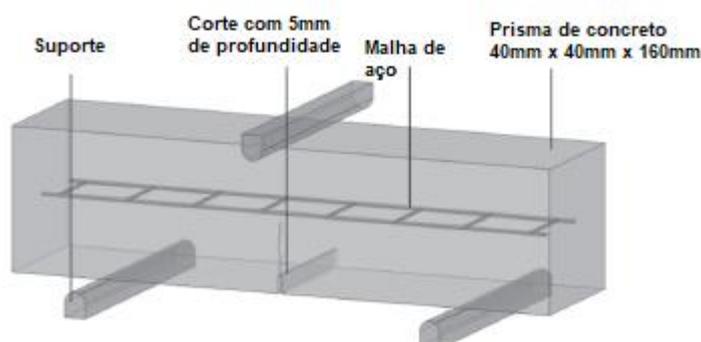
Fonte: San Martin (2021, p. 20)

Para analisar o efeito da incorporação de aditivos cristalizantes e agregados leves encapsulados com solução carbonática, Wang *et al.* (2021) moldaram corpos de prova de concreto com dimensões de 40x40x160 mm. Foi incorporado uma malha de aço no meio do corpo de prova para evitar ruptura frágil, conforme mostra a Figura 11. A abertura das fissuras foi executada pelo ensaio de tração na flexão em 3 pontos.

Com o intuito de atuar como um ponto de preferência para formação das fissuras, foi realizado um pequeno corte no meio do prisma. Após fissuração as amostras permaneceram submersas em água saturada com hidróxido de cálcio.

Os autores citados acima utilizaram microscopia ótica para entender o comportamento da autocicatrização, avaliando a área inicial e final das fissuras. Além disso, também buscaram determinar os produtos formados nas fissuras por difração de raios x (DRX), análise termogravimétrica e MEV.

Figura 11 – Ilustração dos corpos de prova utilizados no estudo



Fonte: Wang *et al.* (2021, p. 05), texto traduzido para o português

Van Mullem *et al.* (2020) desenvolveram um estudo interlaboratorial que envolveu 6 universidades europeias, visando determinar um método para avaliar, efetivamente, a autocicatrização. No estudo em questão foi pesquisado a eficácia da autocicatrização utilizando macrocápsulas cilíndricas de vidro contendo poliuretano. As pesquisas do fenômeno ocorreram tanto em concreto quanto em argamassa, em que para cada um dos compósitos foi utilizado uma metodologia específica.

Para as análises em concreto, os autores supracitados moldaram prismas com 60x60x200 mm de dimensão. Foram incorporadas 2 barras de aço, previamente lixadas para promover maior rugosidade e aderência ao concreto, com 3 mm de diâmetro e alocada a 12 mm da base do prisma. Visando atuar como um ponto de preferência para formação de fissuras, executou-se um corte no centro do corpo de prova, na base inferior. A indução das fissuras ocorreu através do ensaio de tração na flexão em 3 pontos, utilizando um sistema para controlar a espessura média das fissuras. Objetivando entender o comportamento da autocicatrização os autores executaram um ensaio de absorção de água por capilaridade e análise visual, com medição das fissuras, através de microscopia ótica.

No estudo realizado em corpos de prova de argamassa, Van Mullem *et. al* (2020) moldaram prismas com dimensões de 40x40x160 mm, contendo uma barra de aço de 5 mm de diâmetro posicionada a 15 mm do fundo. A fissuração também se deu pelo ensaio de tração na flexão em 3 pontos. Para evitar ruptura total do prisma, se utilizou uma fibra polimérica de carbono fixada em uma das faces através de resina epóxi. Após fissurado, o corpo de prova foi confinado, conforme ilustra a Figura 12, para garantir uma espessura de fissura controlada e padrão. A investigação da autocicatrização foi feita pelo ensaio de permeabilidade de água e análise visual, com medição da espessura da fissura, por microscopia ótica.

Figura 12 – Confinamento do corpo de prova utilizado por Van Mullem *et al.* (2020) para controle da espessura da fissura



Fonte: Van Mullem *et al.* (2020, p. 667)

Em sua tese, Pacheco (2020) avaliou diferentes mecanismos da autocicatrização do concreto. A autocicatrização foi investigada através do fenômeno autogênico, pelo consumo de cimento e emprego de adições pozolânicas, e através do seu fenômeno autônomo pela inserção de soluções químicas e soluções bacterianas. Além disto, também pesquisou a influência da deterioração na ocorrência do fenômeno, através da aceleração em câmara de carbonatação e câmara de névoa salina.

O estudo foi desenvolvido em concreto, em que foram moldadas amostras prismáticas com dimensões de 60x60x180mm, avaliando o comportamento do fenômeno quando submerso e em câmara úmida. A fissuração foi gerada de duas formas: pelo ensaio de tração na flexão em 4 pontos, com a aplicação da carga até que fosse visualizada a primeira fissura, e através do corte do corpo de prova com uma serra. Os corpos de prova contaram com a inserção de uma barra de aço CA 60, com 5 mm de diâmetro, posicionada 2 cm acima da base, a fim de evitar o rompimento

frágil. Para avaliar a autocicatrização foi utilizado microscopia ótica, com mensuração da espessura das fissuras. Também foi executado MEV e DRX, com o intuito de determinar os produtos formados nas fissuras.

Ao longo deste item foram apresentadas diferentes técnicas empregadas pelos autores com a finalidade de avaliar o fenômeno de autocicatrização. O Quadro 9, desenvolvida por Gupta e Kua (2016) apresenta uma revisão, salientando algumas limitações, de métodos comumente empregados na investigação do tema.

Quadro 9 – Revisão de diferentes métodos empregados para a avaliação da recuperação de propriedades depois da cicatrização

Tipo	Ensaio	Finalidade	Limitações
Visualização e determinação	Microscopia eletrônica de varredura	Visualização do cristal depositado para a cicatrização e liberação do agente de cicatrização em cápsulas inteligentes	A acurácia da imagem e visualização é dependente de onde a imagem é tirada e a resolução escolhida. Pode não capturar a uniformidade da deposição
	Análise por infravermelho	Determinação dos produtos precipitados	Presença de umidade no concreto pode afetar a acurácia. O infravermelho é adequado somente para ver componentes proeminentes, sendo assim deposições menores podem não ser discernível. (Ramachandran e Beaudoin 2000)
	Microscopia eletrônica de varredura ambiental	Visualização da ruptura de cápsulas embutidas	A pressão muito baixa que deve ser mantida pode alterar a microestrutura do concreto pela sua desidratação
	Microscopia ótica com análise de imagem	Visualização da deposição do cristal e taxa de cristalização	Depende da resolução do microscópio ótico, o qual pode ser limitado pela seção fina
Recuperação da impermeabilidade da água e ar (características de durabilidade)	Permeabilidade da água (baixa e alta pressão)	O coeficiente de permeabilidade de água pode ser determinado por fluxo de água pelas fissuras cicatrizadas	A efetividade depende de como as fissuras foram introduzidas

(continua...)

(continua...)

	Permeabilidade do ar	A taxa de fluxo de ar depois da cicatrização mede a resistência conta umidade/substância estranhas nas fissuras cicatrizadas	Muito sensível a composição do espécime
	Difusão de cloreto	Medição da resistência a penetração de cloretos. Relevante e aplicável para estruturas costeiras	-
Recuperação das propriedades mecânicas	Ensaio de compressão e ensaio de tração	Mede a recuperação na resistência pela autocicatrização	Fortemente influenciada pelo teor de umidade, tamanho e cura dos espécimes
	Ensaio de tração na flexão (três e quatro pontos)	-	Resultados de frequência de ressonância são afetados pelo tamanho e efeito da geometria da amostra (Waiching <i>et al.</i> 2015)
	Análise da frequência de ressonância	Medição da recuperação rigidez	-
	Análise de emissão acústica	Sinais de sensores que são presos na superfície são capturados e analisados para detectar a quebra da cápsula e recuperação da energia	Sensível à qualidade do ruído do ambiente e sinal (Huang <i>et al.</i> 1998)

Fonte: Gupta e Kua (2016, p. 10), texto traduzido para o português

2.2 CIMENTO 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 caulínicas (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 caulínicas e, principalmente, da reação sinérgica 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, conseqüentemente, melhorias em termos de resistência (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. Embora o cimento CII E e o CIII 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 13.

Figura 13 – Comparativo entre emissões de CO₂ do cimento ternário LC³-50 e os demais cimentos brasileiros



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

Em termos financeiros é comum encontrar o metcaulim 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 caulinita em diferentes quantidades.

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, conseqüentemente, 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 10 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 10 – Compostos envolvidos na hidratação do cimento Portland

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO·3Al ₂ O ₃ ·SO ₃	C ₄ A ₃ \bar{S}
SO ₃	\bar{S}	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ ·2H ₂ O	C \bar{S} H 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 a 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 C_3A . 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 ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) e, em menores quantidades, de monossulfato ($C_4A\bar{S}H_{18}$) (BEAUDOIN; ODLER, 2019; BULLARD *et al.*, 2011).

Além disso, Mehta e Monteiro (2014) destacam que o C_4AF também pode reagir com a água e formarem produtos estruturalmente semelhantes aos da reação do C_3A . 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 C_3A .

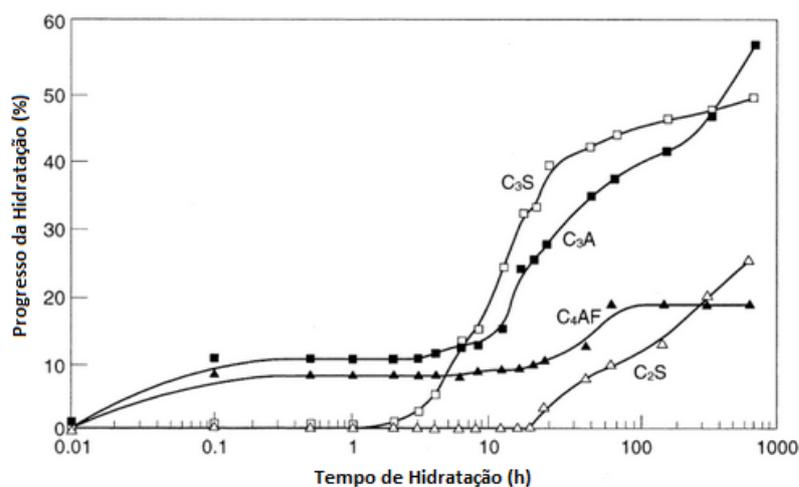
Durante a indução (II), que acontece nas primeiras horas após a mistura, é iniciado um período em que ocorre uma redução brusca na velocidade da hidratação, após o processo inicial muito acelerado. Nesse momento, a concentração de hidróxido de cálcio atinge o seu máximo, posteriormente iniciando o seu declínio. A concentração de íons SO_4^{2-} se mantém constante ao passo que a fração consumida na formação da etringita é repostada 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 C_3S é mais rápida, formando uma segunda fase de precipitação de C-S-H, além da hidratação do C_2S . O hidróxido de cálcio cristalino (portlandita) é precipitado da solução aquosa, fazendo com que a concentração de íons Ca^{2+} diminua. O sulfato de cálcio é completamente dissolvido e a concentração dos íons SO_4^{2-} 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, conseqüentemente, 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 C_2S acaba se tornando mais impactante na precipitação do composto do que o C_3S . Também é nesse momento em que a fase AFt começa a ser transformada em monossulfato (fase AFm), em conseqüência 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 C_3A e o C_4AF (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 muito 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 14, apresentada a seguir.

Figura 14 – Cinética da reação das fases do clínquer ao longo do tempo



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

2.2.1.2 Cimento LC³

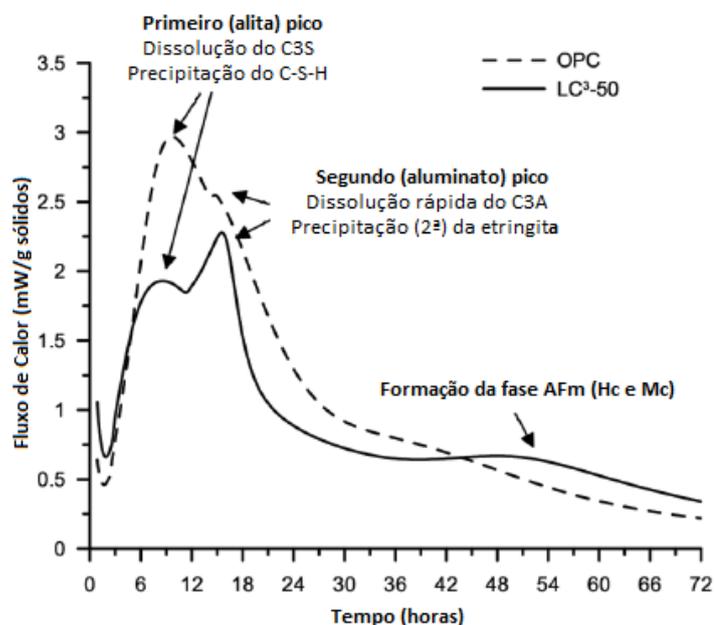
Conforme já destacado anteriormente, o cimento LC³ é uma composição ternária composta de clínquer, gesso, argila calinada e carbonato de cálcio moído. Quando incorporado ao cimento, o fíler calcário pode promover um refinamento dos poros, através do efeito fíler e da nucleação. Além disso, adicionando 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 sinérgica (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 metaculim 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 15 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 metaculim 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 15 – Calorimetria típica de um cimento LC³ comparado com um cimento referência (OPC)



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.

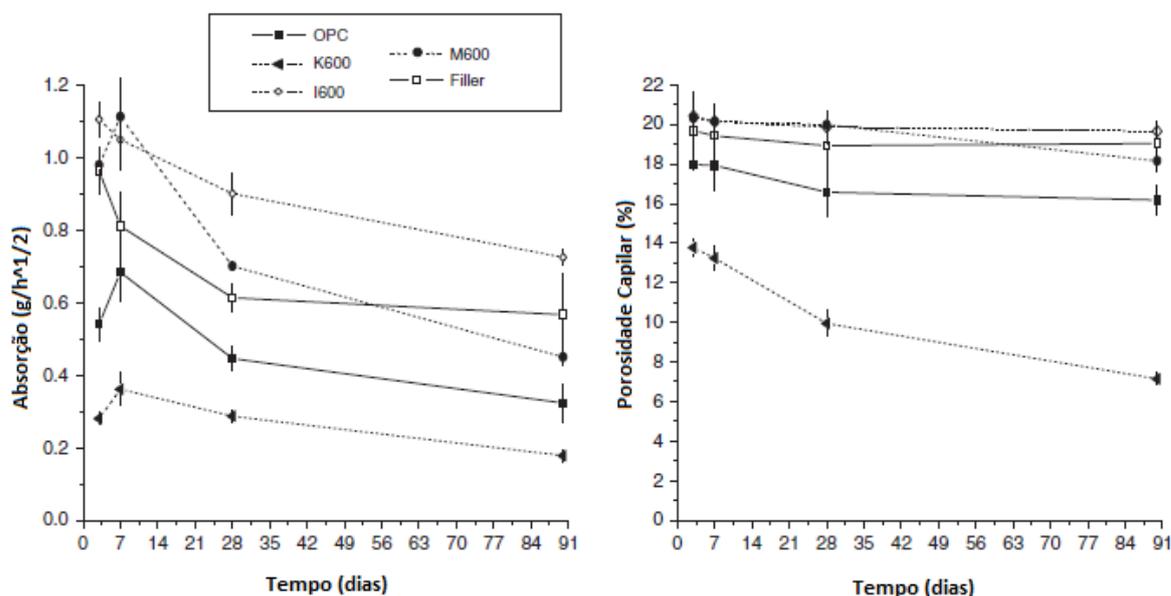
2.2.1.2.1 Reação entre o hidróxido de cálcio e a argila calcinada

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 metaculim 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 caulínica, possibilitam uma boa densificação da matriz, o que, conseqüentemente, culmina em bons resultados em termos de resistência mecânica. Isso pode ser observado na Figura 16, em que o cimento referência é nomeado de “OPC”, enquanto a composição contendo argila calcinada de caulinita é nomeada como “K600”.

Figura 16 – Resultados de porosidade e absorção de composições binárias contendo argila calcinada



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

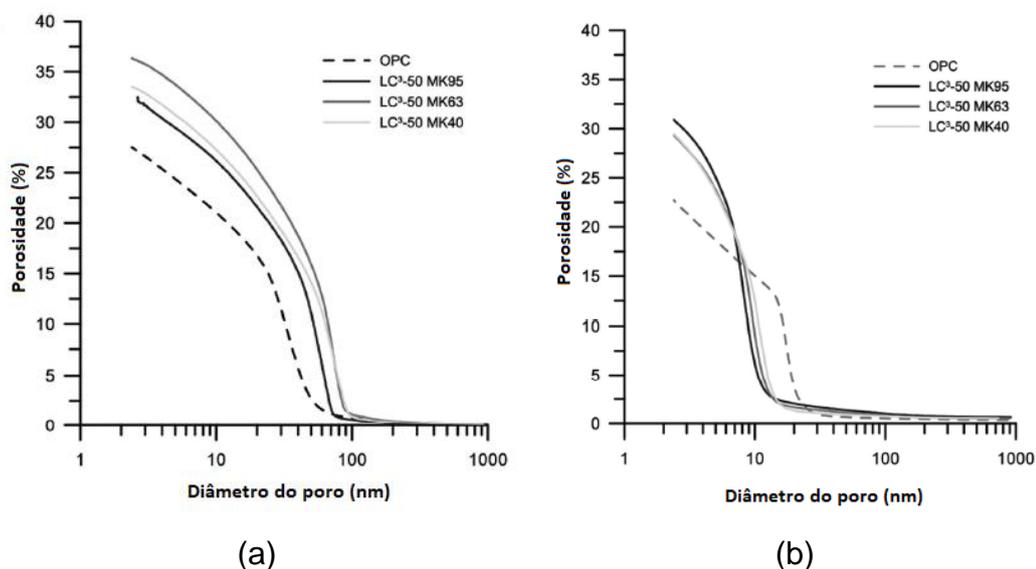
2.2.1.2.2 Reação entre argila calcinada e o carbonato de cálcio moído

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 amorfa é fornecida. Em composições ternárias do tipo LC³, que além de argila calcinada também existe o carbonato de cálcio moído, essa quantidade maior alumina amorfa 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 17 – Porosidade de composição de LC³ composta por metaculim com diferente quantidade de calcinação em (a) 1 dia e (b) 7 dias



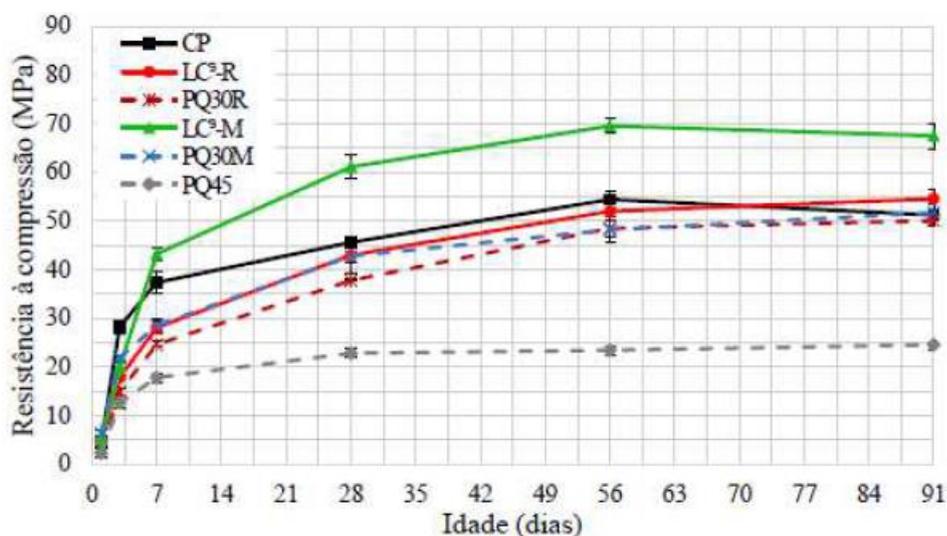
Fonte: Zunino, Martirena e Scrivener (2021, p. 54)

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 18, e Khan, Nguyen e Castel (2020).

Figura 18 – Resultados de resistência à compressão de diferentes tipos de LC³ comparados ao cimento referência

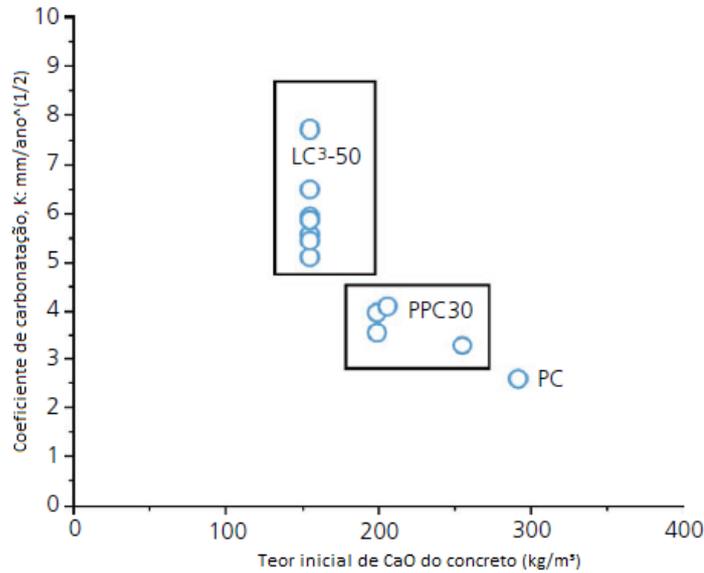


Fonte: Fröhlich (2019, p. 124)

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 19. 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.

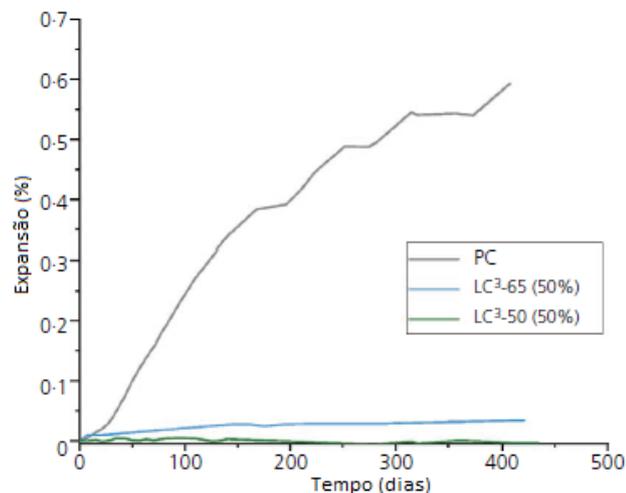
Figura 19 – Coeficiente de carbonatação para diferentes quantidades de CaO em mistura com LC³-50, cimento Portland (CP) e cimento Portland Pozolânico (PPC)



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 álcali-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 20, associando esse potencial mitigador ao fato da redução da alcalinidade e presença de alumínio na solução dos poros.

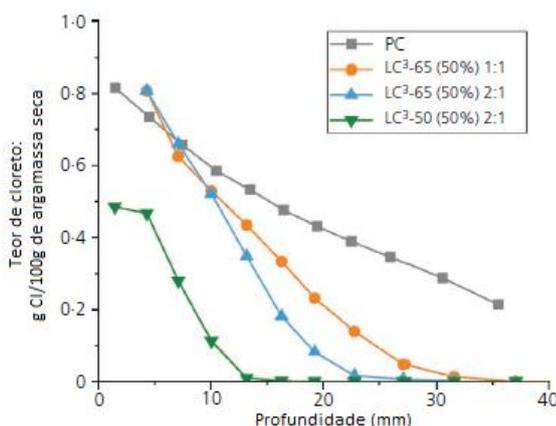
Figura 20 – Potencial mitigador da reação álcali-agregado do cimento LC³



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 21, associando tal fato ao refinamento dos poros que o LC³ promove.

Figura 21 – 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 degelo, 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

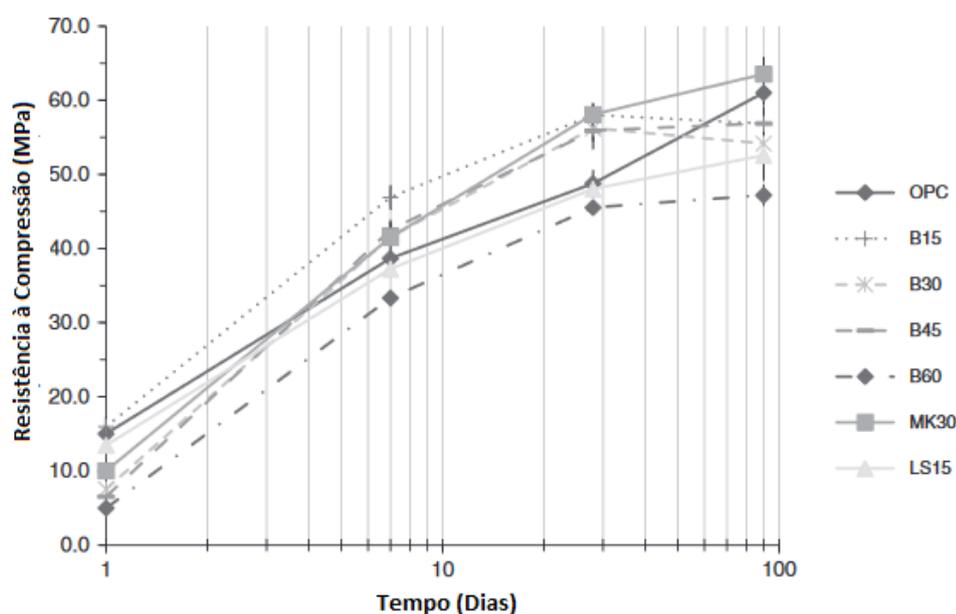
Diversos são os fatores que podem causar algo tipo de impacto no desempenho do cimento ternário LC³. Os itens a seguir foram desenvolvidos com o intuito de investigar esse assunto.

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 realizado por 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%, para a mesma proporção, obtém-se resultados levemente inferiores ao cimento referência, mesmo assim muito próximos.

Figura 22 – Resultados de 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 calinada para uma parte de calcário) possibilita bons resultados.

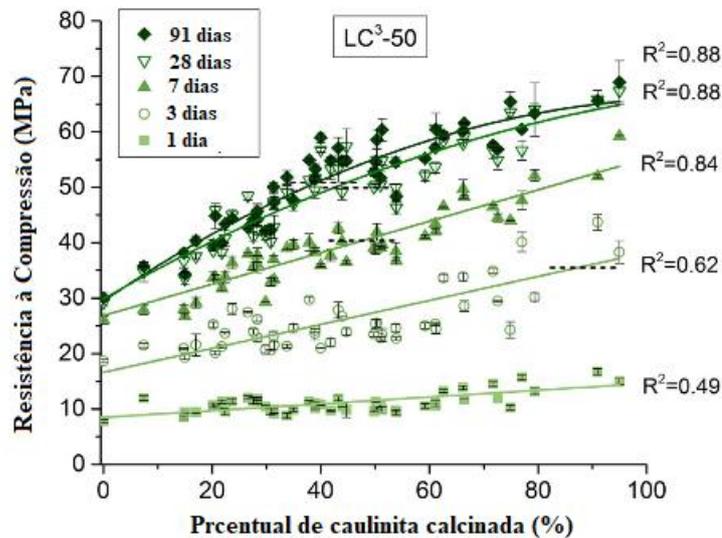
Corroborando com os resultados encontrados por Damidot *et al.* (2011), Barbalho, Silva e Rêgo (2019), que realizaram um estudo para avaliar o teor entre pó de calcário e argila calcinada, concluíram que uma proporção de 2:1 possuem resultados satisfatórios, estando estatisticamente no mesmo patamar 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 caulínicas, através da sua 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 23.

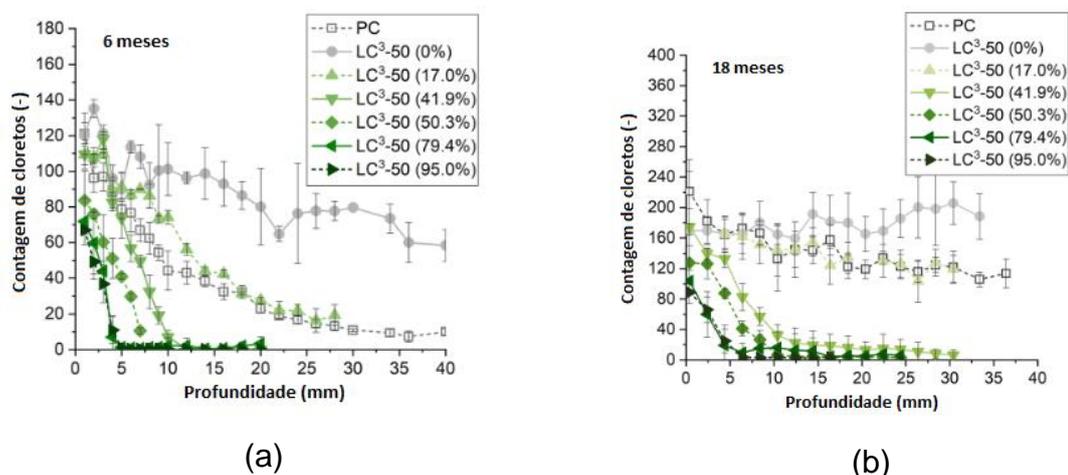
Figura 23 – Resistência à compressão do LC³-50 com diferentes quantidades de caulinita calcinada



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

Além disso, Maraghechi *et al.* (2018) avaliaram diferentes teores de caulinita das argilas calcinadas e sua influência no transporte de cloretos da matriz cimentícia. Como conclusão os autores destacam que a partir da presença de 40% de caulinita na composição da argila calcinada já é possível observar excelente resultado, quando comparado com o cimento referência, conforme ilustra Figura 24. Segundo os autores tal comportamento pode ser explicado pelo refinamento dos poros que maiores teores de caulinita podem proporcionar.

Figura 24 – Impacto de diferentes teores de caulinita da argila calcinada 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 conseqüentemente acarretam na 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. Quando associado a clínquer finamente moído, o carbonato de cálcio moído apresenta melhorias em termos reológicos, e quando o mesmo está finamente moído também desencadeia a densificação da matriz, culminando em benefícios na matriz do concreto.

Em ambiente laboratorial é comum realizar a moagem dos componentes de forma separada. Entretanto, em escalas reais, 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

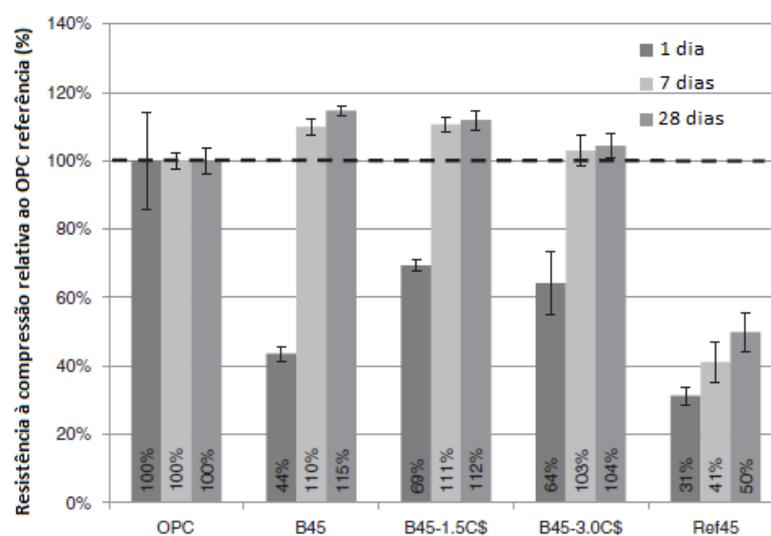
de moagem, o clínquer pode apresentar partículas muito grossas, o que irá impactar na obtenção de resistências iniciais, ou a argila calcinada apresentará partículas muito finas, influenciando na demanda de água (PEREZ *et al.*, 2015; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

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 também possui influência 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 com o ajuste de 1,5% pode-se observar um incremento de resistência nas idades de 1 dia e 7 dias, enquanto com o teor de 3% observou-se perda no comportamento mecânico. Esse cenário é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – 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.

3 METODOLOGIA

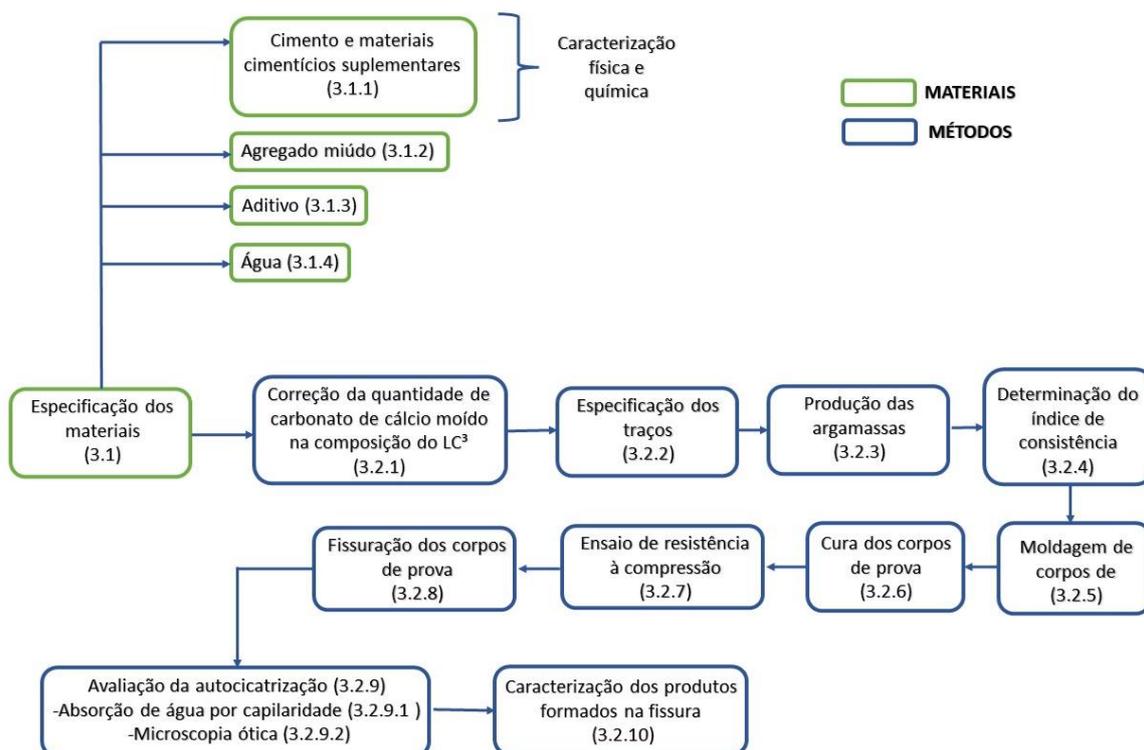
Este capítulo foi desenvolvido com o intuito de apresentar a metodologia empregada neste trabalho, visando atingir os objetivos previamente estabelecidos. Ele é dividido em, basicamente, duas partes: os materiais utilizados no estudo e os métodos adotados para obtenção dos resultados a serem avaliados.

A Figura 26 apresenta uma representação 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.

Para a execução do programa experimental foram utilizados diferentes laboratórios dentro das instalações da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), conforme destacado a seguir:

- a) Laboratório de Materiais da Construção Civil: caracterização de agregados, peneiramento do agregado, moldagem de argamassas, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade;
- b) Laboratório de Metalurgia Física: tração na flexão em três pontos;
- c) Laboratório de Microscopia e Sedimentologia: análise visual em microscópio;
- d) Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais: caracterização química e física dos cimentos, metacaulim e carbonato de cálcio moído;

Figura 26 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Figura 26 é possível perceber que não foi utilizado agregado graúdo no compósito produzido, podendo, então, ser classificado como argamassa. Essa decisão foi tomada visando simplificar o programa experimental, que poderia se tornar muito extenso e inviável de ser executado dentro do período disponível para realização deste trabalho, além de diminuir o volume de materiais necessários e a complexidade da matriz a ser avaliada. Essa metodologia também é observada nos estudos de Mohammadi *et al.* (2020) e Namnoum *et al.* (2021), que investigaram a autocicatrização autógena de composições ternárias de cimento.

3.1 MATERIAIS

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

3.1.1 Cimentos e materiais cimentícios suplementares

Conforme especificado no item d) dos objetivos específicos do trabalho, o intuito do estudo também é avaliar o comportamento da composição ternária do tipo LC³ com cimentos atualmente normatizados. Isso decorre da necessidade de compreender as diferenças entre os cimentos já aplicados na construção civil, buscando entender o comportamento e a capacidade de aplicabilidade do LC³ em um cenário real, e se o mesmo possui algum tipo de vantagem ou desvantagem em relação ao processo de autocicatrização.

Tendo esse cenário em vista, foram utilizados 2 cimentos atualmente normatizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018): o Cimento Portland Composto com Material Carbonático da classe 40 de resistência (CPII F 40) e o Cimento Portland Pozolânico Resistente a Sulfatos da classe 32 de resistência (CPIV 32 RS), fornecidos pela Votorantim Cimentos. Para a composição ternária do tipo LC³ também foi utilizado o Cimento Portland de Alta resistência Inicial (CPV ARI) por conter menores quantidades de adições em sua composição. Cabe destacar que o CPV ARI empregado também foi da mesma marca dos demais cimentos.

Para a composição do cimento ternário do tipo LC³ empregou-se do carbonato de cálcio moído, que nessa pesquisa foi utilizada da marca Brasilminas, e do metaculim, o HP Ultra da marca Metacaulim do Brasil.

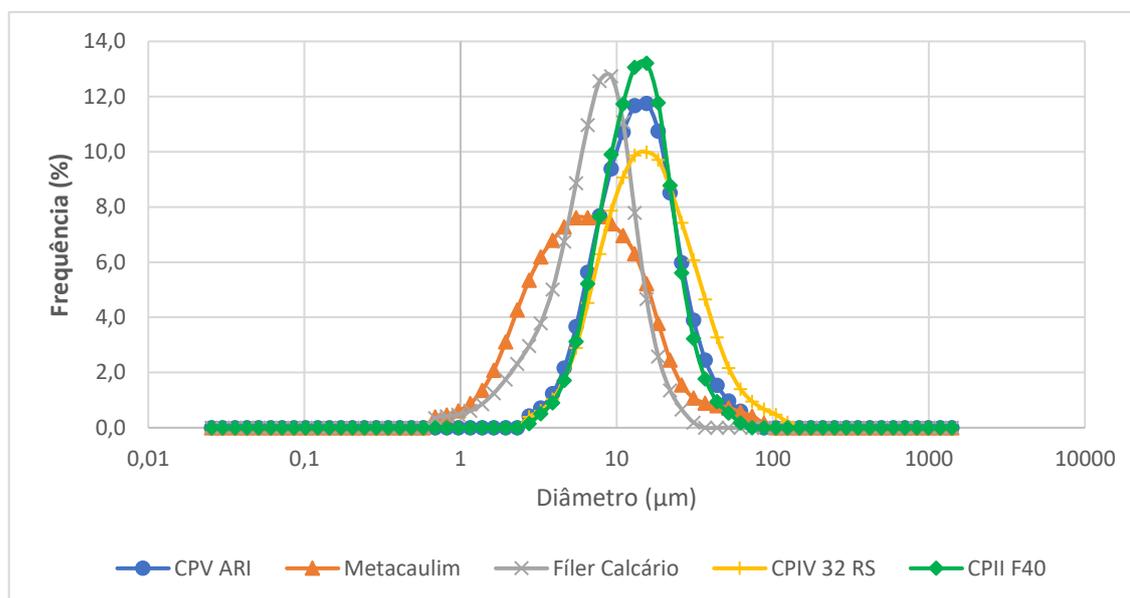
De forma a caracterizar quimicamente tanto os cimentos quanto os MCS, foi realizado a espectrometria de raios-x (FRX) por dispersão de energia, com análise quantitativa da composição química. Para esse ensaio foi utilizado o equipamento EDX 720 HS da marca Shimadzu. Além disso, com o intuito de caracterizar os mesmos materiais de forma física, foi realizado ensaios de massa específica, através do método de picnometria a gás hélio, área superficial por adsorção de gás hélio (BET), com o apoio do *software* MicroActive for TriStar II Plus 2.02, e granulometria a laser, utilizando o equipamento modelo S3500, da Microtrac e empregando álcool isopropílico como fluido para os cimentos e água para os MCS.

Tabela 1 – Resultados de FRX dos MCS empregados na pesquisa

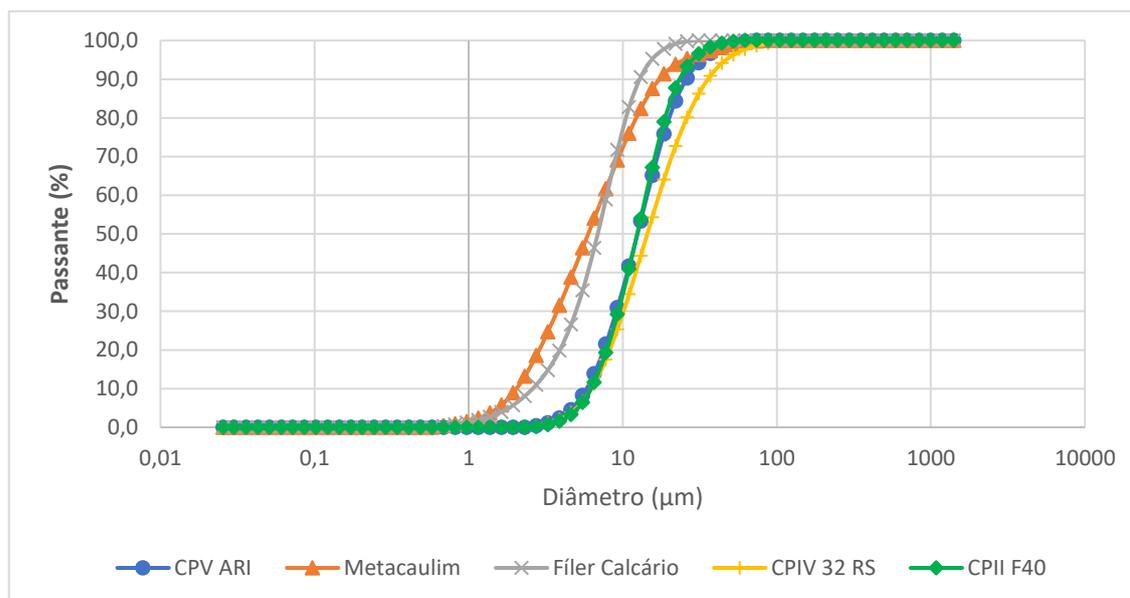
Óxidos	CPII F40	CPV ARI	CPIV 32RS	Metacaulim	Carbonato de Cálcio Moído
CaO (%)	60,07	61,53	39,48	0,04	42,09
SiO ₂ (%)	17,66	17,76	31,52	54,71	12,87
Al ₂ O ₃ (%)	3,28	3,26	10,84	32,76	1,00
Fe ₂ O ₃ (%)	2,92	3,10	5,17	3,84	ND
MgO (%)	4,97	5,22	4,67	0,53	0,16
SO ₃ (%)	2,28	1,91	0,96	0,00	ND
K ₂ O (%)	0,94	0,99	1,29	1,62	0,03
Na ₂ O (%)	0,62	0,84	0,77	0,15	0,81
TiO ₂ (%)	0,25	0,26	0,75	1,69	0,07
SrO (%)	0,13	0,13	0,12	0,00	ND
P ₂ O ₅ (%)	0,12	0,10	0,01	0,25	1,08
MnO (%)	0,08	0,08	0,11	0,00	ND
ZnO (%)	0,02	0,02	0,02	0,00	ND
Cr ₂ O ₃ (%)	0,01	0,01	0,02	0,00	ND
PF (%)	6,66	4,80	4,28	4,41	41,89
Total	100	100	100	100	100

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 – Histograma (a) e curva (b) de distribuição granulométrica dos cimentos e MCS empregados no trabalho



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 2 – Resultados da caracterização física dos cimentos e MCS utilizados na pesquisa

Ensaio	Cimento/MCS					
	CII F40	CPV ARI	CPIV 32 RS	Metacaulim	Carbonato de Cálcio Moído	
BET (m²/g)	1,69	1,44	1,25	20,43	0,77	
Massa Específica (g/cm³)	3,06	3,09	2,72	2,55	2,70	
Análise Granulométrica	D10 (µm)	6,24	5,85	6,28	2,043	2,605
	D50 (µm)	12,43	12,47	14,44	5,97	6,89
	D90 (µm)	23,38	25,87	35,69	17,27	12,90
	DMédio (µm)	13,01	14,93	21,59	11,22	7,84

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda, em relação ao metacaulim, o mesmo material empregado nesta pesquisa foi utilizado por Santos (2019) em seu trabalho. O autor, realizou a determinação do índice de atividade pozolânica e índice de desempenho desse material. Em relação ao índice de atividade pozolânica, Santos (2019) determinou um valor de 711,11 mgCa(OH)₂/g poz, inferior ao valor de 750 mgCa(OH)₂/g poz estipulada pela NBR 15894-2 (ABNT, 2010). O autor destaca que a titulação dos reagentes foi realizada de forma manual, assim sendo pode ter influenciado para a variação nos resultados. Acerca do índice de desempenho, Santos (2019) encontrou um resultado de 116%, superior aos 105% solicitado pela NBR 15894-2 (ABNT, 2010).

3.1.2 Agregado miúdo

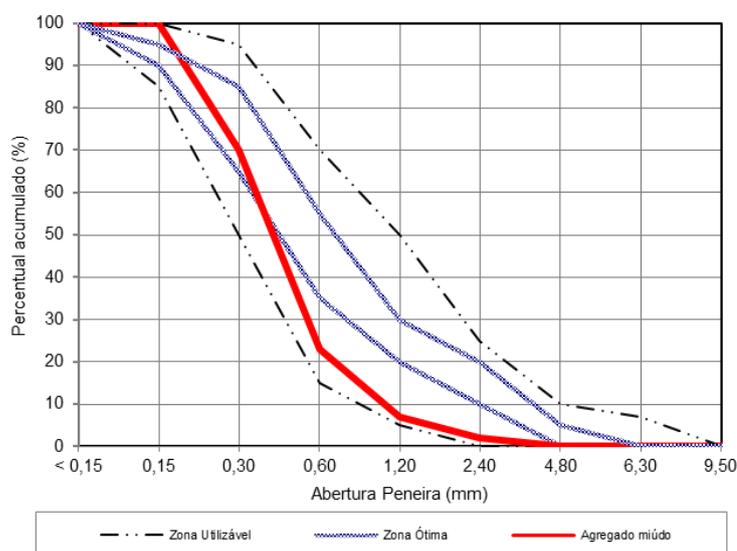
O agregado miúdo empregado nesta pesquisa possui origem natural, de composição quartzosa, fornecido pela Engemix Concretos. Visando evitar grandes variações em sua granulometria o material passou por um processo de peneiramento, no qual foram separadas as suas partículas conforme retidas nas peneiras especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2009). A composição entre cada uma das partículas foi realizada com o intuito de se encaixar dentro dos limites superiores e inferiores da zona utilizável da mesma norma citada. Assim sendo, a composição granulométrica do agregado miúdo empregado na produção das argamassas é apresentada na Tabela 3 e representado graficamente na Figura 28, determinada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022) e contendo um módulo de finura de 2,02.

Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo empregado no estudo

Peneira		Porcentagem	
Nº	mm	de massa retida (%)	de massa cumulada (%)
8	2,40	2,00	2,00
16	1,20	5,00	7,00
30	0,60	16,00	23,00
50	0,30	47,00	70,00
100	0,15	30,00	100,00
	TOTAL	100,00	

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 – Representação gráfica da composição granulométrica



Fonte: Elaborada pelo autor

Além disso, também foi realizado o ensaio de massa específica e massa unitária, conforme NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16972 (ABNT, 2021), respectivamente. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de massa unitária e massa específica do agregado utilizado no estudo

Ensaio	Resultado (kg/m³)
Massa Unitária – Método A	1617,92
Massa Unitária – Método C	1493,73
Massa Específica	2.650,00

Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.3 Aditivo

Levando em consideração os diferentes tipos de cimento que foram utilizados nesta pesquisa, e visando proporcionar uma consistência similar para todas as misturas, foi utilizado aditivo promotor de plasticidade na composição da mistura. Isso decorre, principalmente, da diferença da área superficial das partículas dos diferentes cimentos, podendo acarretar aumento na demanda de água para uma mesma consistência, uma vez que os cimentos envolvidos são mais finos que outros, mantendo, então, a mesma relação água/cimento.

Ainda, Zunino, Martirena e Scrivener (2021) salientam que em função da elevada área superficial da argila calcinada, a trabalhabilidade da mistura pode ser prejudicada. A decisão também foi tomada para que a moldagem dos corpos de prova não fosse prejudicada e pudesse influenciar na formação das fissuras e no processo de autocicatrização.

Assim sendo, o aditivo empregado na mistura foi o POWERFLOW 3700 da marca MC-Bauchemie, sendo classificado pelo próprio fabricante como um aditivo redutor de alto desempenho com densidade de 1,07 kg/L.

3.1.4 Água

A água empregada no estudo foi oriunda da rede de distribuição de São Leopoldo/RS, local onde ficam localizados os laboratórios em que o programa

experimental foi executado, fornecida pelo Serviço Municipal de Água e Esgotos (SEMAE).

3.2 MÉTODOS

Este item irá abordar os métodos empregados para o cumprimento dos objetivos propostos, fornecendo detalhes de como foram executados e as referências bibliográficas que atuaram como base para a tomada de decisões.

3.2.1 Correção da quantidade de carbonato de cálcio moído na composição do LC³

Para a composição ternária do tipo LC³, foi utilizado o LC³-50. O número apresentando após o LC³ indica a porcentagem de clínquer na composição do cimento, assim sendo o LC³-50, classificado por Zunino, Martirena e Scrivener (2021) como a composição de LC³ mais investigada no meio científico, é composto, tipicamente, por 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso.

Visando atender esta composição, foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI) por possuir baixos teores de adições em sua composição, juntamente com o metacaulim e o carbonato de cálcio moído. De forma a entender a quantidade de fíler calcário presente no cimento CPV ARI, com o intuito de descontar da quantidade de calcário moído necessário para a composição do cimento LC³, foi realizado um ensaio semelhante ao da NBR NM 18 (ABNT, 2012).

Duas amostras de aproximadamente 10 gramas permaneceram em uma mufla durante 50 minutos, uma delas na temperatura de 600°C e outra a 900°C. Com isso, foi identificado a presença de 2,78% de fíler calcário na composição do cimento. Assim sendo, para manter a quantidade de cada material do cimento LC³-50, já informada anteriormente, foi necessário utilizar 58,71% do cimento CPV ARI, 11,52% de calcário moído e 30% de metacaulim.

3.2.2 Especificação dos traços

O traço empregado no estudo foi proposto levando em consideração uma relação entre aglomerante e agregado de 1:2 (uma parte de cimento para duas partes de agregado miúdo). Essa relação foi adotada com o intuito de possibilitar maior quantidade de aglomerante na composição final, facilitando a ocorrência do processo de autocicatrização. Em relação a umidade da mistura, foi mantido o teor de 12% proposto pela NBR 7215 (ABNT, 2019), resultado misturas com uma relação água/cimento de 0,36. A Tabela 5 apresenta os traços unitários propostos.

Tabela 5 – Traços unitários propostos para o estudo

Traço	Traço Unitário (aglomerante:agregado miúdo)	Relação água/cimento
T-LC ³	1:2	0,36
T-F40	1:2	0,36
T-CPIV	1:2	0,36

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme citado anteriormente, o agregado miúdo foi separado em faixas granulométricas através de peneiramento para evitar variações granulométricas nas misturas avaliadas. Assim sendo, os traços em massa, levando em consideração as proporções definidas de cada fração granulométrica, são apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Traços em massa empregados no estudo

Material	T-LC³ (g)	T-F40 (g)	T-CPIV (g)
Cimento	2838	4834	4834
Metacaulim	1450	-	-
Carbonato de Cálcio Moído	557	-	-
Agregado Miúdo Retido na Peneira 2,4mm	193	193	193
Agregado Miúdo Retido na Peneira 1,2mm	483	483	483
Agregado Miúdo Retido na Peneira 0,6mm	1547	1547	1547
Agregado Miúdo Retido na Peneira 0,3mm	4544	4544	4544
Agregado Miúdo Retido na Peneira 0,15mm	2900	2900	2900
Água	1740	1740	1740
Aditivo	91,22	15,32	15,59

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.3 Produção das misturas de argamassa

Em razão do volume de corpos de prova a serem moldados no estudo optou-se pela utilização de um misturador manual elétrico para a mistura da argamassa. A mistura foi executada dentro de um balde plástico devidamente higienizado, sendo os materiais adicionados de acordo com a seguinte ordem: água, cimento, agregado miúdo e aditivo.

A mistura iniciou primeiramente entre a água e o cimento por 1 minuto e 30 segundos e, após, o agregado miúdo foi adicionado lentamente durante um intervalo de tempo de 5 minutos. Por fim foi adicionado o aditivo promotor de plasticidade e misturado por 1 minuto até atingir a consistência desejada.

3.2.4 Determinação do índice de consistência

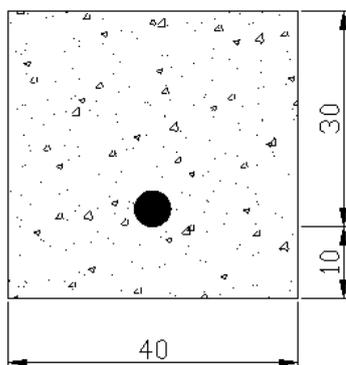
Conforme descrito anteriormente, as argamassas produzidas sofreram ajustes através do empregado de aditivo promotor de plasticidade, com o intuito de todos os traços executados possuírem mesma condição de moldagem, evitando possíveis variações que poderiam impactar na formação das fissuras. Neste contexto, foi executado o ensaio de determinação do índice de consistência, conforme prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016), visando obter o valor que se caracteriza a consistência de cada argamassa produzida.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Para a execução do ensaio de resistência à compressão, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm diâmetro por 100 mm de altura, seguindo o prescrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

Visando avaliar o mecanismo de autocicatrização, moldou-se corpos de prova prismáticos com 40x40x160 mm de dimensões, de acordo com os procedimentos indicados na NBR 13279 (ABNT, 2005). Esse tipo de corpo de prova foi destinado a fissuração para avaliar a autocicatrização através do ensaio de absorção de água por capilaridade e microscopia ótica. Para garantir que o corpo de prova não sofresse colapso durante a fissuração, foi incorporado uma barra de aço CA 60 a 1 cm da base do corpo de prova, conforme executado no estudo de Mello (2019).

Figura 29 – Representação da seção transversal do corpo de prova moldado com dimensões em milímetros



Fonte: Elaborada pelo autor

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.

3.2.6 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos foram curados, até atingirem a idade especificada para a execução do ensaio de resistência à compressão, submersos em água saturada de cal, conforme indica a NBR 7215 (ABNT, 2019).

As amostras prismáticas, destinadas à avaliação da autocicatrização, foram submetidas ao processo de cura, por um período de 7 dias, em câmara úmida, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). Finalizada esta etapa, as amostras passaram pelo processo de indução de fissuras. Posteriormente os corpos de prova foram destinados às duas condições de exposição analisadas neste trabalho: submersa em água e ciclos de molhagem e secagem. Para o ciclo de molhagem e secagem foi considerado um período de 7 dias das amostras submersas em água e, posteriormente, 7 dias em local com temperatura e umidade controladas.

De Belie *et al.* (2018) e Tittelboom e De Belie (2013) destacam que a água é um gatilho necessário para que ocorra a autocicatrização autógena. Neste sentido optou-se pela utilização de manter os espécimes moldadas submersas em água, promovendo o cenário ideal para que ocorra o fenômeno, principalmente em decorrência de cimento não hidratado. Além disso, também se submeteu os corpos de prova à ciclos de molhagem e secagem, uma vez que além da água, também

possibilita o contato com o CO₂, que pode desencadear a precipitação do CaCO₃, mecanismo classificado como mais eficiente em termos de autocicatrização (DANISH; MOSABERPANA; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.*, 2018; RILEM 221-SHC, 2013).

3.2.7 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio foi executado nas idades de 7 dias, 28 dias e 63 dias, conforme prescrição da NBR 7215 (ABNT, 2019), sendo que em cada uma delas foram submetidos 4 corpos de prova, totalizando 12 espécimes para cada relação água/cimento e tipo de cimento avaliados. Este ensaio foi utilizado com o intuito de avaliar a diferença de resistência entre os diferentes cimentos empregados no estudo, visando, principalmente, identificar em que patamar o cimento LC³ se encontra em relação aos cimentos já normatizados, em relação ao seu desempenho mecânico.

3.2.8 Fissuração dos corpos de prova

A fissuração dos corpos de prova deu-se através do ensaio de tração na flexão em 3 pontos, conforme indicado pela NBR 13279 (ABNT, 2005), após 7 dias de cura dos corpos de prova. A idade foi escolhida em função de idades iniciais de fissuração serem mais favoráveis à ocorrência do mecanismo autogênico, em função da maior probabilidade da presença de cimento não hidratado (DANISH; MOSABERPANA; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.*, 2018; SNOECK, 2015). Conforme apresentado anteriormente, no item 2.1.3 deste trabalho, essa forma de indução de fissuras é observada em diversas pesquisas, sendo classificada como comum. A aplicação de carga durante o ensaio foi realizada até que fossem notadas fissuras em sua superfície, utilizando uma velocidade de carga de 0,004 mm/s, garantindo a não ocorrência do colapso total do corpo de prova.

Figura 30 – Processo de fissuração dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.9 Avaliação da autocicatrização

Em se tratando da análise da autocicatrização foram utilizadas duas formas de avaliação: absorção de água por capilaridade e análise visual através de microscopia ótica. Publicações recentes também utilizam os ensaios mencionados, conforme já foi abordado no item 2.1.3 desta pesquisa.

3.2.9.1 Absorção de água por capilaridade

Para avaliar a absorção de água por capilaridade adaptou-se o método proposto pela RILEM TC 116-PCD (1999). O ensaio consiste em selar a amostra, evitando a absorção de umidade presente no ar, e expor uma única face da amostra à uma lâmina de água, com altura constante. A partir disso é possível relacionar a absorção de água, através da massa da amostra, e a área exposta. O ensaio foi executado na idade de 63 dias.

Ao final do ensaio, também foi feita a lixiviação dos produtos formados na fissura, utilizando ácido clorídrico, para avaliar o corpo de prova antes e depois da autocicatrização, conforme executado por Mello (2019). Cabe destacar que nessa etapa não foi realizado um banho de ácido no corpo de prova inteiro, afim de manter sua integridade. O ácido foi aplicado com um conta-gotas diretamente na fissura visível e espalhado com o auxílio de um pincel.

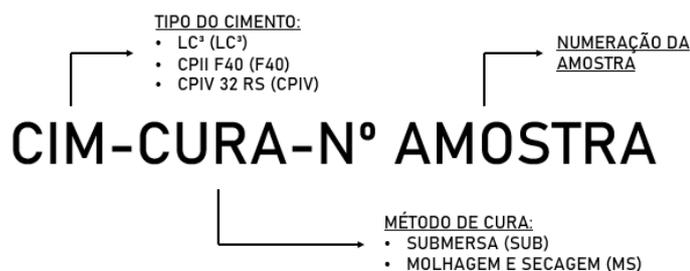
3.2.9.2 Análise visual por microscopia

Com o intuito de visualizar e registrar o processo de autocicatrização das amostras, utilizou-se microscópicos que possibilitam a ampliação e registro de imagens. O equipamento utilizado para tal finalidade foi escolhido justamente por possuir um retículo em sua lente, fato esse que facilitou a definição de uma medida referência para mensuração das fissuras. Os registros ocorreram nas idades de 7, 14, 28 e 63 dias. Além disso, foi avaliado a espessura máxima cicatrizada no corpo de prova, utilizando o retículo do microscópio e o *software* CorelDRAW.

Cabe destacar que para cada uma das amostras determinou-se uma fissura pra fazer esse acompanhamento, uma vez que é inviável fazer o registro de todas as fissuras de um corpo de prova, principalmente levando em consideração microfissuras que não são possíveis de serem observadas através do microscópio.

De forma a facilitar o entendimento dos resultados de registro visual do acompanhamento da autocicatrização adotou-se um sistema de nomenclatura, o qual está ilustrado e explicado na Figura 31.

Figura 31 – Sistema de nomenclatura utilizada para facilitar o entendimento dos resultados



Fonte: Elaborada pelo autor

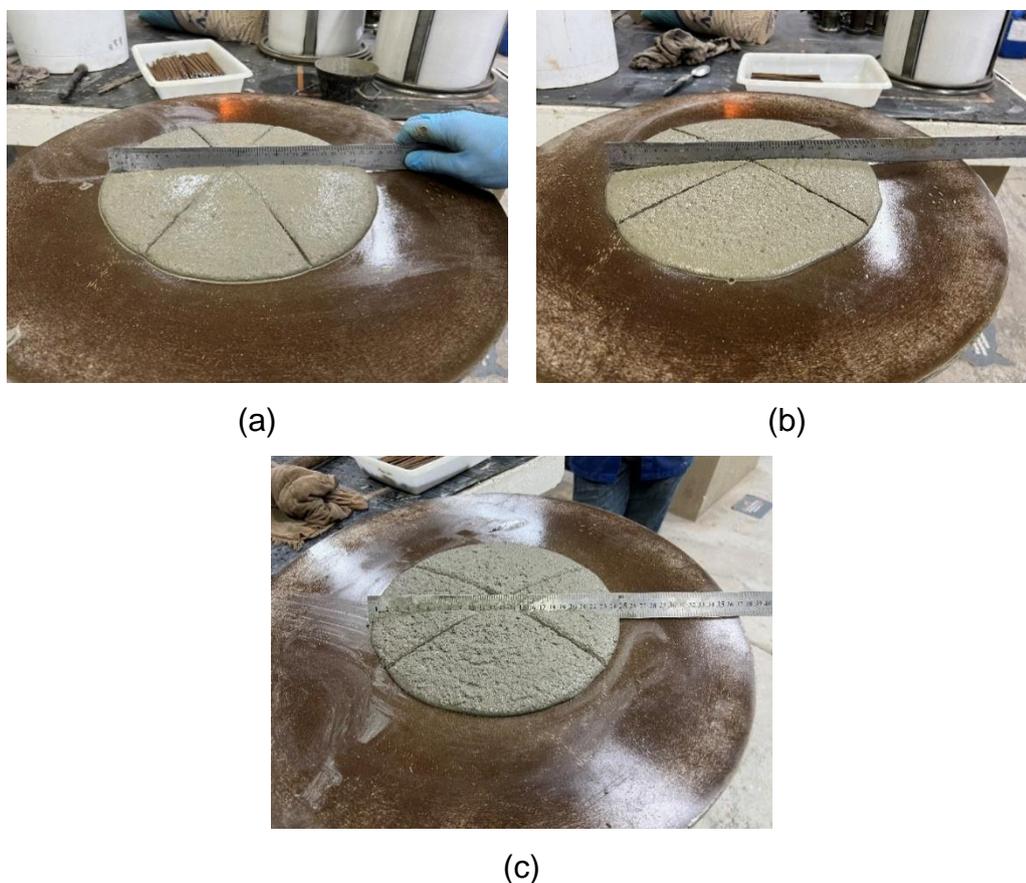
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o ensaio de determinação do índice de consistência, sendo que na Figura 32 é apresentado o aspecto visual das argamassas produzidas e na Tabela 7 os valores finais obtidos no ensaio. Conforme destacado anteriormente, o ensaio foi executado de forma a proporcionar condições de moldagem semelhantes para todos os cimentos avaliados.

O maior índice de consistência foi para o traço que contou com a utilização do cimento CII F40, com um valor médio de 277mm. Por outro lado, o menor valor de consistência foi para o traço contendo o cimento CIV 32 RS, com um valor médio de 250mm. O traço que teve a incorporação do cimento ternário do tipo LC³ dispôs de um resultado médio, intermediário entre os outros dois cimentos, de 264mm.

Figura 32 – Registro do ensaio de índice de consistência do: (a) T-LC³, (b) T-F40 e (c) T-CIV



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 7 – Resultados do ensaio de índice de consistência

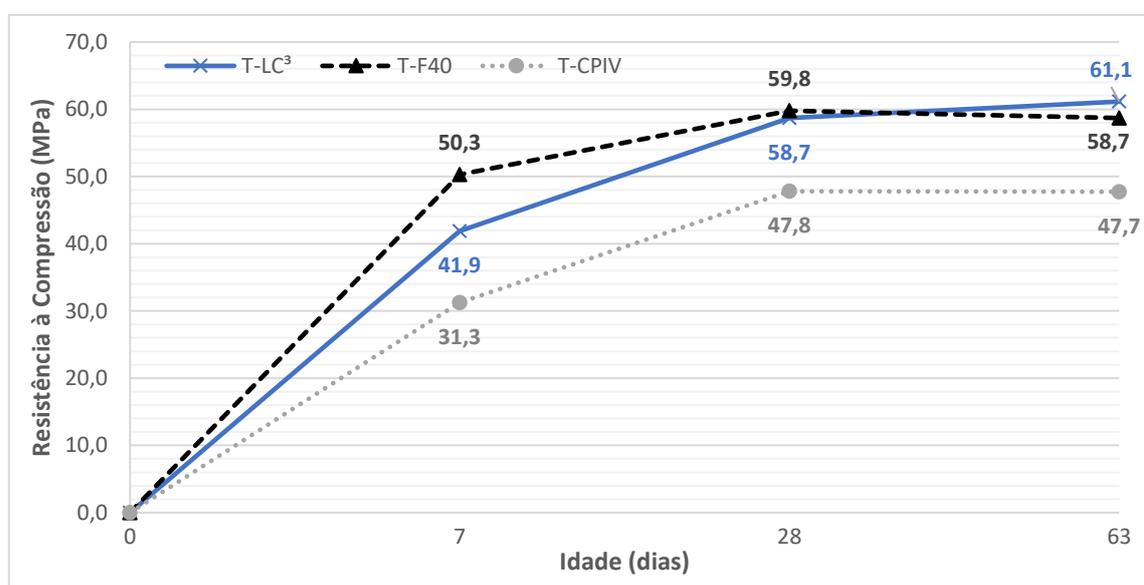
Traço	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Diâmetro médio arredondando para o número inteiro mais próximo (mm)
T-LC ³	260	270	260	264
T-F40	280	280	270	277
T-CPIV	250	250	250	250

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão são apresentados na Figura 33. Os valores apresentados foram calculados de acordo com o que a NBR 7215 (ABNT, 2019) prescreve, desconsiderando as resistências com diferença de mais de 6% em relação à média aritmética dos 4 corpos de prova avaliados, tanto para mais, quanto para menos.

Figura 33 – Resultados do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos resultados obtidos é possível analisar que em 7 dias o cimento que apresentou maior resistência entre os três avaliados é o CII F 40, sendo 16,7% superior em relação ao LC³ e 37,8% em relação ao CPIV 32 RS. Esse comportamento está em desacordo com grande parte da literatura, em que o cimento LC³ costuma apresentar resistências superiores quando comparado aos demais cimentos, já na

idade de 3 dias (FRÖHLICH, 2019; SHARMA *et al.*, 2021; ZUNINO; MARTIRENA; SCRIVENER, 2021).

Uma possível explicação a esse comportamento pode estar ligada ao fato da necessidade de uma quantidade muito superior do aditivo superplastificante para a composição ternária do tipo LC³. Nair *et al.* (2020) citam em seu estudo que maiores dosagens de aditivo para o LC³ são decorrentes do maior consumo do aditivo pelas partículas de argila calcinada, provocando alterações no tempo de pega e inibindo o desenvolvimento de resistência inicial. Ainda, Lei *et al.* (2022) destacam que para esse tipo de cimento é necessário utilizar aditivos próprios, uma vez que a argila calinada impacta fortemente na ação desse produto químico.

Outro fator que pode ter influenciado nesse comportamento é a quantidade de clínquer presente na composição do cimento. Levando em consideração o resultado de perda ao fogo do CPII F40, de 6,6%, é possível entender que ele dispõe de aproximadamente 85% de clínquer em sua composição, quantidade muito superior aos, aproximadamente, 45% de clínquer do cimento LC³. Tal cenário também pode ter influenciado na formação da resistência inicial.

Embora possuam grandes quantidades de adições na sua composição, o cimento LC³ apresentou uma resistência superior em 25,3%, aos 7 dias, em relação ao CPIV 32 RS. Zunino, Martirena e Scrivener (2021) e Dhandapani *et al.* (2018) destacam que esse comportamento está relacionado à maior reatividade que o matecaulim possui quando comparado com as pozolonas comumente empregadas na composição dos cimentos compostos.

Embora estivesse com um comportamento inferior na primeira idade analisada, o cimento LC³, aos 28 dias, já estava num patamar muito semelhante ao CPII F40, estando em de acordo com o que bibliografia muitas vezes observa. Esse padrão é destacado no estudo de Dhandapani *et al.* (2018), que encontraram resultados semelhantes entre o cimento ternário comparados a diferentes cimentos na mesma idade. Além disso, os autores citados também concluíram que o LC³ dispõe de resistências maiores do que os cimentos que possuem altos teores de pozolona em sua composição, conforme visto na comparação entre a composição ternária de LC³ e o CPIV 32 RS, com uma diferença de 18,5% entre eles.

A última idade analisada no presente estudo foi a de 63 dias. É possível observar que nos 3 cimentos estudados não foi notado um crescimento considerável entre a idade de 28 dias e a de 63 dias. Em relação ao cimento CPII F 40 esse

comportamento era esperado em função da sua composição, que não dispõe de pozolona, assim sendo seu crescimento de resistência é justamente em idades iniciais (ABNT, 2018). Barbalho, Silva e Rêgo (2020) e Lins (2017) avaliaram uma composição ternária semelhante ao desse trabalho e encontraram um comportamento compatível com o observado. Por outro lado, o cimento CPIV 32 RS não apresentou nenhum tipo de incremento de resistência, fato esse inesperado uma vez que as pozolanas proporcionam ganhos de resistência em idades mais avançadas, dada a cinética da reação pozolânica.

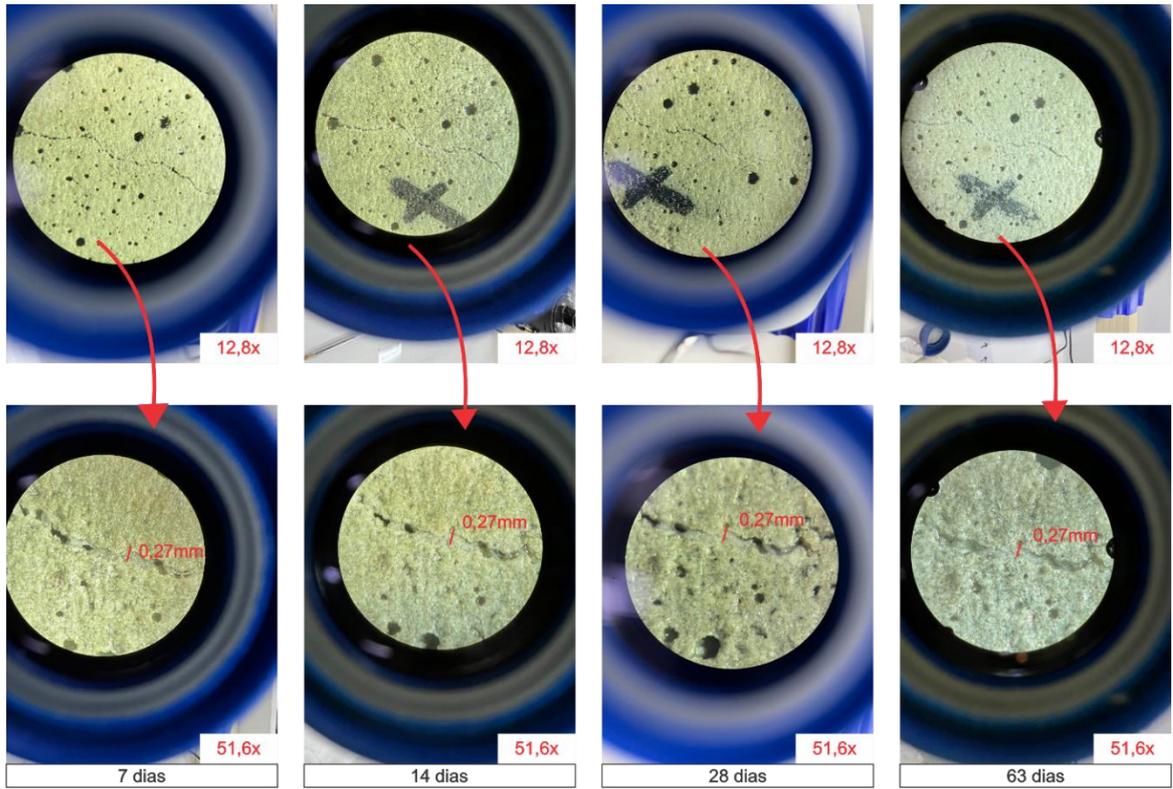
4.3 AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO

4.3.1 Análise visual por microscopia

Este item foi desenvolvido com o intuito de apresentar a análise visual do processo de cicatrização das fissuras.

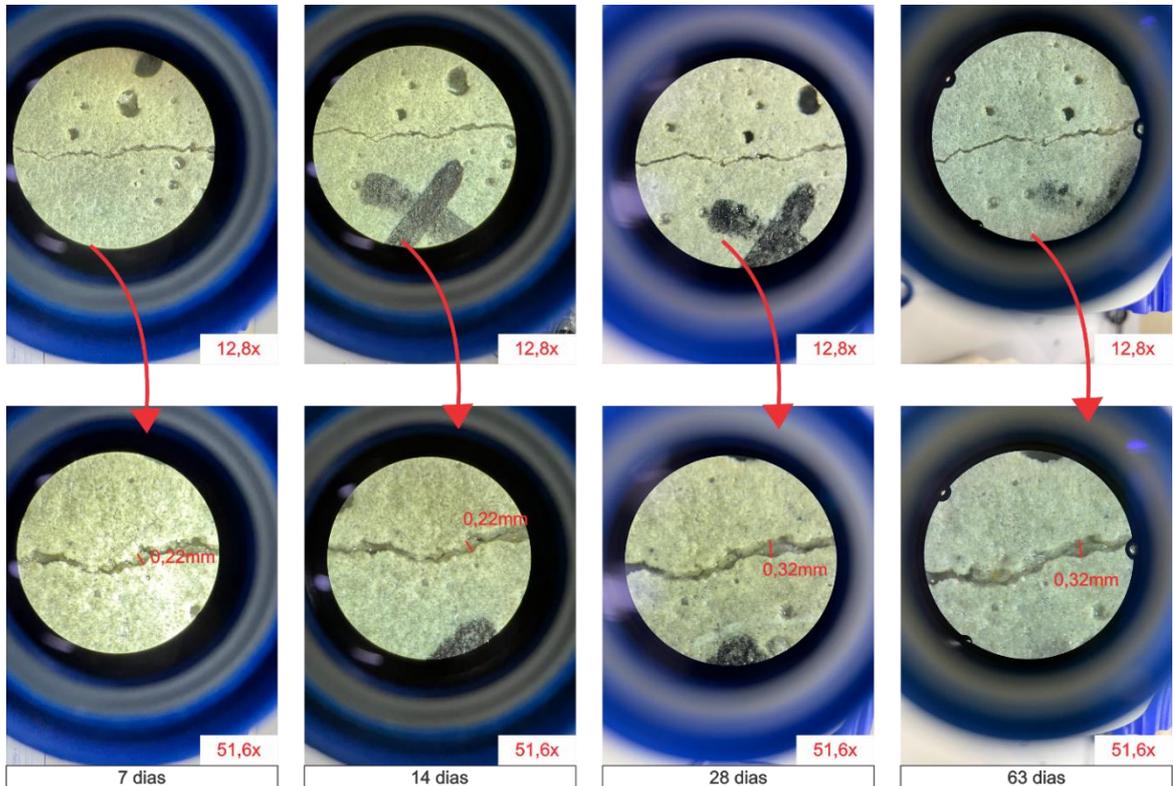
Na Figura 34, Figura 35 e Figura 36 é apresentado o acompanhamento da autocicatrização do cimento CPIV 32RS submetido à cura submersa. A partir delas é possível que já aos 7 dias de cura após fissuração era possível visualizar uma espessura cicatrizada. Com exceção da amostra CPIV-SUB-2, é notável ao longo do tempo também a continuidade do processo de cicatrização, em que os produtos precipitados não se mantiveram somente em um ponto em específico da fissura.

Figura 34– Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-1



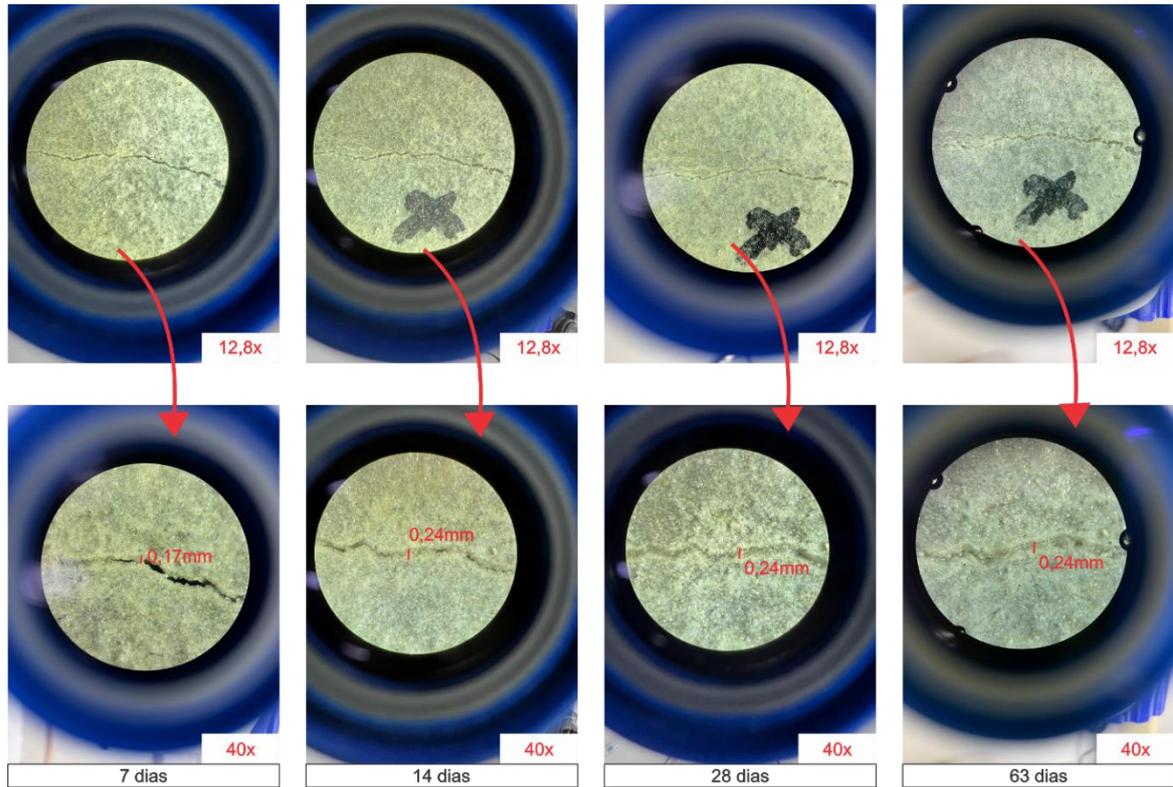
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 – Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-2



Fonte: Elaborada pelo autor

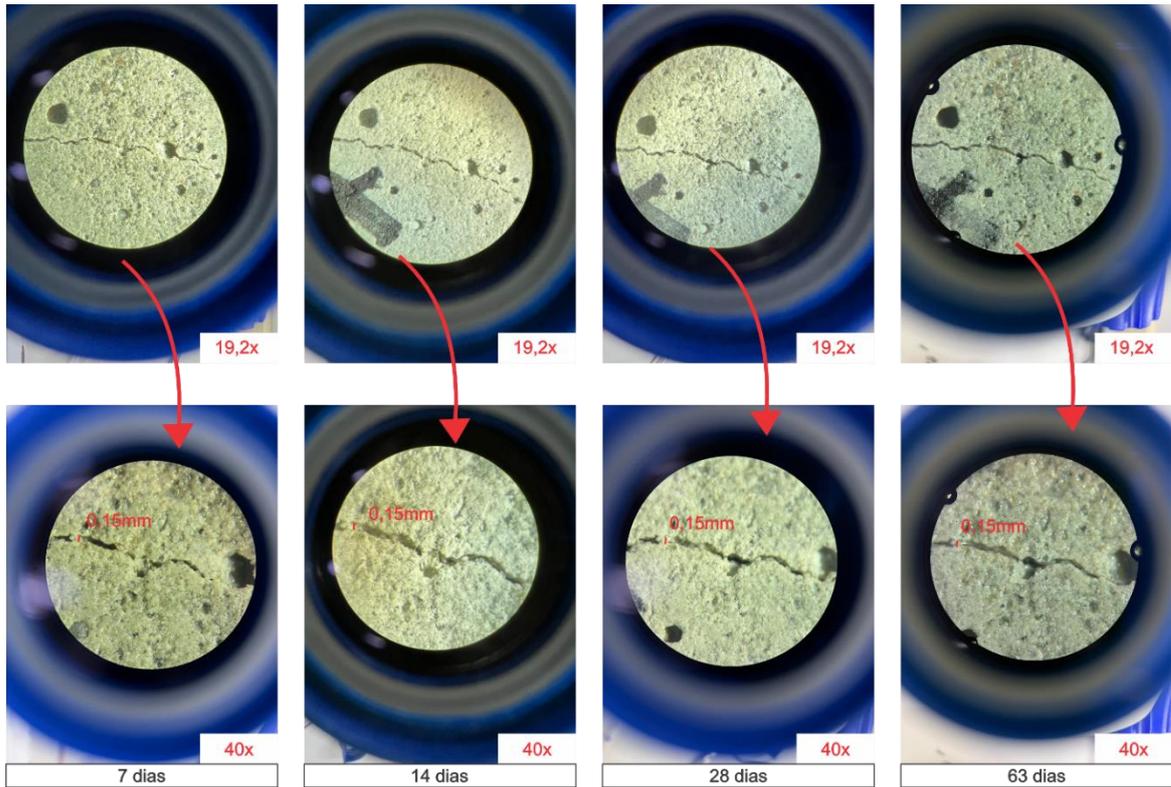
Figura 36 – Autocicatrização da amostra CPIV-SUB-3



Fonte: Elaborada pelo autor

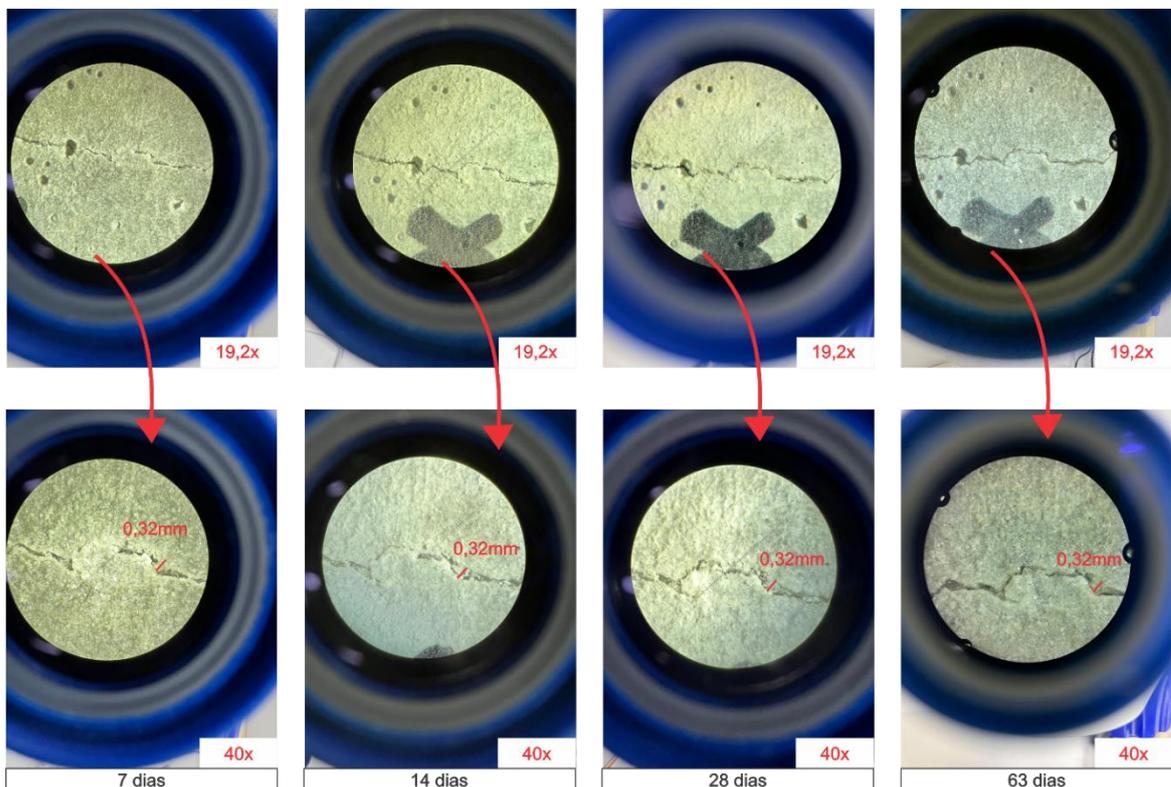
A seguir são apresentadas 3 figuras em sequência que ilustram o processo de autocicatrização, também com o cimento CPIV 32 RS, entretanto utilizando como forma de cura o procedimento de molhagem em secagem. Assim como na cura submersa, em 7 dias após indução da fissura já foram notados pontos de cicatrização, entretanto é possível notar que em todas as amostras o fenômeno foi pontual, não sendo algo observado ao longo de todo o comprimento da fissura.

Figura 37 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-1



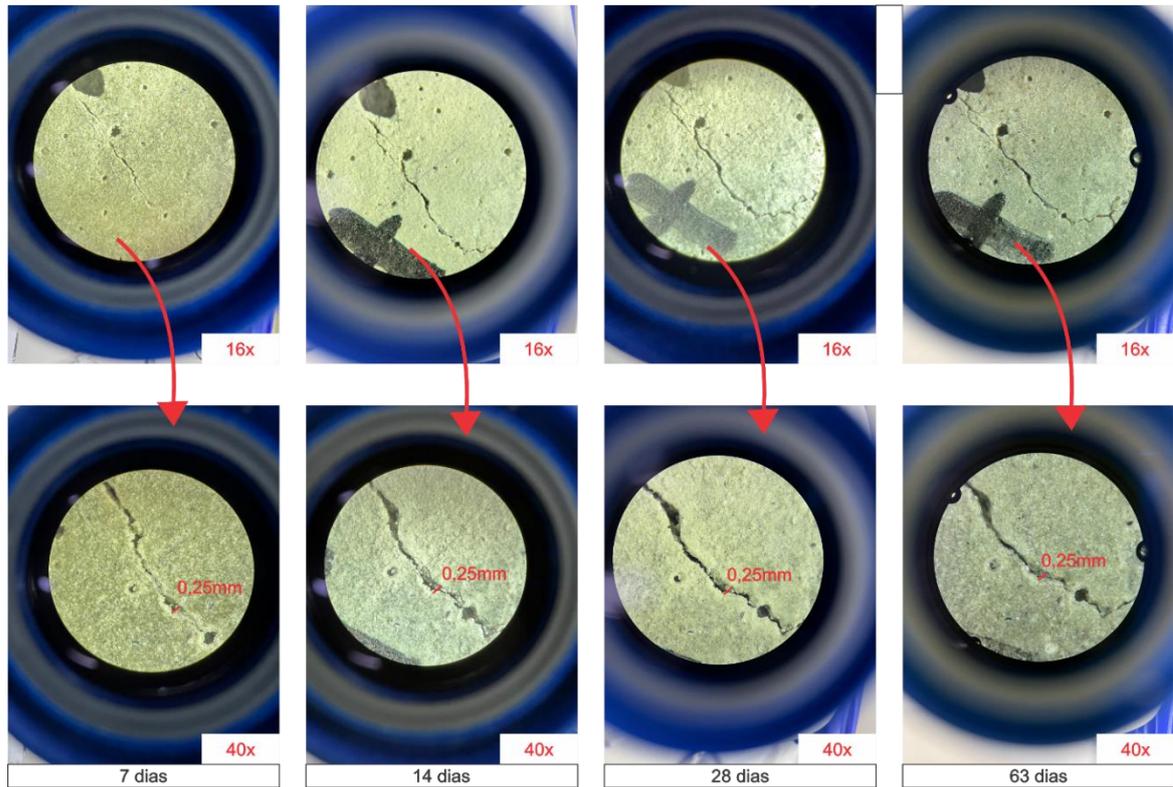
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 38 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-2



Fonte: Elaborada pelo autor

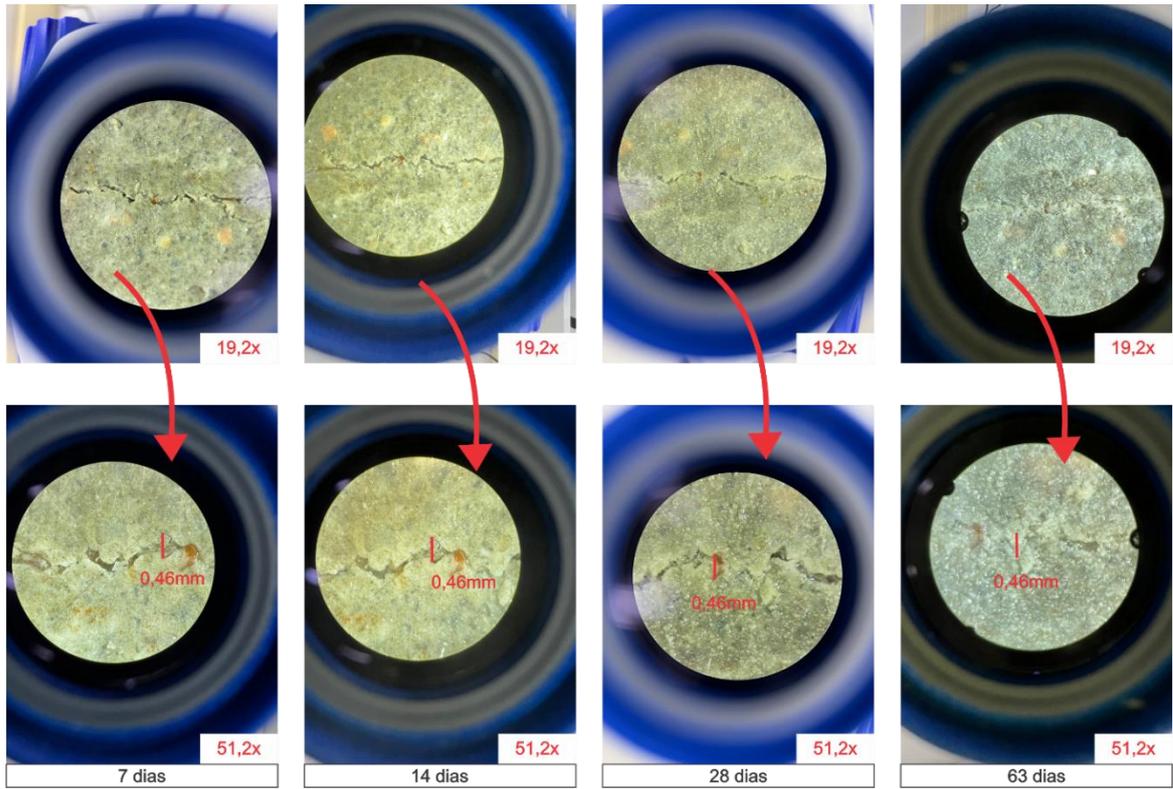
Figura 39 – Autocicatrização da amostra CPIV-MS-3



Fonte: Elaborada pelo autor

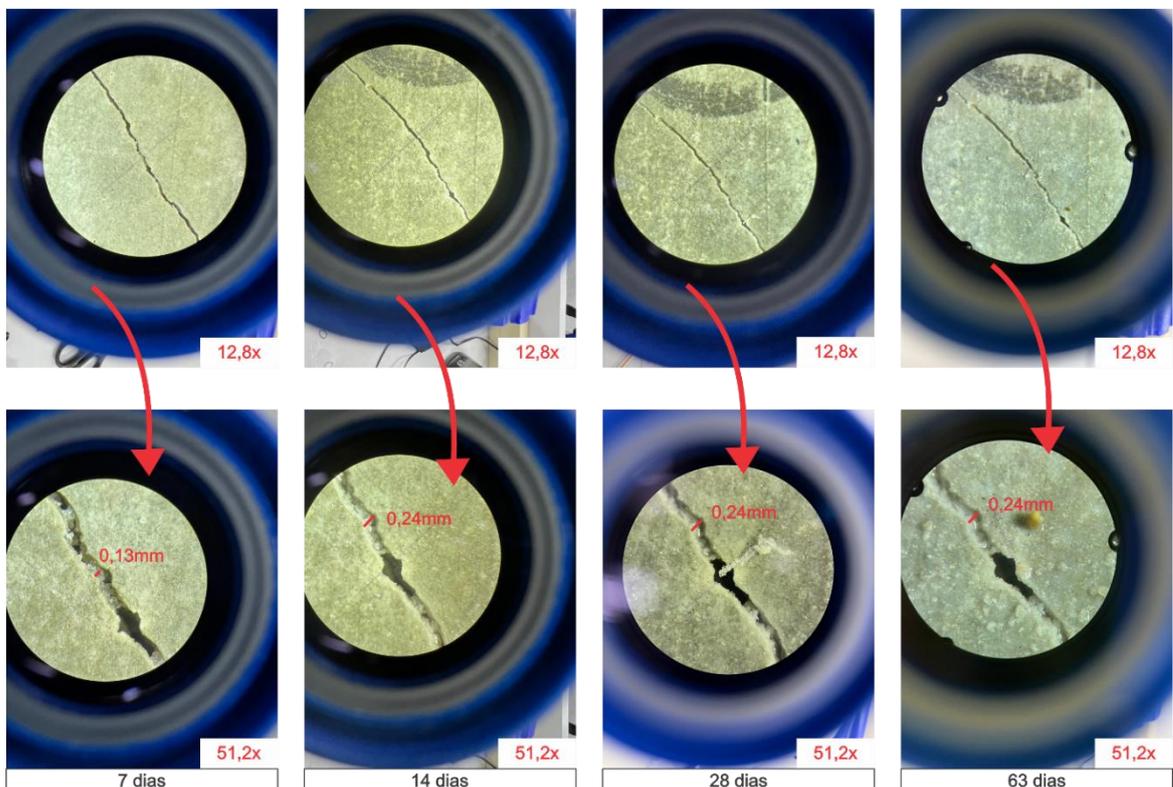
Assim como nas demais amostras já apresentadas, o traço que contou com o emprego do cimento CII F40, já apresentava locais de cicatrização em 7 dias na cura submersa, posterior ao procedimento de fissuração. Na Figura 40, Figura 41 e Figura 42 é possível visualizar que o processo se desenvolveu ao longo do tempo, isto é, que a cicatrização avançou ao longo da fissura (e talvez em profundidade também).

Figura 40 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-1



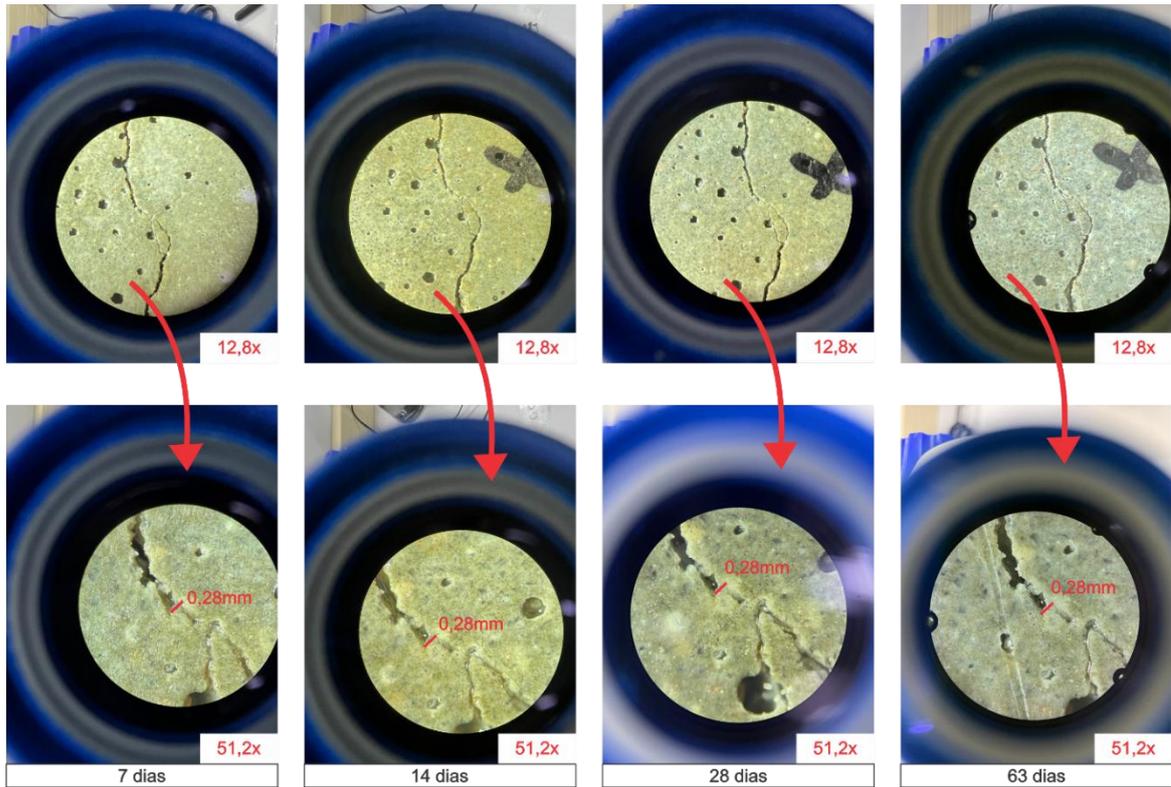
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 41 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-2



Fonte: Elaborada pelo autor

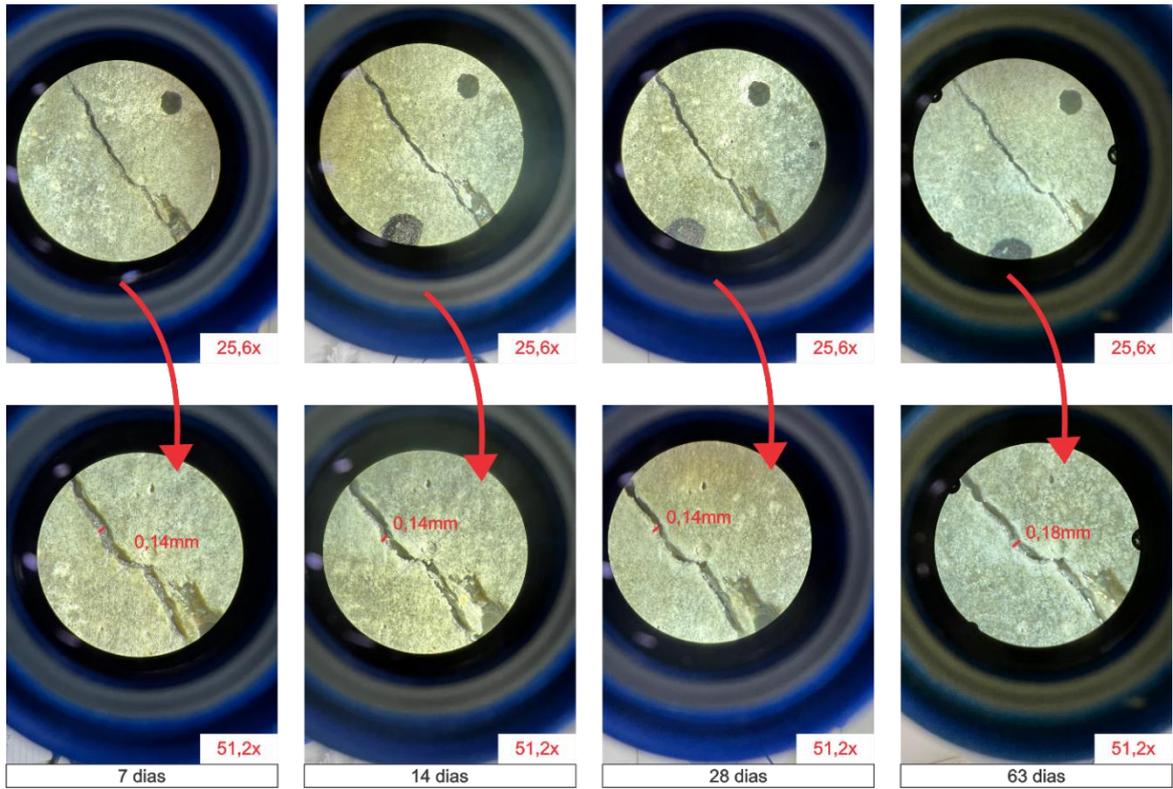
Figura 42 – Autocicatrização da amostra F40-SUB-3



Fonte: Elaborada pelo autor

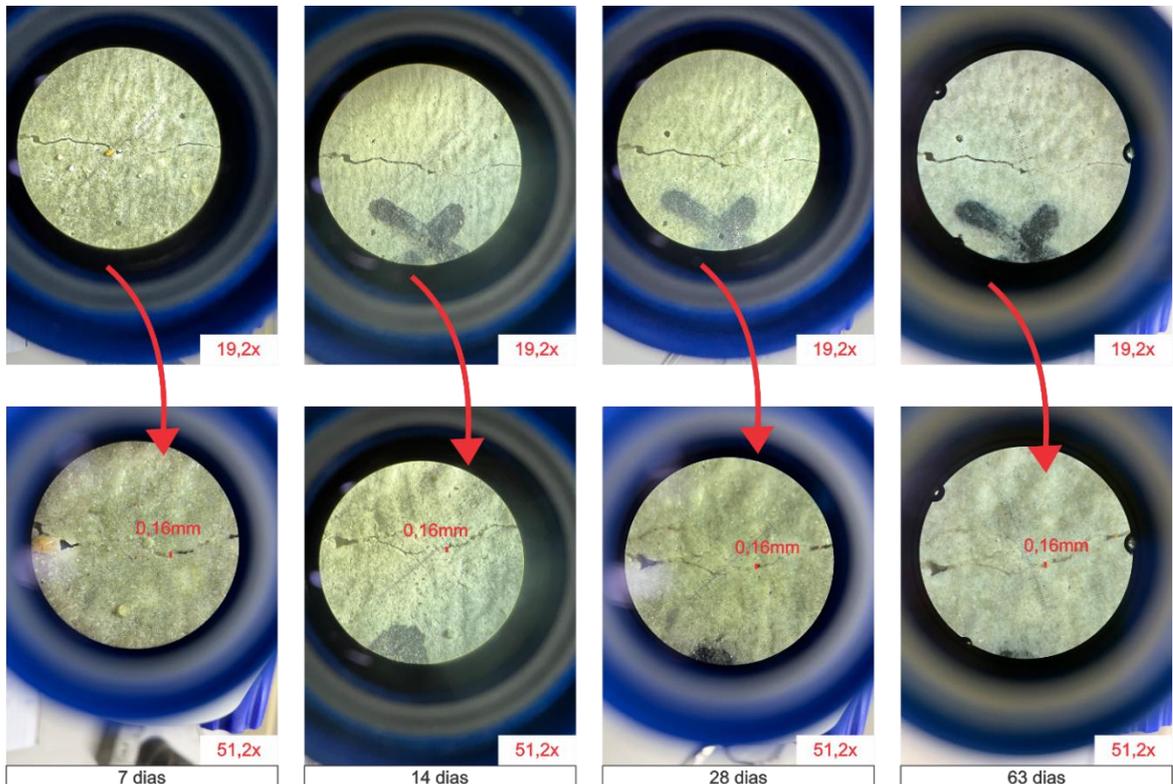
Quando submetido ao procedimento de cura por molhagem e secagem é possível notar que a concentração dos produtos formados pelo cimento CII F40 se manteve de forma pontual, mesma tendência identificada no mesmo procedimento de cura, entretanto com o cimento CIV 32RS. Assim como nas demais amostras, para esse traço e forma de cura também foi visto que já aos 7 dias ocorria o fenômeno de autocicatrização.

Figura 43 – Autocicatrização da amostra F40-MS-1



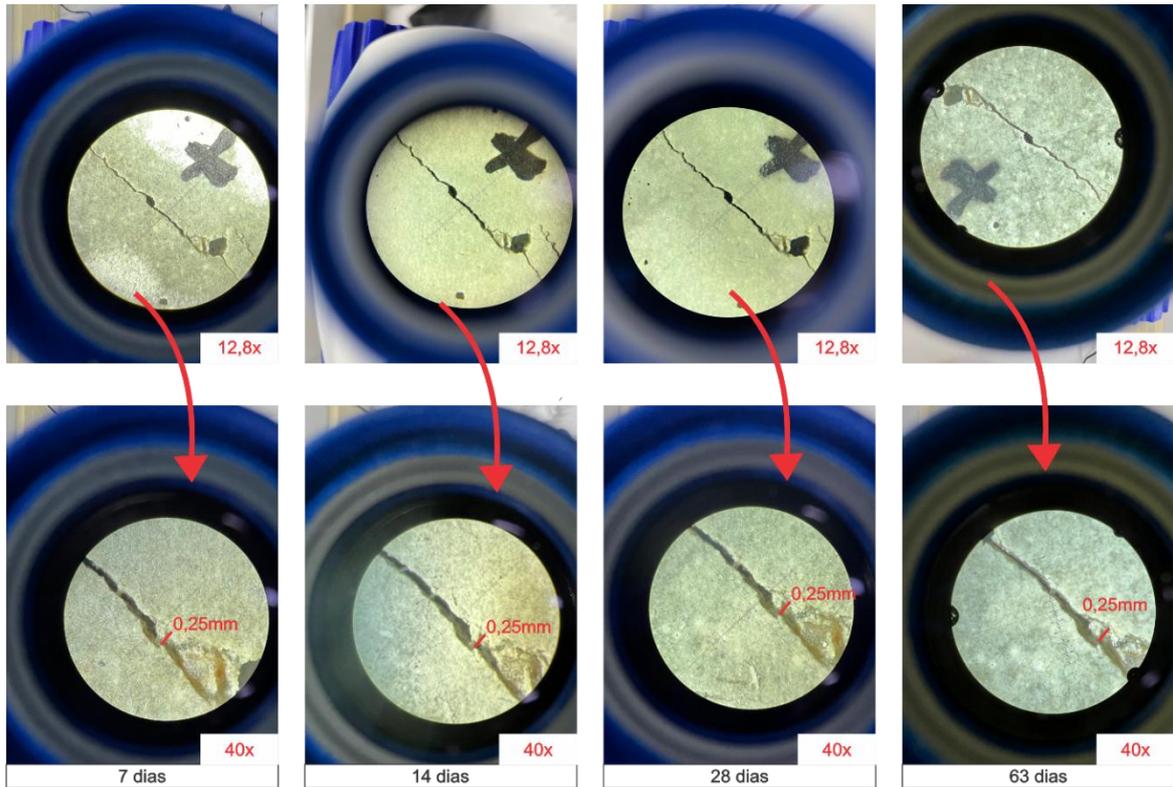
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 44 – Autocicatrização da amostra F40-MS-2



Fonte: Elaborada pelo autor

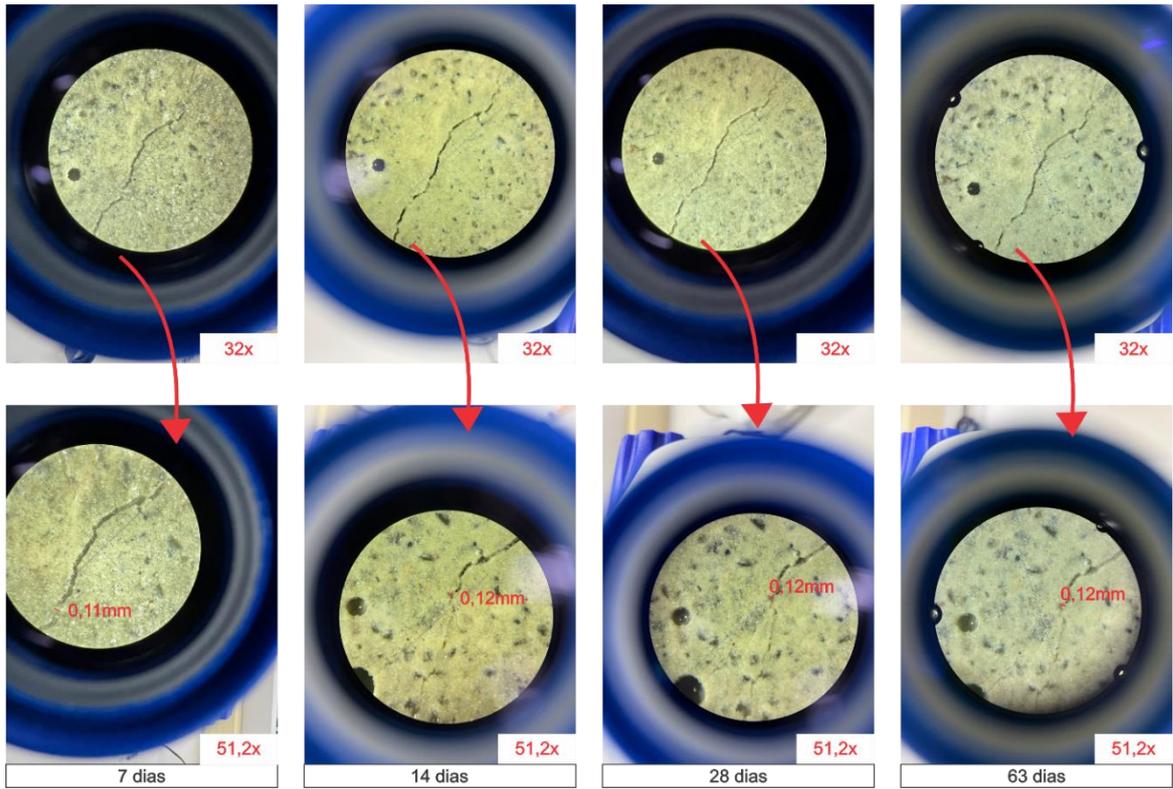
Figura 45 – Autocicatrização da amostra F40-MS-3



Fonte: Elaborada pelo autor

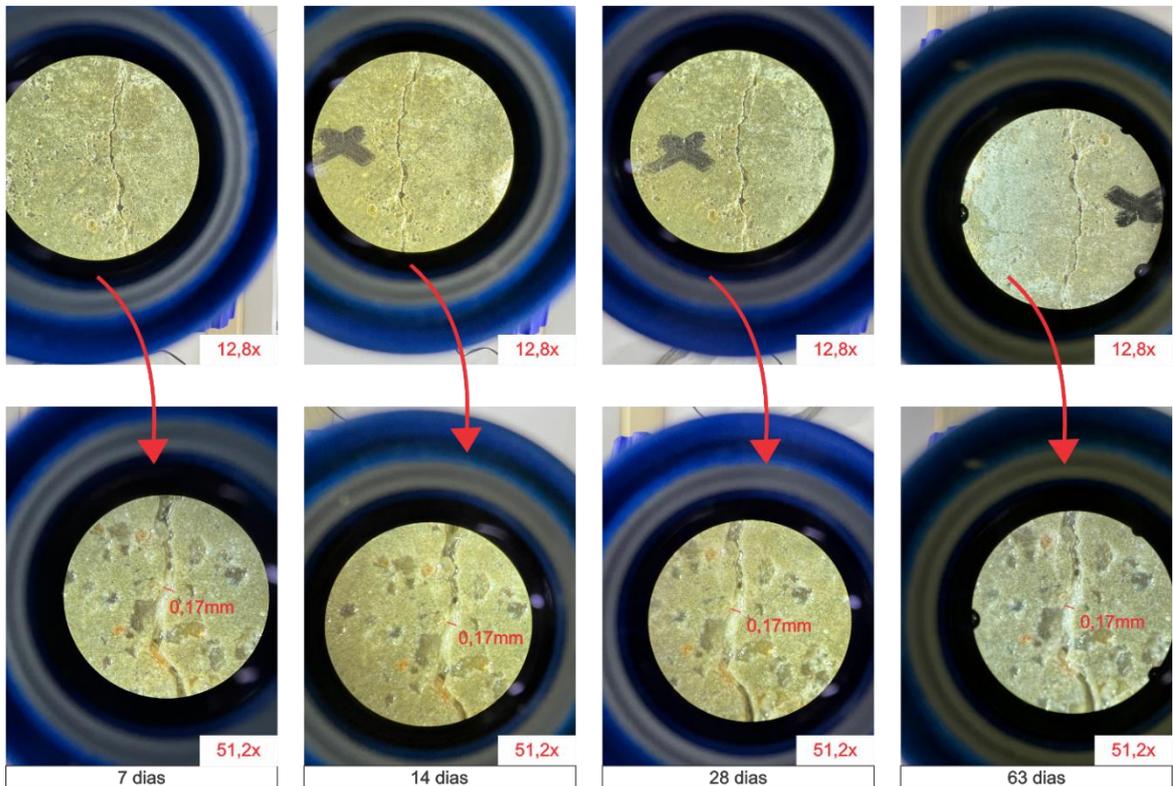
Em se tratando do cimento ternário do tipo LC³, a Figura 46, a Figura 47 e a Figura 48 ilustram o processo de cicatrização quando as amostras foram submetidas à cura de forma submersa. Assim como já visto anteriormente, em 7 dias já foram identificadas precipitações na superfície da fissura, podendo, ainda, observar que esse processo continuou ocorrendo ao longo do comprimento, conforme avanço das idades de análise.

Figura 46 – Autocicatrização da amostra LC³-SUB-1

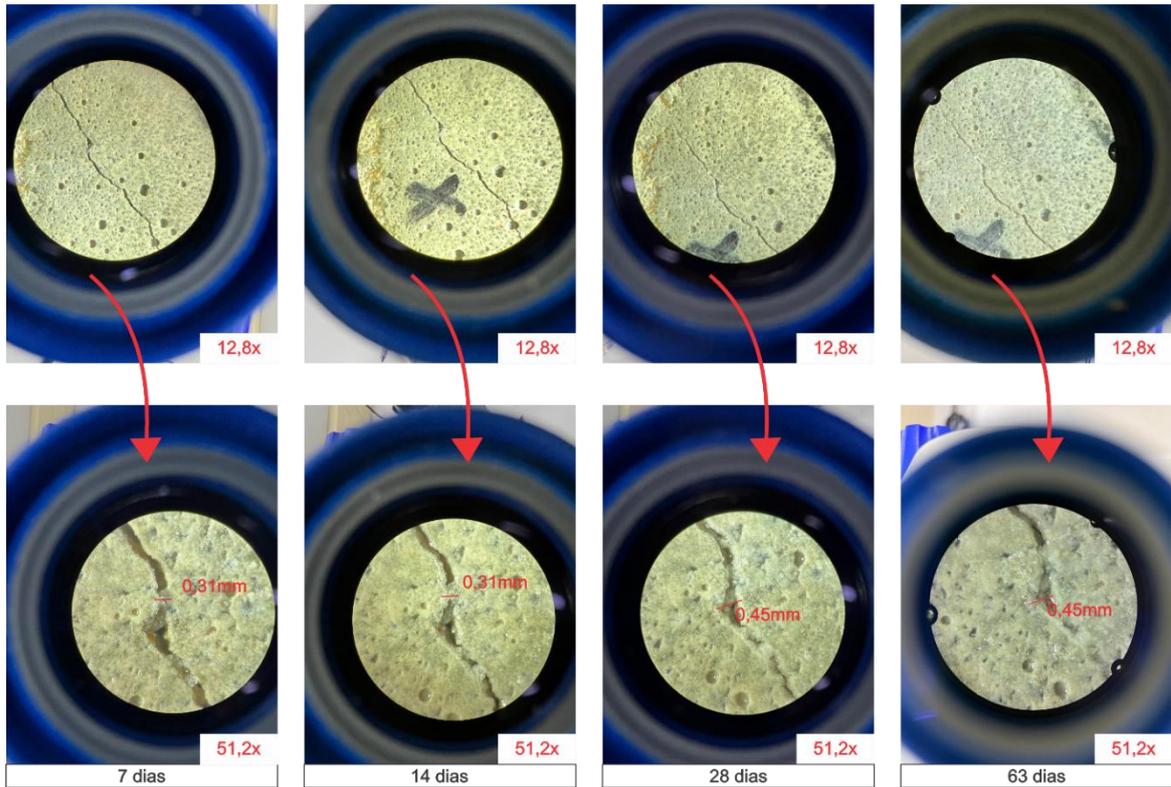


Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 47 – Autocicatrização da amostra LC³-SUB-2

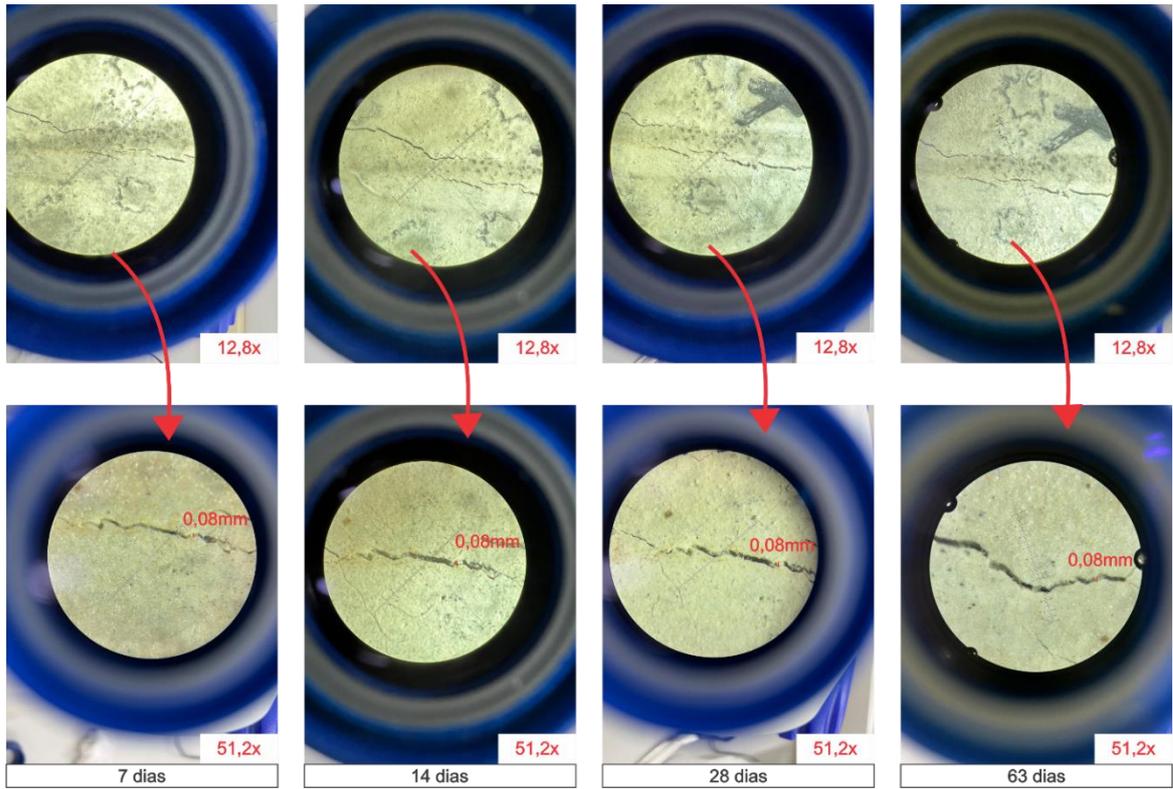


Fonte: Elaborada pelo autor

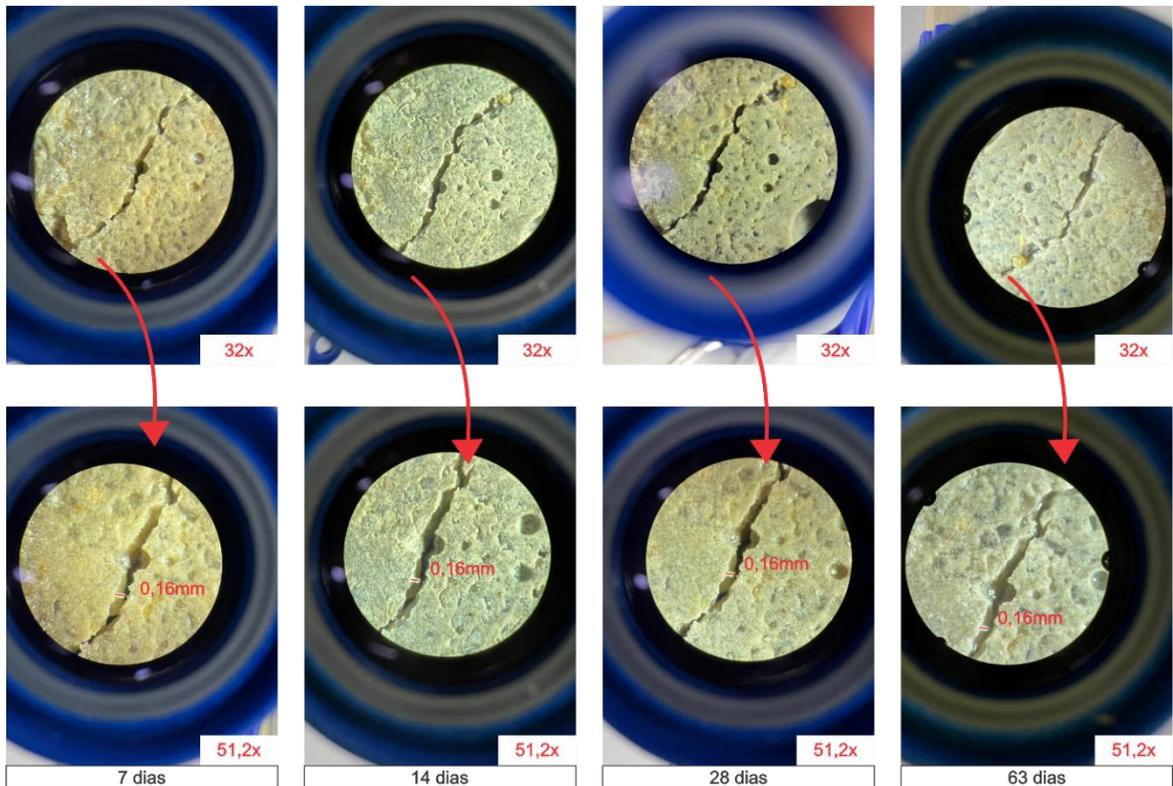
Figura 48 – Autocicatrização da amostra LC³-SUB-3

Fonte: Elaborada pelo autor

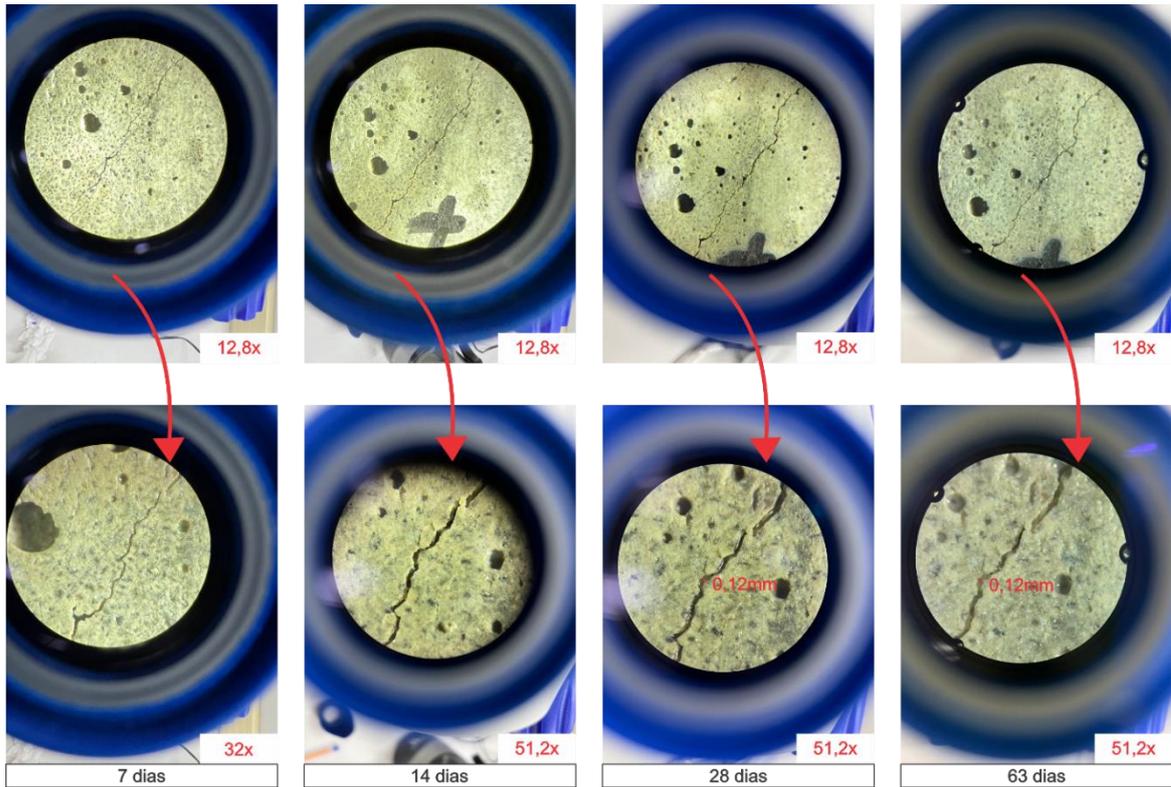
Por fim, na Figura 49, Figura 50 e Figura 51, é apresentado o monitoramento do processo de autocicatrização do cimento LC³, todavia com a cura executada através da molhagem e secagem das amostras. Foi identificado o mesmo comportamento já observado para esse procedimento de cura com os demais cimentos, em que a cicatrização aconteceu localizada em somente um ponto, não tendo sua continuidade para demais locais da fissura.

Figura 49 – Autocicatrização da amostra LC³-MS-1

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 50 – Autocicatrização da amostra LC³-MS-2

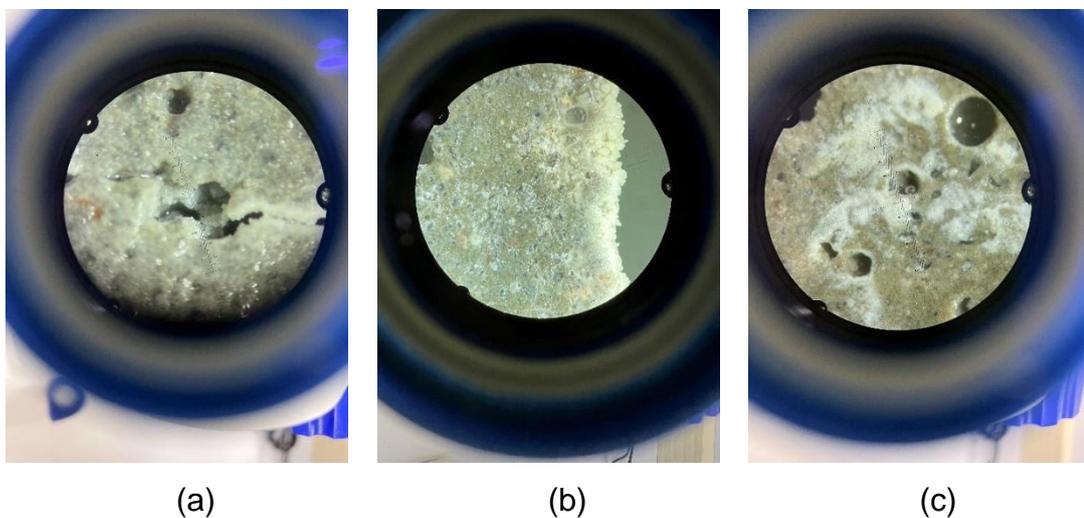
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 51 – Autocicatrização da amostra LC³-MS-3

Fonte: Elaborada pelo autor

É importante destacar que não foram observados somente formação de produtos nas fissuras, mas também na superfície, poros e extremidades dos corpos de prova, conforme é possível visualizar em alguns exemplos na Figura 52.

Figura 52 – Formação de produtos de hidratação fora das fissuras induzidas nos corpos de prova (a) CPIV-MS-1, (b) F40-SUB-2 e (c) LC³-MS-2



Fonte: Elaborada pelo autor

De forma a facilitar o entendimento dos resultados obtidos na análise visual e proporcionar uma comparação de melhor visualização e fácil leitura, foi elaborada a Tabela 8, contendo um resumo dos principais pontos observados.

Tabela 8 – Resumo dos resultados observados da análise visual

Cimento	Cura	Amostra	Espessura Máxima Cicatrizada (mm)	Média (mm)	Tipo
LC ³	Submersa	LC ³ -SUB-1	0,12	0,25	Parcialmente Contínua
		LC ³ -SUB-2	0,17		Parcialmente Contínua
		LC ³ -SUB-3	0,45		Parcialmente Contínua
	Molhagem e Secagem	LC ³ -MS-1	0,08	0,12	Pontual
		LC ³ -MS-2	0,16		Precipitação na parede
		LC ³ -MS-3	0,12		Pontual
CPII F40	Submersa	F40-SUB-1	0,46	0,33	Contínua
		F40-SUB-2	0,24		Parcialmente Contínua
		F40-SUB-3	0,28		Parcialmente Contínua
	Molhagem e Secagem	F40-MS-1	0,18	0,20	Pontual
		F40-MS-2	0,16		Contínua
		F40-MS-3	0,25		Pontual
CPIV 32 RS	Submersa	CPIV-SUB-1	0,27	0,28	Contínua
		CPIV-SUB-2	0,32		Pontual
		CPIV-SUB-3	0,24		Contínua
	Molhagem e Secagem	CPIV-MS-1	0,15	0,24	Pontual
		CPIV-MS-2	0,32		Pontual
		CPIV-MS-3	0,25		Pontual

Precipitação na parede: observado formação de cristais somente na parede da fissura, sem cicatrizar completamente sua espessura

Pontual: observado formação de cristais na espessura completa da fissura, entretanto ao longo do tempo se manteve somente nesse mesmo local

Parcialmente contínua: observado formação de cristais na espessura completa da fissura e, ao longo do comprimento da fissura, é visível a sua quase cicatrização completa

Contínua: observado formação de cristais na espessura completa da fissura e, ao longo do comprimento da fissura, é visível a sua cicatrização completa

Fonte: Elaborada pelo autor

Em se tratando do procedimento de cura adotada para os corpos de prova, é possível afirmar que a cura submersa possibilitou um melhor comportamento da autocicatrização. Isso pode ser evidenciado pelas espessuras de cicatrização maiores encontradas nas amostras submetidas a este tipo de cura e pelo fato de não ser o fenômeno somente localizado em determinado local. Em grande parte das amostras que permaneceram submersas em água após fissuração foi notada uma continuidade

no procedimento de autocicatrização ao longo das diferentes idades avaliadas. Estudos desenvolvidos por Petry (2021) e San Martin (2021) também concluíram que a cura executada por ciclos de molhagem e secagem apresentam resultados menos satisfatórios quando comparados com a cura submersa, indicando que esse comportamento observado no trabalho condiz com o esperado.

Ao longo processo de autocicatrização os mecanismos de principal impacto são a hidratação contínua do cimento e a precipitação de cristais de carbonato de cálcio (DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; DE BELIE *et al.* 2018; GHOSH, 2009; HUANG *et al.*, 2016; PARK; CHOI, 2019). Luo *et al.* (2021) desenvolveram estudos visando avaliar diferentes condições de cura no processo autogênico de autocicatrização, dentre elas a cura submersa e com ciclos de molhagem e secagem, encontrando resultados semelhantes aos evidenciados nesse estudo e nos das autoras já citadas.

Os autores supracitados explicam que na condição de cura por molhagem e secagem os dois principais processos de autocicatrização são passíveis de acontecer, uma vez que é fornecido umidade para a continuidade da hidratação do cimento e CO_2 para a precipitação do CaCO_3 , entretanto efetividade desse procedimento é dependente do resultado combinado desses dois aspectos. Por conta disso, Luo *et al.* (2021) concluem a necessidade de maior tempo de cura para possuir melhor desempenho nessa forma de cura.

Conforme destacado anteriormente, em todas as amostras avaliadas, já com 7 dias de cura, era possível evidenciar a cicatrização das fissuras, sendo que em grande parte a espessura já estava completamente fechada. Isso pode ser explicado por dois fatores diferentes: a idade em que foi realizada a indução das fissuras e a relação água/cimento empregada.

Danish, Mosaberpanah e Salim (2020), De Belie *et al.* (2018) e Snoeck (2015) corroboram ao afirmar que a indução de fissuras em idades iniciais possibilita maior capacidade autocicatrizante em decorrência da maior disponibilidade de cimento anidro. Isso é evidenciado nos estudos realizados por Petry (2021), em que a autora ainda cita que em idades de fissuração entre 91 e 182 dias existe maior dificuldade da capacidade cicatrizante, e também no trabalho publicado por Heide e Schlangen (2007).

Em se tratando da relação água/cimento, De Belie *et al.* (2018) destacam que possui grande influência no fenômeno de autocicatrização, uma vez que menores

relações água/cimento estão atreladas à maiores consumos de cimento e, por consequência, maior disponibilidade de cimento para a hidratação contínua. Esse fato foi evidenciado no trabalho realizado por Pacheco (2020).

Acerca dos tipos de cimentos avaliados, foi possível visualizar que o cimento ternário do tipo LC³ apresentou um comportamento inferior em termos de autocicatrização, entendido através das menores espessuras cicatrizadas e pela sua formação permanecer, em grande parte da fissura, de forma pontual. Até o presente momento não foram encontrados muitos estudos a respeito da autocicatrização do LC³, podendo-se citar o trabalho de Zhu *et al.* (2020) que investigaram essa questão, encontrando resultados satisfatórios para o LC³, quando comparado com o cimento referência, dependendo do grau de aplicação de carga. Entretanto os autores não estudaram a fundo o motivo desse comportamento. Assim sendo, acredita-se que tal comportamento estão ligados a três particularidade desse tipo de cimento.

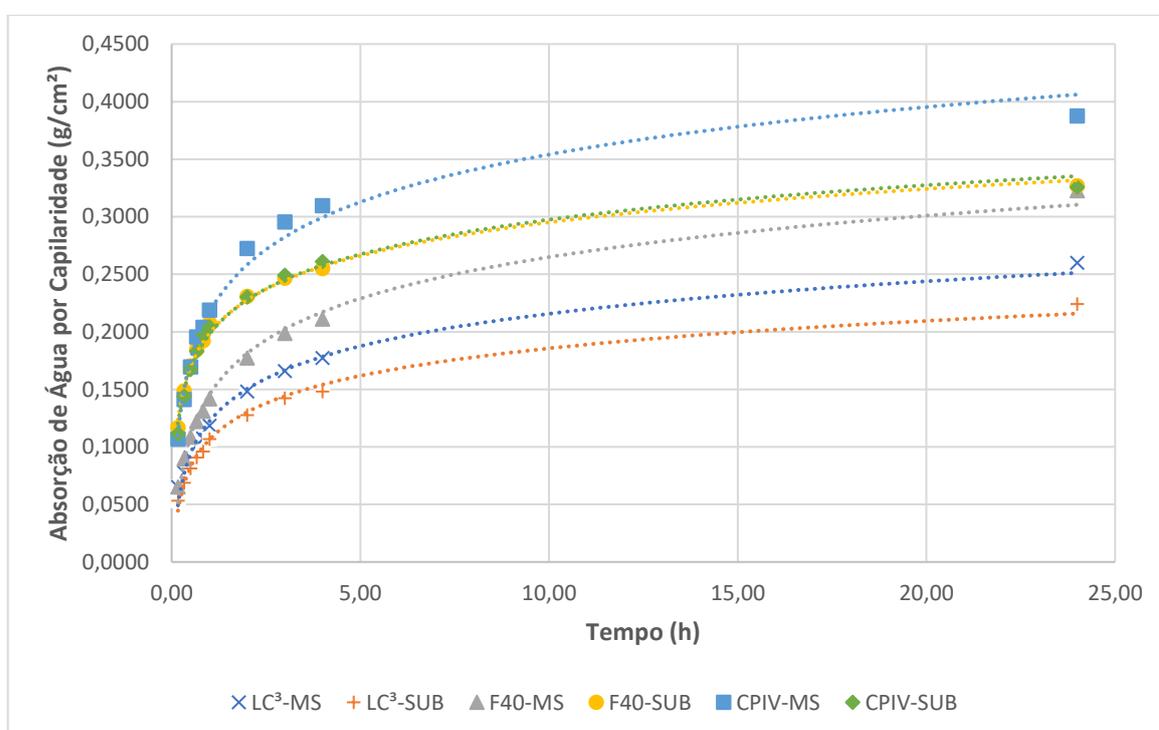
Primeiramente, Fröhlich (2019) destaca que a formação de parte dos produtos de hidratação é mais estável que os demais cimentos, fato esse que dificultaria a movimentação e precipitação dos cristais na superfície da fissura. Além disso, Tomczak e Jakubowski (2018) destacam que em cenários em que a matriz cimentícia é mais densa, pode haver dificuldade de os compostos migrarem até a superfície para efetuar a autocicatrização. Diversos estudos acerca do LC³ comprovam que esse tipo de cimento proporciona maior densificação da matriz em razão do refinamento dos poros proporcionado pelo efeito sinérgico entre o pó de calcário moído e o metacaulim (AVET; SCRIVENER, 2018; MOREIRA, 2020; TANG *et al.*, 2019; ZUNINO; MARTIRENA, SCRIVENER, 2021), sendo assim esse pode ser um segundo motivo para o comportamento inferior em termos de autocicatrização. Por fim, embora o cimento LC³ disponha de elevada quantidade de adições em sua composição, existe a reação química entre o pó de calcário e o metacaulim, conforme já citado anteriormente, que diminui a quantidade de metacaulim disponível para reagir e formar mais compostos.

Em relação aos cimentos CII F40 e CIII 32 RS foi identificado que os dois cimentos apresentaram comportamento semelhante na análise visual, com boa capacidade autocicatrizante, evidenciado pelas maiores espessuras identificadas e pela continuidade da cicatrização ao longo do tempo. Um comportamento semelhante foi evidenciado por Cappellesso (2018) que também avaliou esses dois cimentos em seu estudo.

4.3.2 Absorção de água por capilaridade

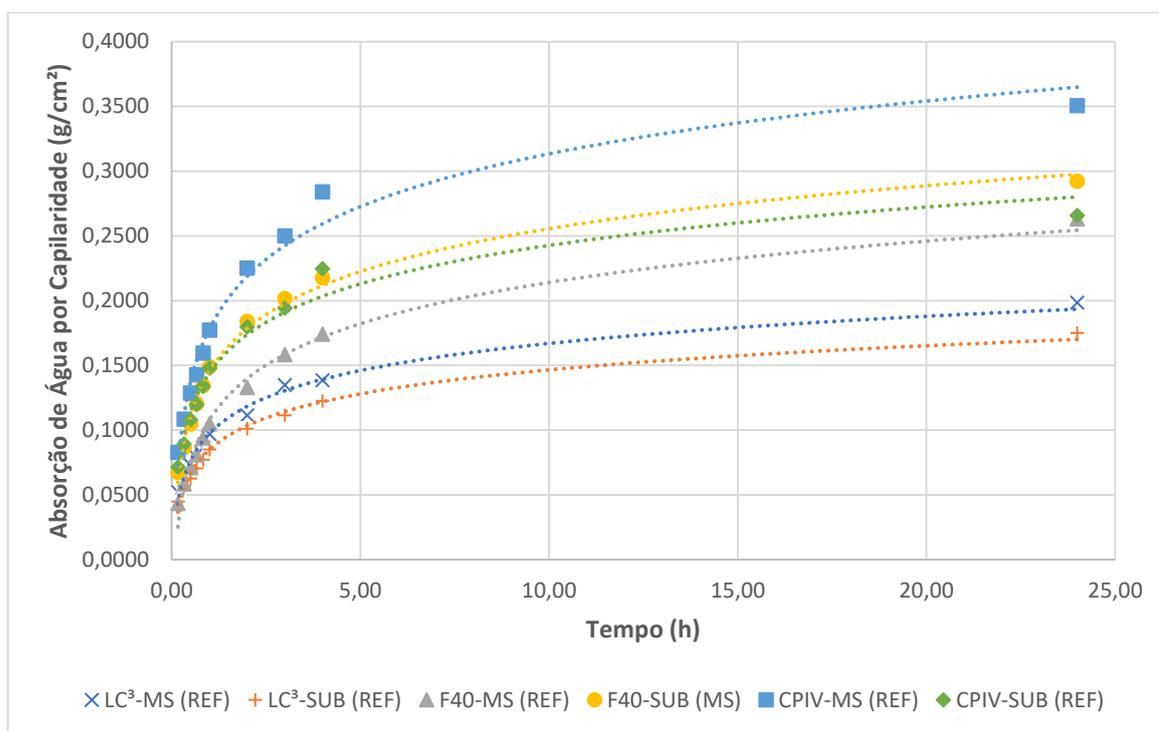
A seguir, na Figura 53 e na Figura 54, são apresentados os resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade, adaptado da RILEM TC 116-PCD (1999). É importante destacar que uma comparação entre os cimentos e tipos de cura não pode ser estabelecida com confiança o suficiente, uma vez que não ocorreu controle na formação das fissuras ao longo da indução. As análises realizadas nesse item foram feitas com base no cenário possível de ser executado dentro das limitações da pesquisa.

Figura 53 – Absorção de água por capilaridade de todos os traços e tipos de cura avaliados após da lixiviação com ácido



Fonte: Elaborada pelo autor

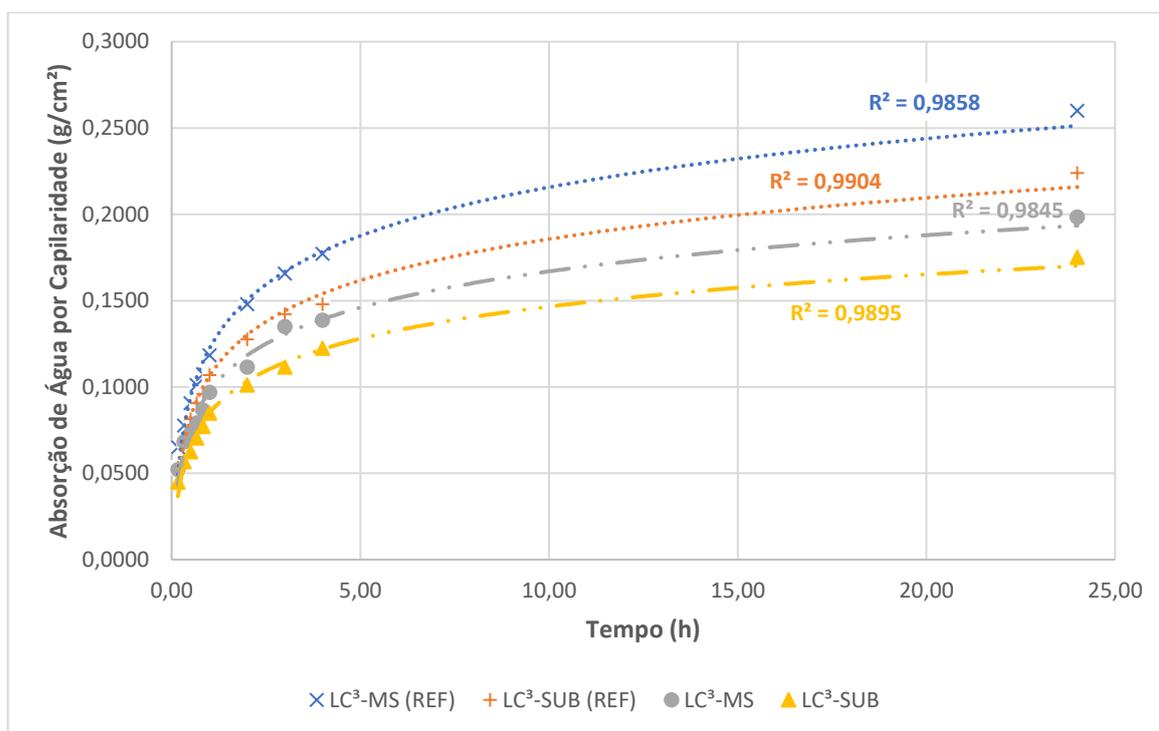
Figura 54 – Absorção de água por capilaridade de todos os traços e tipos de cura avaliados antes da lixiviação com ácido



Fonte: Elaborada pelo autor

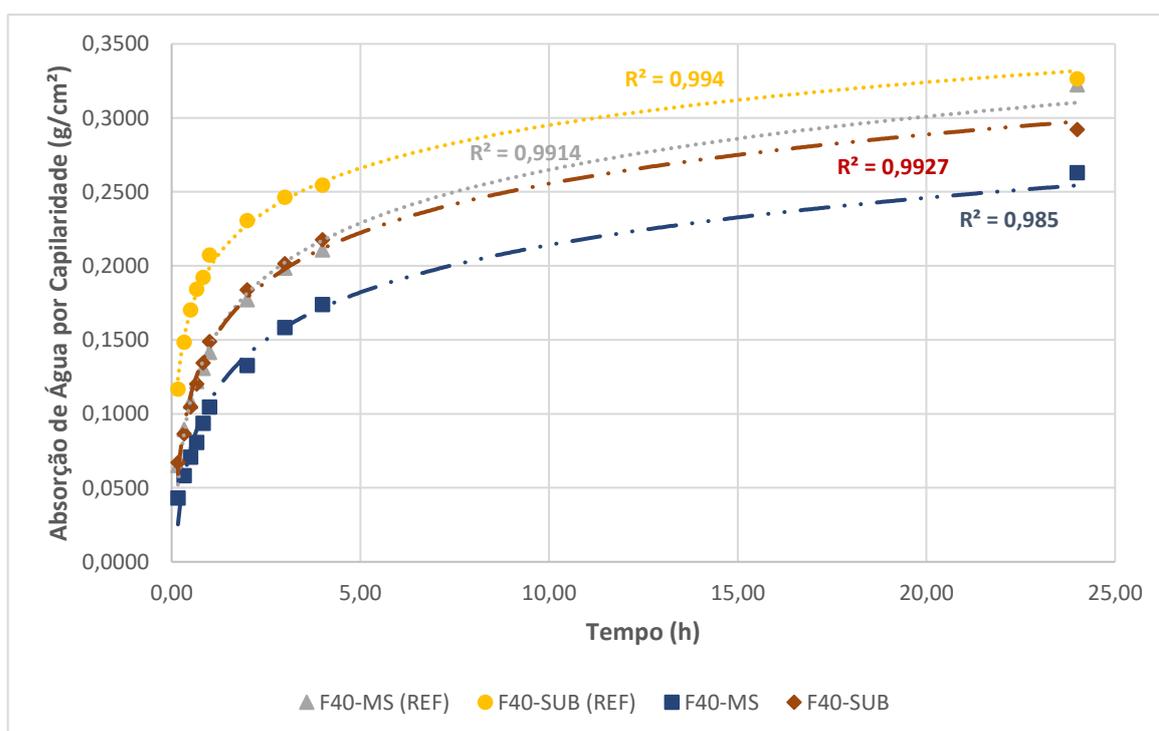
De forma a possibilitar um melhor comparação entre os resultados, é apresentado na Figura 55, Figura 56 e Figura 57, os valores obtidos separadamente para cada um dos cimentos e tipo de cura, além de apresentar os resultados de absorção dos corpos de prova que passaram pelo processo de lixiviação com ácido clorídrico, de forma a atuar como referência e buscar entender o quanto a amostra cicatrizou.

Figura 55 – Absorção de água por capilaridade do cimento LC³ para os dois tipos de cura avaliados



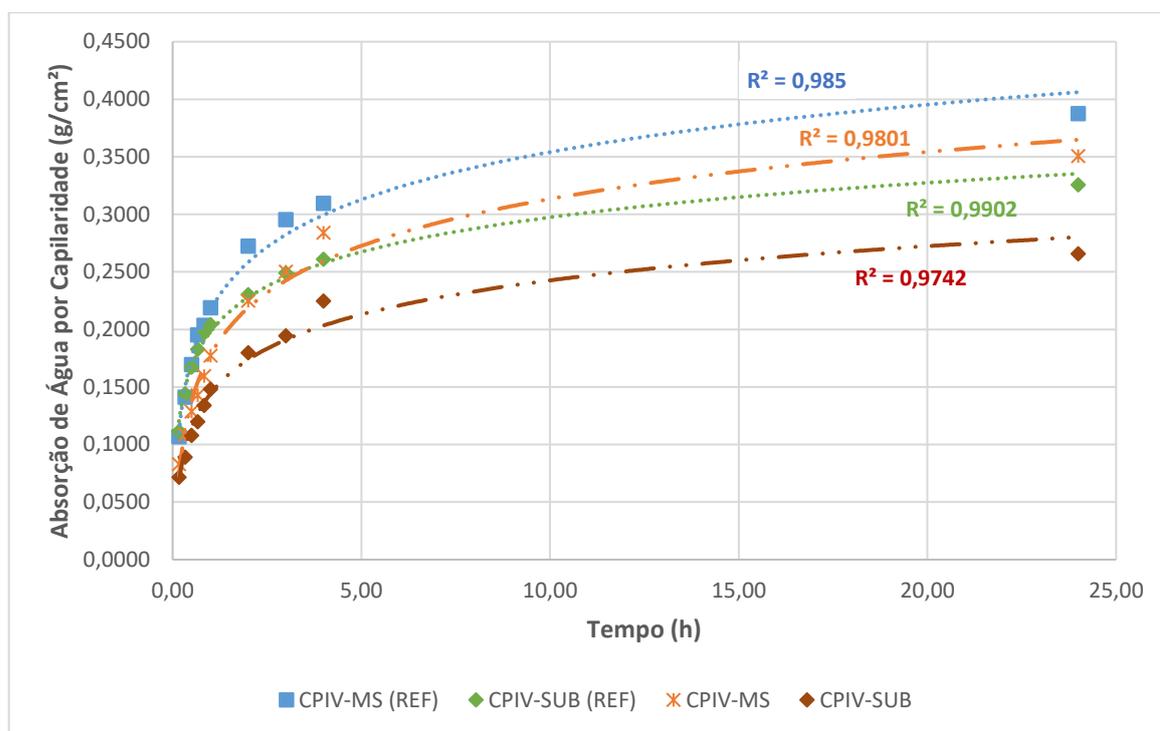
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 – Absorção de água por capilaridade do cimento CII F40 para os dois tipos de cura avaliados



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 – Absorção de água por capilaridade do cimento CPIV 32 RS para os dois tipos de cura avaliados



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o intuito de proporcionar uma melhor visualização dos resultados e possibilitar facilidade no entendimento das comparações, foi elaborada a Tabela 9. Nela são apresentados os resultados finais da absorção de água por capilaridade, após 24 horas de ensaio, além da diferença entre tal resultado com o obtido na amostra lixiviada com ácido, também após 24 horas. A coluna nomeada como “Percentual de Cicatrização” trata-se do percentual que a coluna “Diferença” representa em relação a coluna “Referência”, podendo indicar o quanto a amostra autocicatrizou até os 63 dias, idade final avaliada nesse estudo.

Tabela 9 – Resumo dos resultados obtidos com o ensaio de absorção de água por capilaridade

Cimento	Cura	Referência [a] (g/cm²)	Cicatrizado [b] (g/cm²)	Diferença [a-b] (g/cm²)	Percentual de 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: Elaborada pelo autor

Conforme é possível notar nos resultados, o cimento LC³ foi o que dispôs de maiores resultados no percentual de autocicatrização, nas duas formas de cura analisadas, embora tenha sido o que apresentou um comportamento inferior quando comparado aos demais cimentos na análise visual. Além disso, a cura por molhagem e secagem possibilitou percentuais de autocicatrização superiores para os cimentos LC³ e CPII F40, novamente diferente do que foi observado na análise visual. Por fim, o cimento CPIV 32 RS proporcionou um comportamento diferente dos demais cimentos, em que a cura submersa apresentou maior valor quando comparada com a realizada por molhagem e secagem. Novamente destaca-se que os resultados podem ser muito influenciados pela geometria e quantidade de fissuras apresentados em cada uma das amostras, conforme destacado por diversos autores (CAPPELLESSO, 2018; DANISH; MOSABERPANAH; SALIM, 2020; PACHECO, 2020).

Embora tenha apresentado um comportamento menos satisfatório em relação aos demais cimentos na análise visual, o cimento ternário do tipo LC³ foi o que dispôs do maior percentual de autocicatrização. Uma vez que não se encontraram muitos estudos do comportamento desse tipo de cimento em relação à autocicatrização, a hipótese acerca desse resultado está justamente ligada às reações de hidratação desse cimento. Fröhlich (2019) destaca que os produtos formados ao longo da hidratação são mais estáveis, fato esse que justificaria a não migração de tantos produtos nas fissuras formadas. Entretanto, conforme já salientado anteriormente, o cimento LC³ dispõe de uma reação sinérgica entre o carbonato de cálcio moído e o metacaulim que, juntamente com a reação pozolânica do metacaulim (MOREIRA,

2020; FRÖHLICH, 2019; KRISHNAN; BISHNOI, 2018; ZUNINO, MARTIRENA, SCRIVENER, 2021), poderiam intensificar a autocicatrização na parte mais interna da matriz cimentícia.

Estudos desenvolvidos por Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013) visaram avaliar o efeito de diferentes MCS no mecanismo de autocicatrização de matrizes cimentícias. Em seus resultados os autores encontraram taxas de cicatrização entre 14% e 66%. Ainda, com um objetivo semelhante, Maddalena e Gardner (2019), destacam que a cicatrização determinada em seu trabalho foi na ordem de 50%. Levando em consideração que os cimentos empregados nesse trabalho contêm variação no tipo de adição em sua composição, pode-se entender que os resultados podem ser comparados com os trabalhos citados. Assim sendo, observa-se que a taxa de autocicatrização está no patamar mais baixo dos trabalhos relacionadas à área. Cappellesso (2018) também avaliou o efeito de cicatrização dos cimentos CII F40 e CIV 32 RS e concluiu que o segundo cimento citado apresenta um comportamento melhor àquele do tipo F, em função da reação pozolânica que proporciona a formação de maior quantidade de produtos de hidratação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi executado com o intuito de avaliar o fenômeno de autocicatrização de argamassas com o cimento ternário do tipo LC³, comparando com diferentes cimentos normatizados, em ambientes de cura diferentes. As conclusões foram organizadas de forma a responder os objetivos específicos determinados.

- Em relação ao objetivo **a)** Mensurar a espessura máxima de cicatrização dentro de uma fissura:

Foi possível fazer a determinação das espessuras máximas da cicatrização da fissura através da análise visual em microscópio. A partir dessa análise, identificou-se que o traço contendo o cimento ternário do tipo LC³ apresentou um comportamento menos satisfatório em relação aos demais cimentos. Isso foi evidenciado pela cicatrização de fissuras com espessuras inferiores, além de, na maioria dos casos, a formação dos produtos ter acontecido de forma pontual, não se estendendo ao longo de toda a fissura. Tal comportamento provavelmente decorre do mecanismo de hidratação desse tipo de cimento, em que os produtos formados são mais estáveis, o que dificulta sua migração para a superfície da fissura. Esse cenário também pode ser corroborado pelo fato de as matrizes cimentícias com o cimento LC³ disporem de maior refinamento dos poros em decorrência da reação pozolânica do metacaulim e da reação sinérgica entre o carbonato de cálcio moído e o metcaulim.

- Em relação ao objetivo **b)** Acompanhar o processo de cicatrização em diferentes idades pós fissuração:

Nesta pesquisa foram avaliadas as idades de 7 dias, 14 dias, 28 dias e 63 dias. Através dessa ação foi possível verificar que os cimentos CII F40 e, em especial, o cimento CIII 32RS apresentavam um processo de continuidade em sua cicatrização, sendo assim os produtos formados se distribuíram ao longo da superfície da fissura. Em relação ao cimento ternário do tipo LC³, esse mesmo cenário, em que as formações dos cristais apareceram de forma pontual na superfície, e na grande maioria das vezes não obtiveram um processo contínuo de desenvolvimento nas fissuras.

- Em relação ao objetivo **c)** Analisar o impacto de diferentes condições de cura no fenômeno de autocicatrização:

Em relação a forma de cura empregadas no estudo, em todos os traços da análise visual foi identificado que os ciclos de molhagem e secagem foram menos

satisfatórios para a formação de produtos nas fissuras. Isso foi evidenciado através das menores espessuras cicatrizadas e pela formação, na maioria das vezes, pontual nos corpos de prova. O ensaio de absorção de água por capilaridade mostrou que o cura por ciclo de molhagem e secagem apresentaram bons resultados para os cimentos LC³ e CII F40.

- Em relação ao objetivo **d)** Comparar o processo de autocicatrização de cimentos atualmente normatizados com o cimento ternário do tipo LC³:

Na análise visual, os cimentos CII F40 e CIII 32 RS apresentaram comportamentos semelhantes em termos de cicatrização, com espessuras cicatrizadas similares, em que se destaca que na maioria dos casos a cicatrização com o cimento CIII 32 RS se alastrou ao longo de maior parte da fissura no período de idades avaliadas. Para o cimento LC³ esse comportamento foi um pouco diferente, em que em grande parte das vezes foram visualizadas precipitações pontuais que, muitas vezes, não se desenvolviam no comprimento da fissura ao longo do tempo.

Através do ensaio de absorção de água por capilaridade foi possível identificar que o cimento LC³ apresentou bom comportamento em relação a autocicatrização, embora tenha se mostrado menos satisfatório na análise visual. Esse comportamento provavelmente decorre da hipótese já citada em que os produtos de hidratação desse tipo de cimento são mais estáveis, sendo assim o fenômeno parece ter ocorrido nas fissuras formadas internamente, que não são possíveis de serem avaliadas através do microscópio.

- Em relação ao objetivo **e)** Avaliar a resistência à compressão dos cimentos analisados em diferentes idades:

O ensaio de resistência à compressão mostrou que o cimento LC³ já apresentava um comportamento superior em relação ao CIII 32 RS e semelhante ao CII F40 aos 28 dias de idade, cenário esse que se repetiu aos 63 dias. Aos 7 dias foi visualizado que o LC³ dispôs de uma resistência intermediária entre os outros dois cimentos analisados, fato esse não comumente observado na literatura. Esse cenário provavelmente decorreu da quantidade muito elevada de aditivo necessária para atingir uma consistência semelhante para o cimento LC³, que provavelmente inibiu a formação de resistência até os 7 dias.

Assim sendo, com base nos resultados obtidos nesse trabalho é possível perceber que o cimento ternário do tipo LC³ demonstrou um comportamento inferior na análise visual, com menos precipitação de cristais. Em contrapartida, os resultados

de absorção de água por capilaridade demonstraram uma capacidade superior em termos de cicatrização. Tal comportamento provavelmente está atrelado às reações de hidratação desse tipo de cimento.

5.1 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:

- a) Avaliar o impacto de diferentes relações água/cimento no comportamento de autocicatrização do cimento LC³;
- b) Executar métodos de controle de formação da fissura, permitindo realizar uma análise em cenários mais semelhantes e possuindo maior confiança nos resultados obtidos;
- c) Avaliar outras argilas calcinadas, como por exemplo o resíduo de cerâmica vermelha, buscando entender se apresentam benefícios em termos de autocicatrização;
- d) Analisar os produtos formados nas fissuras através de difração de raios-x, buscando entender se existem diferenças nos produtos formados.

REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- 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 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577**: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- 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 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 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, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

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.l, v. 8, n. 3, p. 1-12, 3 jun. 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.

BARY, B.; SELIER, 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.

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

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.

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.

DHANDAPANI, Yuvaraj *et al.* Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 107, p. 136-151, maio 2018

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

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.

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.

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

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.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei. Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 28, n. 12, p. 1-15, dez. 2016.

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.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. Cap. 29. p. 905-944.

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.

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, 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.

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.

LAHMANN, Daniel; EDVARDBSEN, 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. Wiley.

LEI, Lei *et al.* Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: a review. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 154, p. 106717, abr. 2022.

LINS, Diana Nascimento. **Análise da resistência à compressão do cimento Ic³ e a influência das adições minerais em seu desempenho**. 2017. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LOTTHENBACH, 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.

LUO, Mian *et al.* Effects of Curing Conditions and Supplementary Cementitious Materials on Autogenous Self-Healing of Early Age Cracks in Cement Mortar. **Crystals**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 752, 27 jun. 2021.

MADDALENA, Riccardo, TAHA, Hussameldin; GARDNER, Diane 2019. Enhanced self-healing using conventional supplementary cementitious materials. Presented at: **39th Cement and Concrete Science Conference 2019**, Bath, England, 9-10 September 2019.

MALACARNE, Camila Salvi. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC³ - cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário - a partir de materiais 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.

MALINSKII, Yu. M. *et al.* Investigation of self-healing of cracks in polymers. **Polymer Mechanics**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 240-244, 1969.

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.

MELLO, Viníciu Müller de. **Avaliação da influência da concentração de soluções bacterianas de bacillus subtilis ap91 no desenvolvimento de materiais cimentícios autocicatrizantes**. 2019. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

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.

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.

NAIR, Nithya *et al.* A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 254, p. 119326-119338, set. 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. 1-11, 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.

PACHECO, Fernanda. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização 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.

PETRY, Natália dos Santos. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. 2021. 223 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

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.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

RILEM TC 116-PCD. Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. **Materials and Structure**, v. 32, p. 174-179, 1999.

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.

SAHMARAN, Mustafa; YILDIRIM, Gurkan; ERDEM, Tahir K.. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 89-101, jan. 2013.

SAN MARTIN, Jéssica Ferreira de Freitas. **Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório**. 2021. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SANTOS, Rafael Schafer de Souza dos. **RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE METACAULIM**. 2019. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

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.

SCHNEIDER, Martin. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 124, p. 1-19, out. 2019.

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 cemente (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.

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. 106564-106582, 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.

SILVA, Deividi Maurenre Gomes da *et al.* Calcium hydroxide influence in autogenous self-healing of cement-based materials in various environmental conditions. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 209-224, abr. 2021b.

SILVA, Guilherme Tavares de Melo *et al.* Resíduos de construção e demolição em tecnologia do concreto: uma revisão. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.

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.

STON, Julien. **Basic creep and autogenous shrinkage of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)**. 2019. 158 f. Tese (Doutorado) - Programme Doctoral En Science Et Génie Des Matériaux, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2019.

SWIFT, Taylor; VERNON, Justin; BOWERY, William. **evermore (feat. Bon Iver)**. In: SWIFT, Taylor. evermore (deluxe version). Nova Iorque: Republic Records, 2020. 1 CD. Faixa 15.

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.

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

VAN 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.

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, 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.

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

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.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Neste capítulo serão apresentados os detalhes acerca da determinação da resistência à compressão executados conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019).

Tabela 10 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento LC³

LC ³ -7 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	49,1	49,64	49,64	79659	41,5	-1,0%
CP 2	49,88	49,61	49,59	66090	34,1	-22,9%
CP 3	49,75	49,94	49,93	79911	40,9	-2,4%
CP 4	49,86	49,99	49,59	84308	43,3	3,2%
Resistência Final (MPa)					41,9	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento LC³

LC ³ -28 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,05	50,03	50,04	116474	59,2	0,9%
CP 2	49,93	50,16	49,94	127405	64,9	9,5%
CP 3	49,71	49,88	49,6	115468	59,4	1,3%
CP 4	50,12	49,9	50,02	112704	57,4	-2,3%
Resistência Final (MPa)					58,7	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento LC³

LC ³ -63 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,16	49,13	50,11	119992	61,6	0,7%
CP 2	50,06	50,16	50,15	106799	54,1	-13,0%
CP 3	49,95	49,98	49,93	125185	63,9	4,3%
CP 4	50,03	50,16	50,09	114212	58,0	-5,5%
Resistência Final (MPa)					61,1	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 13 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento CII

F40

F40-7 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50	49,96	50,13	94988	48,3	-4,0%
CP 2	49,65	49,76	50,02	72498	37,2	-35,1%
CP 3	50,27	50,11	50,1	82424	41,7	-20,5%
CP 4	49,54	49,79	49,62	101103	52,2	3,7%
Resistência Final (MPa)					50,3	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento

CII F40

F40-28 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,16	49,13	50,11	119992	61,6	3,0%
CP 2	50,06	50,16	50,15	106799	54,1	-10,4%
CP 3	49,95	49,98	49,93	125185	63,9	6,4%
CP 4	50,03	50,16	50,09	114212	58,0	-3,2%
Resistência Final (MPa)					59,8	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15 – Resultados de resistência à compressão aos 63 dias para o cimento

CII F40

F40-63 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,05	50,03	50,04	116474	59,2	0,9%
CP 2	49,93	50,16	49,94	127405	64,9	9,5%
CP 3	49,71	49,88	49,6	115468	59,4	1,3%
CP 4	50,12	49,9	50,02	112704	57,4	-2,3%
Resistência Final (MPa)					58,7	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16 – Resultados de resistência à compressão aos 7 dias para o cimento

CPIV 32RS

CPIV-7 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,23	49,9	49,91	63828	32,5	3,8%
CP 2	49,94	49,95	50,03	55033	28,1	-11,4%
CP 3	49,75	49,83	49,56	58300	30,0	-4,1%
CP 4	50,14	49,97	49,95	45944	23,4	-33,7%
Resistência Final (MPa)					31,3	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento

CPIV 32RS

CPIV-28 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,5	50,41	50,09	94486	47,5	-0,7%
CP 2	49,22	50,46	49,62	97250	50,0	4,4%
CP 3	50,05	49,9	49,95	91344	46,6	-2,6%
CP 4	49,92	49,43	49,85	91554	47,1	-1,4%
Resistência Final (MPa)					47,8	

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 18 – Resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o cimento

CPIV 32RS

CPIV-63 dias	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Força (N)	Resistência (MPa)	Desvio Relativo Máximo (MPa)
CP 1	50,5	50,41	50,09	94486	47,5	-0,5%
CP 2	49,22	50,46	49,62	97250	50,0	4,6%
CP 3	50,05	49,9	49,95	91344	46,6	-2,4%
CP 4	49,92	49,93	49,85	91554	46,8	-1,9%
Resistência Final (MPa)					47,7	

Fonte: Elaborada pelo autor

APÊNDICE B – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Neste capítulo serão apresentados os detalhes acerca da determinação da resistência à compressão executados em adaptação à RILEM TC 116-PCD (1999).

Tabela 19 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras após lixiviação com ácido

	Tempo de Ensaio										
	0 min (g)	10 min (g)	20 min (g)	30 min (g)	40 min (g)	50 min (g)	1h (g)	2h (g)	3h (g)	4h (g)	24h (g)
LC3-MS-1	619,9	624,3	624,8	625,7	626,2	626,5	627,2	628,7	629,9	630,6	635,5
LC3-MS-2	608,6	612,9	613,7	614,5	615,2	615,6	616,4	618,4	619,5	620,3	626,2
LC3-MS-3	614,8	618,6	619,7	620,5	621,3	621,8	622,4	624,6	625,7	626,4	631,5
LC3-SUB-1	606,8	609,9	610,9	611,8	612,5	612,5	613,4	614,4	615	615,1	620,1
LC3-SUB-2	613	616,2	617,2	617,9	618,4	618,9	619,4	620,7	621,5	621,9	626
LC3-SUB-3	613,9	617,8	618,8	619,6	620,2	620,7	621,4	623,1	624,5	625,1	630,6
F40-MS-1	611,8	615,4	616,8	618	619	619,5	620,3	622,3	623,9	624,8	632,2
F40-MS-2	614,9	619,2	620,7	621,9	622,8	623,3	623,9	626,5	627,6	628,5	634,9
F40-MS-3	625,8	630,4	632,2	633,4	634,1	634,8	635,5	637,7	639,1	639,7	647,3
F40-SUB-1	617,4	624,6	626,7	628,1	629,1	629,6	630,4	632,1	633	633,6	638,4
F40-SUB-2	626,4	633,7	635,6	636,9	637,9	638,2	639,2	640,5	641,6	642,1	647
F40-SUB-3	603,2	611,1	613,2	614,7	615,4	616,1	617,2	618,7	619,7	620,2	624,3
CPIV-MS-1	609,8	616,4	618,6	620,5	622,8	622,5	623,3	627	628,6	629,4	634,5
CPIV-MS-2	602,8	609,6	611,9	613,6	615	616	617,1	620,2	621,8	622,4	627,7
CPIV-MS-3	594,3	601,4	603,5	605,3	606,6	607,5	608,5	612	613,2	614,5	619,1
CPIV-SUB-1	618,4	625,5	627,5	628,7	629,7	630,7	631,1	632,2	634,1	635	639,9
CPIV-SUB-2	604,4	612,6	614,9	616,6	617,6	618,5	619	621	621,8	622,3	625,4
CPIV-SUB-3	627,8	633,9	635,8	637,4	638,4	639,2	639,7	641,6	642,5	643,4	647,8

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 20 – Resultados de absorção de água por capilaridade das amostras após lixiviação com ácido

	Tempo de Ensaio									
	10 min (%)	20 min (%)	30 min (%)	40 min (%)	50 min (%)	1h (%)	2h (%)	3h (%)	4h (%)	24h (%)
LC3-MS-1	0,0687	0,0766	0,0906	0,0984	0,1031	0,1141	0,1375	0,1563	0,1672	0,2438
LC3-MS-2	0,0672	0,0797	0,0922	0,1031	0,1094	0,1219	0,1531	0,1703	0,1828	0,2750
LC3-MS-3	0,0594	0,0766	0,0891	0,1016	0,1094	0,1188	0,1531	0,1703	0,1813	0,2609
LC3-SUB-1	0,0484	0,0641	0,0781	0,0891	0,0891	0,1031	0,1188	0,1281	0,1297	0,2078
LC3-SUB-2	0,0500	0,0656	0,0766	0,0844	0,0922	0,1000	0,1203	0,1328	0,1391	0,2031
LC3-SUB-3	0,0609	0,0766	0,0891	0,0984	0,1063	0,1172	0,1438	0,1656	0,1750	0,2609
F40-MS-1	0,0563	0,0781	0,0969	0,1125	0,1203	0,1328	0,1641	0,1891	0,2031	0,3188
F40-MS-2	0,0672	0,0906	0,1094	0,1234	0,1313	0,1406	0,1813	0,1984	0,2125	0,3125
F40-MS-3	0,0719	0,1000	0,1188	0,1297	0,1406	0,1516	0,1859	0,2078	0,2172	0,3359
F40-SUB-1	0,1125	0,1453	0,1672	0,1828	0,1906	0,2031	0,2297	0,2438	0,2531	0,3281
F40-SUB-2	0,1141	0,1438	0,1641	0,1797	0,1844	0,2000	0,2203	0,2375	0,2453	0,3219
F40-SUB-3	0,1234	0,1563	0,1797	0,1906	0,2016	0,2188	0,2422	0,2578	0,2656	0,3297
CPIV-MS-1	0,1031	0,1375	0,1672	0,2031	0,1984	0,2109	0,2688	0,2938	0,3063	0,3859
CPIV-MS-2	0,1063	0,1422	0,1688	0,1906	0,2063	0,2234	0,2719	0,2969	0,3063	0,3891
CPIV-MS-3	0,1109	0,1438	0,1719	0,1922	0,2063	0,2219	0,2766	0,2953	0,3156	0,3875
CPIV-SUB-1	0,1109	0,1422	0,1609	0,1766	0,1922	0,1984	0,2156	0,2453	0,2594	0,3359
CPIV-SUB-2	0,1281	0,1641	0,1906	0,2063	0,2203	0,2281	0,2594	0,2719	0,2797	0,3281
CPIV-SUB-3	0,0953	0,1250	0,1500	0,1656	0,1781	0,1859	0,2156	0,2297	0,2438	0,3125

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 21 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras antes da lixiviação com ácido

	Tempo de Ensaio										
	0 min (g)	10 min (g)	20 min (g)	30 min (g)	40 min (g)	50 min (g)	1h (g)	2h (g)	3h (g)	4h (g)	24h (g)
LC3-MS-1	620,4	623,9	625	625,3	625,5	626,1	626,8	627,3	628,6	629,1	633
LC3-MS-2	609,7	612,9	614	614,3	614,7	615,1	615,7	616,9	618,7	618,7	622,6
LC3-MS-3	616,4	619,7	620,6	620,9	621,5	621,9	622,6	623,7	625,1	625,3	629
LC3-SUB-1	605,3	607,9	608,7	609	609,4	609,9	610,4	611,5	612,1	612,9	616
LC3-SUB-2	611,5	614,3	615	615,4	615,9	616,2	616,9	617,9	618,7	619,3	623
LC3-SUB-3	614,8	618	618,8	619,2	619,8	620,3	620,6	621,6	622,2	622,9	626,2
F40-MS-1	610,4	612,6	613,6	614,3	615	615,6	616,3	618,1	619,5	620,6	626,3
F40-MS-2	614,4	617,4	618,5	619,3	620	620,7	621,5	623,3	624,8	626	631,8
F40-MS-3	625,8	628,9	629,7	630,6	631,1	632,3	632,9	634,7	636,7	637,4	643
F40-SUB-1	614,9	619	620,3	621,4	622,6	623,5	624,2	626,9	628	628,8	633,6
F40-SUB-2	625,2	629,8	631	632,2	633	633,9	634,9	636,6	637,4	638,6	643,4
F40-SUB-3	601,7	605,9	607,1	608,3	609,3	610,2	611,3	613,6	615,1	616,2	620,9
CPIV-MS-1	610,2	615,2	616,8	618	619	620	621,1	624,1	626,1	627,8	632,8
CPIV-MS-2	602,8	608,3	610,1	611,6	612,7	613,8	614,9	618,4	619,9	621,8	625,4
CPIV-MS-3	595,2	600,6	602,1	603,3	603,9	605	606,2	608,9	610,2	613,1	617,3
CPIV-SUB-1	617,5	621,9	623	624	624,7	625,5	626,3	628,1	628,8	630,4	633,1
CPIV-SUB-2	604,1	608,9	610	611,4	612,2	613,2	614,1	616,1	617,2	619,1	621,1
CPIV-SUB-3	625,3	629,8	631	632,2	633	633,9	634,9	637,2	638,2	640,5	643,7

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 22 – Resultados de absorção de água por capilaridade das amostras antes da lixiviação com ácido

	Tempo de Ensaio									
	10 min (%)	20 min (%)	30 min (%)	40 min (%)	50 min (%)	1h (%)	2h (%)	3h (%)	4h (%)	24h (%)
LC3-MS-1	0,0547	0,0719	0,0766	0,0797	0,0891	0,1000	0,1078	0,1281	0,1359	0,1969
LC3-MS-2	0,0500	0,0672	0,0719	0,0781	0,0844	0,0938	0,1125	0,1406	0,1406	0,2016
LC3-MS-3	0,0516	0,0656	0,0703	0,0797	0,0859	0,0969	0,1141	0,1359	0,1391	0,1969
LC3-SUB-1	0,0406	0,0531	0,0578	0,0641	0,0719	0,0797	0,0969	0,1063	0,1188	0,1672
LC3-SUB-2	0,0437	0,0547	0,0609	0,0687	0,0734	0,0844	0,1000	0,1125	0,1219	0,1797
LC3-SUB-3	0,0500	0,0625	0,0688	0,0781	0,0859	0,0906	0,1063	0,1156	0,1266	0,1781
F40-MS-1	0,0344	0,0500	0,0609	0,0719	0,0813	0,0922	0,1203	0,1422	0,1594	0,2484
F40-MS-2	0,0469	0,0641	0,0766	0,0875	0,0984	0,1109	0,1391	0,1625	0,1813	0,2719
F40-MS-3	0,0484	0,0609	0,0750	0,0828	0,1016	0,1109	0,1391	0,1703	0,1813	0,2688
F40-SUB-1	0,0641	0,0844	0,1016	0,1203	0,1344	0,1453	0,1875	0,2047	0,2172	0,2922
F40-SUB-2	0,0719	0,0906	0,1094	0,1219	0,1359	0,1516	0,1781	0,1906	0,2094	0,2844
F40-SUB-3	0,0656	0,0844	0,1031	0,1187	0,1328	0,1500	0,1859	0,2094	0,2266	0,3000
CPIV-MS-1	0,0781	0,1031	0,1219	0,1375	0,1531	0,1703	0,2172	0,2484	0,2750	0,3531
CPIV-MS-2	0,0859	0,1141	0,1375	0,1547	0,1719	0,1891	0,2438	0,2672	0,2969	0,3531
CPIV-MS-3	0,0844	0,1078	0,1266	0,1359	0,1531	0,1719	0,2141	0,2344	0,2797	0,3453
CPIV-SUB-1	0,0687	0,0859	0,1016	0,1125	0,1250	0,1375	0,1656	0,1766	0,2016	0,2438
CPIV-SUB-2	0,0750	0,0922	0,1141	0,1266	0,1422	0,1563	0,1875	0,2047	0,2344	0,2656
CPIV-SUB-3	0,0703	0,0891	0,1078	0,1203	0,1344	0,1500	0,1859	0,2016	0,2375	0,2875

Fonte: Elaborada pelo autor