

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS – PPGCEM**

**RAFAELA SEBEN ECKHARDT**

**ESTUDO DO EFEITO DE ADITIVO AUTOCICATRIZANTE E  
DIFERENTES MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES NA  
AUTOCICATRIZAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND**

**CRICIÚMA  
FEVEREIRO DE 2025**

**RAFAELA SEBEN ECKHARDT**

**ESTUDO DO EFEITO DE ADITIVO AUTOCICATRIZANTE E  
DIFERENTES MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES NA  
AUTOCICATRIZAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira.

Coorientador: Prof. Dr. Matheus Vinícius  
Gregory Zimmermann

**CRICIÚMA  
FEVEREIRO DE 2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

E19e Eckhardt, Rafaela Sebben.

Estudo do efeito de aditivo autocicatrizante e diferentes materiais cimentícios suplementares na autocicatrização de pastas de cimento Portland / Rafaela Sebben Eckhardt. - 2025.

104 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2025.

Orientação: Fabiano Raupp Pereira.

Coorientação: Matheus Vinícius Gregory Zimmermann.

1. Concreto. 2. Autocicatrização do concreto. 3. Concreto - Aditivos. 4. Materiais cimentícios suplementares. 5. Concreto - Deterioração. 6. Cimento Portland. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Rafaela Sebben Eckhardt

Estudo do efeito de aditivo autocicatrizante e diferentes materiais cimentícios suplementares na autocicatrização de pastas de cimento Portland.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 27 de fevereiro de 2025.

### **Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente



**OSCAR RUBEM KLEGUES MONTEDO**

Data: 28/07/2025 15:42:29-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente



**JULIANA ACORDI MONSANI**

Data: 28/07/2025 15:47:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dra. Juliana Acordi Monsani**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Assinado por: **Aires Fernando Fernandes Leite**  
**Camões de Azevedo**

Num. de Identificação: 07345364

Data: 2025.07.29 19:52:58+01'00'

**Prof. Dr. Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo**  
Universidade do Minho

Dedico este trabalho a meus mentores e a minha família, que me auxiliaram e apoiaram, possibilitando a conclusão desta dissertação.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos aqueles de alguma forma me auxiliaram na neste trabalho. Primeiramente meu marido Maico, pelo suporte durante minha ausência para dedicação a este estudo e pelo incentivo constante. Também a meus pais e irmãos, que me sempre me apoiaram e torceram por mim.

Sem dúvida gostaria de agradecer meu orientador Fabiano, que me guiou e persistiu me ensinando, mesmo quando eu tinha dificuldade para entender as razões, sendo uma engenheira civil estudando engenharia de materiais. E um agradecimento muito especial a Juliana, que me ensinou e me incentivou muito nesta jornada, tendo participação constante e fundamental para realização deste estudo.

A equipe do laboratório, principalmente Luyza, Richard, Giovane e Tchesare, pelo apoio técnico.

Por fim, agradeço à Universidade do Extremo Sul Catarinense e ao programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela infraestrutura disponibilizada.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes.”

Albert Einstein

## RESUMO

O concreto é utilizado em larga escala em todo o mundo, porém sua produção requer grande volume de matéria prima, além de emitir um volume preocupante de carbono na atmosfera. A redução de seu uso não é um cenário real, portanto é necessário desenvolver alternativas para mitigação de seus efeitos indesejados. Uma delas é a utilização de materiais cimentícios suplementares, como *filler* calcário, escória de alto forno e pozolana (cinza volante), em substituição ao cimento, os quais tem-se disponibilidade em larga escala, baixo custo e reduzida emissão de carbono. Outra alternativa, que trabalha em conjunto com a substituição do cimento, é a utilização de aditivo autocicatrizante na mistura cimentícia, que também é utilizado em larga escala em todo mundo, porém com estudos inconclusivos sobre suas reações, dadas as variáveis que influenciam seu desempenho. Este material objetiva proteção integral de misturas cimentícias, como o concreto, pela autocicatrização de poros e fissuras de até 0,5 mm, objetivando um aumento da durabilidade das estruturas. O presente estudo avalia as reações desencadeadas em misturas cimentícias que utilizam cimento, materiais cimentícios suplementares e aditivo autocicatrizante em diferentes formulações, a fim de entender o comportamento dos SCMs e do aditivo autocicatrizante. Foram realizados ensaios de caracterização com análises químicas, mineralógicas e térmicas (FRX, DRX e ATD/TG) nos materiais anidros e posteriormente em pastas hidratadas e ensaios de desempenho por microscopia e permeabilidade. Os resultados alcançados, nas combinações específicas deste estudo, confirmam a compatibilidade de utilização de SCMs em substituição ao cimento e também a efetividade do aditivo autocicatrizante referente à autocicatrização de fissuras. Em conclusão, é possível e benéfico a utilização de SCMs e aditivo autocicatrizante, porém é necessário avaliar cada mistura e cada condição de composição e exposição, pois estas alteram as reações desencadeadas e conseqüentemente o desempenho final.

**Palavras-chave:** autocicatrização; cimento; SCMs; durabilidade; sustentabilidade.

## ABSTRACT

Concrete is widely used worldwide, but its production requires a large volume of raw materials and emits a worrying amount of carbon into the atmosphere. Reducing its use is not a realistic scenario, so alternatives must be developed to mitigate its undesirable effects. One such alternative is the use of supplementary cementitious materials, such as limestone, slag, and fly ash, as replacements for cement. These materials are widely available, inexpensive, and have low carbon emissions. Another alternative, which works in conjunction with cement replacement, is the use of a self-healing additive in the cementitious mix. This is also widely used worldwide, but studies on its reactions are inconclusive, given the variables that influence its performance. This material aims to fully protect cementitious mixtures, such as concrete, by self-healing pores and cracks up to 0,5 mm, increasing the durability of structures. This study evaluates the reactions triggered in cementitious mixtures containing cement, supplementary cementitious materials, and self-healing admixtures in different formulations to understand the behavior of the SCMs and the self-healing admixture. Characterization tests were performed using chemical, mineralogical and thermal (XRF, XRD and DTA/TG) analyses on the anhydrous materials and subsequently on hydrated pastes, as well as performance tests using microscopy and permeability. The results obtained, in the specific combinations of this study, confirm the compatibility of using SCMs as a replacement for cement and also the effectiveness of the self-healing admixture in crack-healing. In conclusion, the use of SCMs and self-healing admixtures is possible and beneficial, however, it is necessary to evaluate each mixture and each composition and exposure condition, as these affects the reactions triggered and, consequently, the final performance.

**Keywords: self-healing; cement; SCMs, durability; sustainability.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de vida da estrutura de concreto com as emissões de CO <sub>2</sub> por etapa. .....	32
Figura 2 – Microscopia ótica (a, c) e quantificação por pixel (b, d) de amostras cimentícias fissuradas, antes (a, b) e depois (c, d) da autocicatrização da fissura. ..	33
Figura 3 – Principais mecanismos de autocicatrização autógena em materiais cimentícios expostos à água. ....	38
Figura 4 - Fenômeno de autocicatrização: abertura de fissura (a), concreto aditivado em contato com umidade (b) e autocicatrização (c). ....	42
Figura 5 - Etapas de reação de recristalização ou hidratação do aditivo autocicatrizante. ....	44
Figura 6 – Fluxograma com as etapas do procedimento experimental. ....	46
Figura 7 – Fotografia dos materiais utilizados CP I (a); aditivo autocicatrizante (b); <i>filler</i> calcário (c); escória de alto forno (d), e pozolana/cinza volante (e). ....	47
Figura 8 – Ensaio a serem executados em cada etapa do procedimento experimental. .....	48
Figura 9 – Molde e corpos de prova para ensaio em pasta de ATD/TG e DRX. ....	53
Figura 10 – Procedimento de cura das amostras para ativação do aditivo. ....	54
Figura 11 – Moldagem dos corpos de prova para ensaios de desempenho das misturas cimentícias. ....	55
Figura 12 – Fissuração da amostra em máquina de ensaio universal, com célula de carga de 10 ton e fixação de haste metálica na face inferior da amostra. ....	57
Figura 13 – Imagens fotográficas com detalhes da: amostras fixadas com presilha (a) e haste para delimitação da abertura da fissura (b). ....	57
Figura 14 – Medição da abertura de fissura com fissurômetro. ....	58
Figura 15 – Imagens da fixação do tubete em uma face da fissura e selamento das fissuras nas faces laterais (a) e preenchimento do tubete com água (b). ....	59
Figura 16 - Difratoograma de raios X do aditivo autocicatrizante. ....	63
Figura 17 - Difratoograma de raios X do cimento CP I. ....	64
Figura 18 - Difratoograma de raios X do <i>filler</i> calcário. ....	64
Figura 19 - Difratoograma de raios X da escória de alto forno. ....	65
Figura 20 - Difratoograma de raios X da pozolana. ....	65
Figura 21 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do aditivo. ....	66

Figura 22 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do CP I. ....	67
Figura 23 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do <i>filler</i> calcário. .....	67
Figura 24 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) da escória de alto forno. ....	68
Figura 25 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) da pozolana.	69
Figura 26 - Difrátogramas de raios X das pastas A (a), C (b) e CA (c).....	72
Figura 27 - Difrátograma de raios X das pastas hidratadas de CF (a) e de CAF (b).	73
Figura 28 - Difrátograma de raios X das pastas hidratadas de CE (a) e de CAE (b).	73
Figura 29 - Difrátograma de raios X das pastas hidratadas de CP (a) e de CAP (b).	74
Figura 30 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de A (a), C (b) e CA (c).....	75
Figura 31 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CF e CAF (a) e CA e CAF (b).....	76
Figura 32 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CE e CAE (a) e CA e CAE (b). ....	77
Figura 33 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CP e CAP (a) e CA e CAP (b). ....	77
Figura 34 – Imagens de microscopia ótica: amostras de C (a, b) e CA (e, f) antes da ativação e amostras de C (c, d) e CA (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente. ....	79
Figura 35 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CF (a, b) e CAF (e, f) antes da ativação e amostras de CF (c, d) e CAF (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente. ....	81
Figura 36 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CE (a, b) e CAE (e, f) antes da ativação e amostras de CE (c, d) e CAE (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente. ....	83
Figura 37 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CP (a, b) e CAP (e, f) antes da ativação e amostras de CP (c, d) e CAP (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente. ....	84
Figura 38 – Amostra de CP com selamento da fissura em parte de sua linearidade. .....	86
Figura 39 – Formação de produtos de hidratação com grande volume na amostra de CAF. ....	85

Figura 40 – Imagens das amostras de C (a) e CA (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.....	86
Figura 41 – Imagens mostrando em detalhe a fissura com quebra nas bordas na face inferior das amostras de CA. ....	87
Figura 42 – Imagens das amostras de CF (a) e CAF (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.....	87
Figura 43 - Imagens das amostras de CE (a) e CAE (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.....	88
Figura 44 - Imagens das amostras de CP (a) e CAP (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.....	89

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ciclo da descarbonização do concreto considerando as alternativas desde o clínquer até a construção final. Redução das emissões vinculadas ao (C1) clínquer, (C2) cimento, (C3) concreto, (C4) construção, (C5) recarbonatação. ....25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites composicionais normativos (teor em massa) para as diferentes tipologias brasileiras de cimento Portland. ....	26
Tabela 2 – Limite de abertura de fissura em estruturas de concreto armado, de acordo com a classe de agressividade do ambiente. ....	32
Tabela 3 – Principais técnicas para avaliação de autocicatrização. ....	35
Tabela 4 – Composição química do aditivo autocicatrizante segundo a FISPQ (Ficha de informação de segurança de produtos químicos). ....	41
Tabela 5 – Comparativo de desempenho de autocicatrização com diferentes aditivos autocicatrizantes. ....	41
Tabela 6 - Compostos gerados após ativação do aditivo, analisados por ensaio de MEV/EDS. ....	43
Tabela 7 – Resumo dos teores limites de composição dos cimentos. ....	51
Tabela 8 – Composição de cada mistura das pastas e sua sigla. ....	51
Tabela 9 – Composição das pastas para ensaios de caracterização. ....	53
Tabela 10 - Composição química (FRX) do aditivo, cimento e SCMs utilizados neste trabalho. ....	62
Tabela 11 – Resultados de propriedades físicas dos materiais anidros usados nas misturas cimentícias. ....	69
Tabela 12 – Cálculo da área de superfície específica equivalente de cada substituição mineral com base no ensaio de BET. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute* (Instituto Americano do Concreto)

CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de cálcio ou calcita

CP - Cimento Portland

CH - Hidróxido de cálcio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

EN – *European Standards* (Normas Europeias)

FIB - *Fédération Internationale du Béton* (Federação Internacional do Concreto)

GB – *GuoBiao Standards* (Normas Chinesas)

GCCA - *Global Cement and Concrete Association* (Associação Global do Cimento e Concreto)

ICRI - *International Concrete Repair Institute* (Instituto Internacional de Reparo de Concreto)

LC<sup>3</sup> - *Limestone Calcined Clay Cement* (Cimento de Argila Calcinada e Filler)

M.C.A. – Metros de coluna d'água

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

OPEX - *Operational expenditure* (Gastos Operacionais)

ReSHEALience – *Rethinking coastal defense and green Energy Service infrastructure through enHancEd durAbiLity high-performance fiber reinforced cement based materials* (Repensando a defesa costeira e as infraestruturas de serviços energéticos verdes através ganho de durabilidade com materiais cimentícios reforçados com fibra de alta performance)

RILEM - *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção)

RP – Redutor de Permeabilidade

SARCOS - *Self-healing as prevention Repair of Concrete Structures* (Autocicatrização como Prevenção de Reparo de Estruturas de Concreto)

SCMs – *Supplementary Cementitious Materials* (Materiais Cimentícios Suplementares)

SMARTINCS - *Self-healing Multifunctional Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems* (Tecnologias Autocicatrizantes Multifuncionais de Reparo Avançadas em Sistemas Cimentícios)

*PRAH - Permeability-reducing admixture: hydrostatic conditions* (Aditivo Redutor de Permeabilidade: condições hidrostáticas)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1 Objetivo geral .....	22
2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1 CIMENTO PORTLAND .....	23
3.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (SCMs).....	25
3.2.1 <i>Filler</i> calcário.....	28
3.2.2 Escória.....	29
3.2.3 Pozolana.....	30
3.3 DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	30
3.4 AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	33
3.4.1 Autocicatrização autônoma.....	36
3.4.2 Autocicatrização autógena.....	37
3.5 AUTOCICATRIZAÇÃO COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.....	43
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
4.1 MATERIAIS .....	46
4.2 MÉTODOS .....	48
4.2.1 Caracterização dos materiais: Etapa 1 .....	49
4.2.2 Formulação das pastas: Etapa 2 .....	50
4.2.3 Caracterização das pastas ativadas: Etapa 3.....	53
4.2.4 Ensaios de desempenho das pastas fissuradas e ativadas: Etapa 4 ....	55
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	60
5.1.1 Caracterização química .....	60
5.1.2 Caracterização mineralógica .....	62
5.1.3 Análises térmicas.....	66
5.2 FORMULAÇÃO DAS PASTAS.....	69
5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS ATIVADAS .....	71
5.3.1 Caracterização mineralógica .....	71
5.3.2 Análises térmicas.....	74

5.4	DESEMPENHO DAS PASTAS FISSURADAS E ATIVADAS.....	78
5.4.1	Autocicatrização: análise por microscopia ótica .....	78
5.4.2	Autocicatrização: análise por permeabilidade a baixa pressão .....	86
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material estrutural e de construção civil mais consumido do mundo. É utilizado na construção de moradias, no fornecimento de energia e saneamento, na infraestrutura de transportes e outros serviços básicos. Alcançou volume de produção mundial de 14 bilhões de m<sup>3</sup> no ano de 2020 segundo a GCCA - Associação Global de Cimento e Concreto (2022).

Considerando que o principal ligante do concreto é o cimento e que as cimenteiras são responsáveis por cerca de 7 % das emissões globais de CO<sub>2</sub> (Lins, 2017), essa indústria busca a descarbonização. Como alternativa sustentável, tem-se o uso de concretos com baixo consumo de cimento Portland, substituindo-o por adições minerais, como argilas calcinadas, *filler* calcário, finos carbonatados de concreto reciclado, etc. (Rocha; Cardeira, 2021).

As adições minerais, também conhecidas como materiais cimentícios suplementares (SCMs), são subprodutos de outras cadeias produtivas. Sua utilização, além de contribuir com a descarbonização, tem o objetivo de melhorar determinadas propriedades da mistura cimentícia, desde sua moldagem até idades avançadas (Lins, 2017).

Fonseca e Maintinguer (2018) reforçam que a construção civil é uma das principais responsáveis pelo consumo de matérias-primas, com até 75 % do total extraído no planeta, atrelado a obras novas e reparos/reconstruções. Portanto, outra alternativa para o desenvolvimento sustentável é trabalhar com estruturas de concreto de alta durabilidade. Estruturas longevas reduzem o consumo de materiais de construção, de energia e gastos financeiros e a geração de resíduos de demolição.

Segundo o comitê técnico TC 230-DUC (*Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*) da RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures), o principal parâmetro para prever a durabilidade potencial de uma estrutura de concreto, é a penetração de substâncias agressivas para seu interior. O fenômeno ocorre pela porosidade ou fissuração, ambas características intrínsecas do concreto. Estas características podem estar presentes na estrutura por diversos motivos como: efeitos de variação volumétrica, devido a gradientes de temperatura e umidade, exposição a ciclos de gelo-degelo, fogo e sobrecargas impostas na estrutura (Mehta; Monteiro, 2014). A facilidade de penetração de agentes agressivos no concreto, acelera a deterioração e

consequentemente, a corrosão das armaduras, o que reduz a vida útil da estrutura (Li *et al.*, 2023; Neville, 2016).

Segundo Muhammad *et al.* (2016), outro fator responsável pela redução da vida útil de estruturas de concreto é a alta permeabilidade da camada superficial/cobrimento. Sua espessura e qualidade são responsáveis por limitar a entrada de substâncias deletérias no interior da estrutura como CO<sub>2</sub>, cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis e ácidos, que causam sua degradação.

Em países industrialmente desenvolvidos, estima-se que 40 % dos recursos destinados à construção civil são usados para reparos e manutenções de estruturas existentes, e somente 60 % para novos empreendimentos (Mehta; Monteiro, 2014).

Sendo assim, De Belie *et al.* (2018) estudam técnicas para se obter estruturas que mantenham sua integridade ao longo do tempo, dada a capacidade de restaurar suas propriedades funcionais após sofrerem danos, como a fissuração. Os autores utilizaram materiais autoregenerantes ou autocicatrizantes incorporados ao concreto, os quais são classificados de acordo com seu mecanismo: autógena ou autônoma.

O mecanismo de autocicatrização autônoma, incorpora um material externo à mistura cimentícia, com objetivo de colmatar as fissuras, modificando e adequando o traço da matriz cimentícia a partir do uso de bactérias, químicos encapsulados, agentes expansores, redes vasculares, entre outros (Pacheco, 2020).

O mecanismo de autocicatrização autógena ou intrínseca, ocorre por meio dos materiais que compõem o próprio traço da mistura cimentícia e possuem a característica natural de colmatação das fissuras. Este mecanismo desenvolve-se a partir de fenômenos físicos, químicos por meio da hidratação tardia na matriz cimentícia (De Belie *et al.*, 2018).

Derivado do mecanismo autógeno, há também a autocicatrização autógena induzida ou estimulada. Neste caso, materiais são incorporados à matriz cimentícia para potencializar a sua autocicatrização natural, como materiais cimentícios suplementares, polímeros superabsorventes e aditivos autocicatrizantes, ou também conhecidos como aditivos autocicatrizantes redutores de permeabilidade (RP), sendo estes já utilizados em larga escala global (Van Tittelboom; De Belie, 2013).

Ding *et al.* (2023) explicam que estes aditivos, após serem ativados com água, formam uma estrutura cristalina mais densa por meio de precipitados bloqueadores de poros insolúveis, que impedem a passagem de fluídos pelos poros e capilares do concreto, reduzindo a sua permeabilidade. Estes aditivos também possibilitam a

colmatação de fissuras passivas de abertura usual. Isso ocorre por meio da formação de um conjunto compacto de cristais dendríticos multi ramificados, que aderem à matriz do concreto nos locais de formação destas fissuras.

Breugel (2012) e Ziegler *et al.* (2020) apontaram que, concretos com aditivos autocicatrizantes podem resultar em menores investimentos financeiros durante o uso/vida útil da estrutura, quando comparados às estruturas tradicionais de concreto. Apesar de um custo inicialmente maior, os reparos em estruturas com esses materiais são reduzidos, evitando a necessidade de tratamento de fissuras com injeção, armaduras corroídas e concreto deteriorado e deslocado com argamassa de reparo estrutural e membranas de proteção, entre outros. Essa redução na manutenção reduz o impacto ambiental da edificação, pela redução de consumo de material e energia em manutenção ou reconstrução.

Oliveira (2019) aponta como fundamental entender os mecanismos de ação do aditivo autocicatrizante na matriz cimentícia, pois isto impacta diretamente no seu potencial de autocicatrização. Fatores como: a composição da mistura cimentícia, devido o uso de diferentes tipos de cimento com SCMs, a cura e hidratação do material, a ativação do aditivo pela água, o processo de fissuração, com diferentes aberturas de fissuras em diferentes idades, entre outros, podem influenciar no seu desempenho. Zhang *et al.* (2017) ainda relatam outras alterações pelas reações de hidratação e nucleação, causadas por interações físicas e químicas nas misturas cimentícias com uso do aditivo autocicatrizante.

Diante deste contexto, com muitas variáveis que influenciam o desempenho do aditivo autocicatrizante, faz-se necessário avaliar as reações desencadeadas por ele em matriz cimentícia. Bem como, ilustrar a variação de sua interação com diferentes materiais cimentícios suplementares, como *filler* calcário (F), escória de alto forno (E) e pozolana - cinza volante (Z), sendo estes os SCMs utilizados em larga escala no país.

Sendo assim, foram estudadas pastas cimentícias com cimento Portland do tipo CP-I (composto por 90 a 95 % de clínquer, 5 % de  $\text{CaSO}_4$  e até 5 % de escória, pozolana ou *filler*), com aditivo autocicatrizante e os SCMs. A reação do aditivo foi observada por meio de análises mineralógicas (DRX) e térmicas (ATD/TG), de forma anidra e hidratada. Em complemento, para verificar a diferença do efeito autocicatrizante em relação à cada SCMs, foi realizada análise do selamento de fissuras nas amostras de forma visual, por meio de microscopia e permeabilidade.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Estudar o efeito de autocicatrização de fissuras pela ação do aditivo autocicatrizante (AA), em pastas cimentícias preparadas com Cimento Portland CP – I e com materiais cimentícios suplementares de *filler* calcário (F), escória de alto forno (E) e pozolana (Z).

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o aditivo autocicatrizante, o cimento CP - I, o *filler* calcário, a escória de alto forno e a pozolana, para identificar as propriedades de cada material;
- Definir a composição das pastas de cimento, em relação ao teor de substituição do CP – I por SCMs (F, E e P), usando como parâmetro comparativo suas áreas de superfície específica, a fim de se obter uma equivalência de reatividade para o aditivo, e atendendo os limites normativos de uso destes materiais;
- Investigar as características das pastas cimentícias com aditivo de autocicatrização e a relação com os diferentes SCMs por meio de análises mineralógicas (DRX) e térmicas (ATD/TG);
- Avaliar por meio da microscopia ótica e da permeabilidade, o desempenho do aditivo quanto a autocicatrização de fissuras nas diferentes pastas cimentícias estudadas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém uma breve revisão da literatura sobre as reações do cimento Portland e emissões de CO<sub>2</sub> da cadeia produtiva (seção 3.1) e o uso de materiais cimentícios suplementares (*filler* calcário, pozolana e escória) como adição mineral, incluindo aspectos relacionados a descarbonização do setor bem como as propriedades de superfície específica, sendo este o principal parâmetro funcional/de uso destes materiais (seção 3.2).

A seção 3.3 trata do processo de deterioração do concreto, seguido pela autocicatrização em materiais cimentícios, com ênfase no mecanismo autógeno induzido por aditivo autocicatrizante, e os respectivos fatores que influenciam a potencial colmatação de fissuras.

Por fim, faz-se uma breve revisão de tópicos relacionados com o uso do aditivo autocicatrizante e materiais cimentícios suplementares em concretos (seção 3.4).

#### 3.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é obtido a partir da mistura, moagem e tratamento térmico a alta temperatura de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), provenientes de fontes minerais a base de calcita e argilominerais. A partir do processamento térmico, chamado de clínquerização, obtém-se o clínquer, o principal composto do cimento. Nele é adicionado sulfato de cálcio (gesso), que permite controlar o tempo de pega e evitar o endurecimento imediato deste material, após sua mistura com água. A mistura final é constituída por 3CaO.SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S), 2CaO.SiO<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>S), 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A), 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF).

Quando este pó entra em contato com a água é desencadeada uma série de reações químicas, que ocorrem em velocidades diferentes e que se influenciam mutuamente, conduzindo a alterações químicas, físicas e mecânicas do sistema, tendo como produtos do processo de hidratação: C-S-H (silicato de cálcio hidratado), CH (hidróxido de cálcio) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita).

Segundo Castro, Liborio e Pandolfelli (2011), há diversas variáveis na composição destes materiais que influenciam nas propriedades do estado fresco e endurecido das misturas com Cimento Portland. As principais características, físico-

químicas, que influenciam as propriedades dos materiais cimentícios são a área de superfície específica e a distribuição granulométrica, por meio da reologia, bem como o teor/morfologia do  $C_3A$ , o teor de álcalis e o tipo de sulfato de cálcio adicionado ao clínquer.

A alteração das proporções dos compostos nas misturas modifica consideravelmente a reatividade dos componentes minerais do cimento com a água, dadas as interações físico-químicas entre os diferentes materiais componentes do cimento (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2011).

O processo de clínquerização é o principal responsável pela emissão de dióxido de carbono na obtenção do cimento Portland. Em escala global, é responsável por cerca de 7 % de toda a emissão de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e por 7 % do uso de energia industrial. Este índice deve-se ao fato do cimento ser a substância manufaturada mais consumida no mundo (Concrete Show, 2022).

Além destas emissões, o processo produtivo também tem alto consumo de matérias-primas naturais, alto consumo energético e alta demanda de transporte (Rebmann, 2011). Desta forma, foram estipuladas metas para redução das emissões de  $CO_2$  associadas ao Acordo de Paris (Brasil, 2022) e ao Roadmap Concreto Carbono Neutro 2050 (iniciativa lançada pela GCCA), que objetivam a produção de concreto neutro em carbono até 2050.

No Quadro 1 é possível verificar o ciclo da descarbonização, com a visão estratégica das cadeias envolvidas no processo, como cimenteira, concreteira, construtora, entre outros, indicando formas de atingir a neutralidade, por meio da abordagem “5C”: Clínquer, Cimento, Concreto, Construção e (re)Carbonatação.

Neste cenário, há um esforço mundial para reduzir o volume de cimento e conseqüentemente de clínquer no Cimento Portland. Com isso, pesquisadores e empresários buscam desenvolver um concreto sem cimento, como no Canadá, onde Mehrdad Mahoutin e Chris Stern desenvolveram um concreto substituindo 100 % do cimento Portland por escória de aço (Carbcrete, 2022).

Quadro 1 - Ciclo da descarbonização do concreto considerando as alternativas desde o clínquer até a construção final. Redução das emissões vinculadas ao (C1) clínquer, (C2) cimento, (C3) concreto, (C4) construção, (C5) recarbonatação.

C1: Clínquer	Substituição completa	Substituição do clínquer e novos clínqueres	Eficiência térmica	Captura e utilização do carbono
C2: Cimento	Produção de cimento com baixo teor de clínquer	Melhorar eficiência energética		Desenvolver aglomerantes inovadores
C3: Concreto	Usar cimento com baixo teor de clínquer	Otimizar a mistura		Aditivos para ajuste fino
C4: Construção	Massa térmica permite usar menos energia	Otimização da cadeia de suprimentos e impressão 3D	Estruturas de concreto podem durar vários ciclos de renovação	Concreto reciclável
C5: (re)Carbonatação	Mais de 25 % dos processos relacionados à produção do cimento, que emitem CO <sub>2</sub> , podem ser absorvidos			

Fonte: Rocha e Carneira (2021).

Segundo Concrete Show (2022), os cientistas japoneses Yuya Sakai e Ahmad Farahani, desenvolveram na Universidade de Tóquio, uma mistura que tem como composto principal a areia e o tetraalcoxissilano como ligante. A FIB (Federação Internacional de Concreto Estrutural) também vem disseminando novas tecnologias a base de ligantes geopoliméricos.

### 3.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (SCMs)

Materiais cimentícios suplementares (SCMs) já são adicionados ao cimento Portland em larga escala. Também chamadas de adições minerais, possuem ação semelhante ao cimento, para complementação ou substituição do clínquer, a fim de reduzir o custo econômico e o impacto ambiental.

O uso de SCMs é orientado de acordo com a NBR 16697 (2018), que define os teores mínimos e máximos, e as características de desempenho que os cimentos compostos devem alcançar após endurecidos (Tabela 1).

Tabela 1 - Limites composicionais normativos (teor em massa) para as diferentes tipologias brasileiras de cimento Portland.

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
		CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto-forno		CP III			25 - 65	35- 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI	90 - 100	0	0
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	-	75 - 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural		-		-	50 - 74	-	-

Fonte: NBR 16697 (2018).

Os SCMs, por serem subprodutos de outras cadeias produtivas, apresentam uma excelente potencialidade de uso/valorização. As pozolanas (cinzas volantes) são oriundas da queima de carvão mineral em termoelétricas, a escória de alto forno da indústria siderúrgica e o *filler* calcário da britagem dos agregados em pedreiras (Oliveira *et al.*, 2017).

Os SCMs de *filler* calcário, escória de alto forno e pozolana influenciam a cinética de hidratação e conseguem fornecer/alterar determinadas propriedades que o cimento puro (clínquer mais sulfato de cálcio) não teria. Características como: tempo de pega, permeabilidade, resistência mecânica, alteração na demanda de água, são algumas delas, pois modificam as características microestruturais dos cimentos (Cappellesso, 2018).

Segundo Costa (2013), uma característica dos materiais cimentícios que influencia a sua reatividade na hidratação, é a superfície específica. Quanto maior a área de superfície específica, maior a sua reatividade, pois maior será a disponibilidade de superfície para nucleação e precipitação, ou seja, haverá mais interação com outras espécies químicas.

Há também um aumento no efeito *filler* ou efeito de preenchimento, sendo um efeito físico, que possibilita uma menor porosidade nas misturas cimentícias já hidratadas, conforme verificado por Azzi (2020).

Cappellesso (2018) cita que as partículas maiores acabam retendo maior quantidade de material anidro dentro da matriz, podendo contribuir com a hidratação tardia.

Jiant *et al.* (2018) verificaram que, com o processo de moagem é possível aumentar especificamente a reatividade de um material.

O ensaio de superfície específica de maior precisão e portanto, utilizado neste trabalho, foi o BET (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller), que conforme Hoppe *et al.* (2017), mede a área de superfície específica dos materiais, considerando a sua rugosidade e irregularidades.

Neste ensaio é verificada a área acessível ou detectável da superfície de um sólido por unidade de massa deste material em equipamento. É utilizada temperatura constante em banho com nitrogênio líquido e pressão com nitrogênio gasoso, no qual as moléculas de nitrogênio são adsorvidas pela superfície da partícula (Anton-Paar, 2025).

### 3.2.1 *Filler* calcário

O *filler* calcário é um material carbonático e por se tratar de um mineral com menor reação química em comparação aos materiais cimentantes/pozolânicos, sua principal ação na mistura é física (chamado efeito *filler*). Dado seu tamanho e formato, há uma maior compacidade e refinamento dos poros, melhor trabalhabilidade, menor tendência à fissuração, menor permeabilidade e exsudação capilar, dependendo do teor aplicado (Cappellesso, 2018).

De acordo com Lins (2017) o *filler* influencia o sistema cimentício, por meio de mudanças no comportamento físico e químico, pois o diâmetro das partículas, a distribuição granulométrica e área de superfície específica podem alterar a hidratação do cimento. Quanto menor o diâmetro da partícula, maior será a influência no processo de hidratação.

A substituição de CP por *filler* poderá causar redução de resistência mecânica e conseqüentemente da durabilidade, vinculada à redução da reserva alcalina da mistura cimentícia, conforme comprovado por Oliveira *et al.* (2017). Uma menor concentração de ligante, implica numa menor taxa de aumento da fração volumétrica sólida preenchida pelos produtos de hidratação. Se a relação água/sólidos usada para testar a resistência do cimento for constante, isso causa um aumento na porosidade do sistema, o que reduz sua resistência (Johna *et al.*, 2018).

John *et al.* (2018) e Guan *et al.* (2020), concluíram que o *filler* calcário apresenta algumas reações químicas, ou seja, não é um material quimicamente inativo, porém com reatividade menor em relação as escórias e pozolanas. Conforme os pesquisadores, o carbonato de cálcio reage parcialmente com aluminatos hidratados, formando compostos carboaluminatos e etringita, aumentando a resistência da mistura. Os benefícios provenientes dos efeitos químicos não ocorrem apenas pela formação de novos tipos de hidratos, mas também pelo aumento do volume final de produtos hidratados, proporcionando uma diminuição da porosidade no sistema. O *filler* calcário também pode reagir com o aluminato de escórias ou pozolanas de forma sinérgica. De acordo com Guan *et al.* (2020), também pode atuar como agente de nucleação de produtos de hidratação e de aceleração da hidratação do cimento.

Lins (2017) comenta que, quando adicionado juntamente com outras adições minerais específicas, como no cimento de calcário e argila calcinada LC<sup>3</sup> (substituição

de grande parte do clínquer por uma combinação de *filler* e pozolana) o *filler* calcário pode participar de reações químicas, que contribuem com a resistência mecânica.

A reação de hidratação do *filler* calcário em misturas cimentícias com a fase C<sub>3</sub>A do cimento, forma carboaluminatos de cálcio. As suas finas partículas assumem cargas positivas e negativas, quando dispersas em água, que funcionam como um polo de atração pelos íons Ca<sup>2+</sup> e OH<sup>-</sup>, podendo atuar como pontos de nucleação ou precipitação para o CH (hidróxido de cálcio), possibilitando maior formação de CH após hidratação (Rahhal *et al.*, 2012).

### 3.2.2 Escória

A escória de alto forno é um subproduto da indústria siderúrgica, obtido pela reação a altas temperaturas do minério de ferro, fundentes e cinzas de carvão vegetal ou mineral, resultando em uma composição de cal, sílica e alumina (Fonseca; Maintinguer, 2018). Ela é classificada como material reativo, dado o resfriamento rápido da escória líquida quente em água, proporcionando a formação de uma estrutura amorfa e, então, reativa. Além disso, apresenta grande disponibilidade de fornecimento.

Segundo Van Tittelboom *et al.* (2013), a escória tem propriedades hidráulicas potenciais, porém mais lenta em comparação à hidratação do cimento. Sua reação de hidratação é ativada por substâncias como o CH, formando compostos cristalinos com propriedades de resistência mecânica de elevado potencial/interesse. Tal reação consome parte do CH livre e conseqüentemente reduz a formação de CaCO<sub>3</sub> (carbonato de cálcio).

Almeida (2008) cita que o material tem potencial para formar os produtos de hidratação mesmo sem reagir diretamente com o hidróxido de cálcio.

Cappellesso (2018) também aborda a maior presença de C-S-H gerada, em relação aos cimentos puros e correlaciona com a menor formação de hidróxido de cálcio e conseqüentemente redução do processo de carbonatação, dada a menor presença de C<sub>3</sub>S e maior de C<sub>2</sub>S em sua matriz.

### 3.2.3 Pozolana

A pozolana artificial (cinza volante), é um subproduto industrial proveniente da queima de carvão em usinas termelétricas. Este material é definido como silicoso ou sílico-aluminoso que possui pouca atividade aglomerante, porém quando finamente moído e hidratado, atua física e quimicamente nas reações com o cimento. Sua reatividade é decorrente da fração cristalina e inerte e da fração vítrea ou amorfa e passível de reação com hidróxido de cálcio (Hoppe, 2008).

Ainda segundo Hoppe (2008), o efeito físico ocorre devido a característica de extrema finura da pozolana, o que causa o efeito *filler* de enchimento. Isso também propicia maior dispersão dos grãos de cimento no estado fresco, causando um aumento da área de interação das fases anidras com a água. Também pode ter efeito nucleador, que propicia mais pontos de precipitação, e, conseqüentemente maior grau de hidratação.

O efeito químico ocorre devido a interação do material, na presença de umidade, com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, o que justifica a sua reação mais lenta. Os compostos hidratados similares ao do cimento, como C-S-H, precipitam e compõem o sistema. Porém, com o elevado consumo de hidróxido de cálcio, reduz-se a reserva alcalina do meio, o que facilita a carbonatação, que causa deterioração de estruturas de concreto armado (Hoppe *et al.*, 2017).

Helene e Andrade (2010) comentam que as pozolanas são utilizadas com objetivo de melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade das pastas, na mesma relação água/cimento.

## 3.3 DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O concreto é um material composto pela mistura entre o cimento, água, agregados graúdos e miúdos, e vem recebendo complementos para melhorar seu desempenho, como materiais cimentícios suplementares, aditivos, entre outros (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2011).

As estruturas executadas com concreto e aço, para suporte dos esforços de tração, ou seja, as estruturas de concreto armado, sofrem constante deterioração, que ameaçam sua integridade e segurança. As principais causas estão vinculadas a falhas de projeto ou executivas, exposição a ambientes agressivos, envelhecimento natural

dos materiais, uso inadequado ou falta de manutenção da estrutura, entre outros (Pinheiro; Junior, 2021).

De acordo com Van Tittelboom *et al.* (2012), a água/umidade é o principal agente causador da deterioração precoce das estruturas de concreto, e conseqüentemente, da corrosão das armaduras. Ela transporta para o interior do concreto os principais agentes de interação com o meio, como os cloretos, geralmente presentes na água do mar; os sulfatos, geralmente presentes no solo e esgoto; os carbonatos, geralmente presentes no ar em ambientes urbanizados; e os químicos, geralmente presentes nas indústrias.

De acordo com o ICRI (*International Concrete Repair Institute*) e com a RILEM TC 230-DUC (*Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*), a penetração de substâncias agressivas nas fissuras e na estrutura porosa do material cimentício, é o principal parâmetro para prever a durabilidade da estrutura. Desta forma, quanto mais poroso o concreto e a interligação entre os poros e quanto mais fissuras e maiores suas aberturas, maior é a penetração de agentes agressivos e conseqüentemente a deterioração do concreto.

A presença de fissuras no concreto é uma característica adversa, intrínseca e de maior incidência na estrutura, além de gerar risco estrutural e facilitar o surgimento de outras manifestações patológicas. Desta forma, há necessidade de intervenção para recuperação o que, conseqüentemente, aumenta o custo do ciclo de vida da estrutura, e ainda, em alguns casos, é necessário interromper o uso da estrutura para que se realize os reparos (Van Tittelboom; De Belie, 2013).

As fissuras podem ocorrer por diversos fatores, sendo as principais causas, em idades iniciais: o elevado calor de hidratação, a cura inadequada ou a falta dela, e conseqüentemente a retração plástica, as falhas executivas durante a concretagem e a desforma precoce. Em idades avançadas: carregamento mecânico extremo, variação volumétrica devido a gradiente de temperatura, contato com o meio ambiente agressivo como umidade e gelo/degelo, carbonatos, cloretos, sulfatos e ataque químico por variação volumétrica de pressão de cristalização de sais nos poros (Mehta; Monteiro, 2014).

Sendo a fissura uma característica já prevista no concreto, há uma determinação na norma NBR 6118 (2023), referente às limitações de sua abertura para o cálculo do projeto estrutural, de acordo com a classe de agressividade ambiental (Tabela 2). A classe I é fraca (zona rural ou submersa), a classe II é

moderada (urbana), a classe III é forte (marinha e industrial) e a classe IV é muito forte (industrial e respingos de maré). Em locais de maior agressividade, é necessário prever menor abertura de fissura, a fim de dificultar a entrada de agentes agressivos

Tabela 2 – Limite de abertura de fissura em estruturas de concreto armado, de acordo com a classe de agressividade do ambiente.

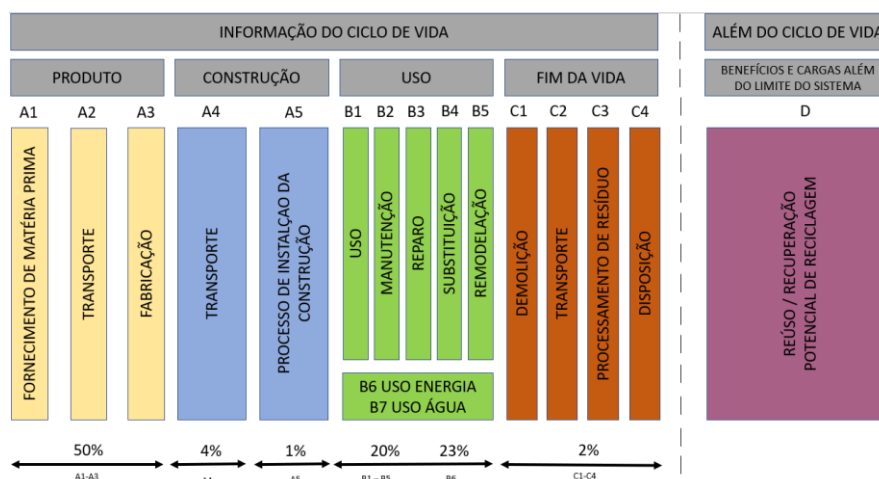
Classes de agressividade do ambiente	Exigências relativas à fissuração
CAA I	ELS-W $W_k \leq 0,4$ mm
CAA II e CAA III	ELS-W $W_k \leq 0,3$ mm
CAA IV	ELS-W $W_k \leq 0,2$ mm

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2023).

A NBR 6118 (2023), cita que fissuras reais em obra, podem eventualmente ultrapassar os limites normativos, geralmente por desvios/erros de obra, ou seja, em situações reais, mesmo limitando a abertura em projeto, a estrutura poderá ter maiores aberturas de fissuras.

Além dos danos causados à estrutura, a deterioração do concreto também afeta a sustentabilidade do sistema, pois aumenta a necessidade de manutenção, e consequentemente de consumo de energia e de matérias-primas para reparos. Além disso, ocorre a geração de resíduos em casos de demolições, conforme descrito na EN 15978 (2011), onde é detalhado o teor de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente para cada etapa durante todo o ciclo de vida de uma estrutura de concreto (Figura 1).

Figura 1- Ciclo de vida da estrutura de concreto com as emissões de CO<sub>2</sub> por etapa.



Fonte: Adaptado de EN 15978 (2023).

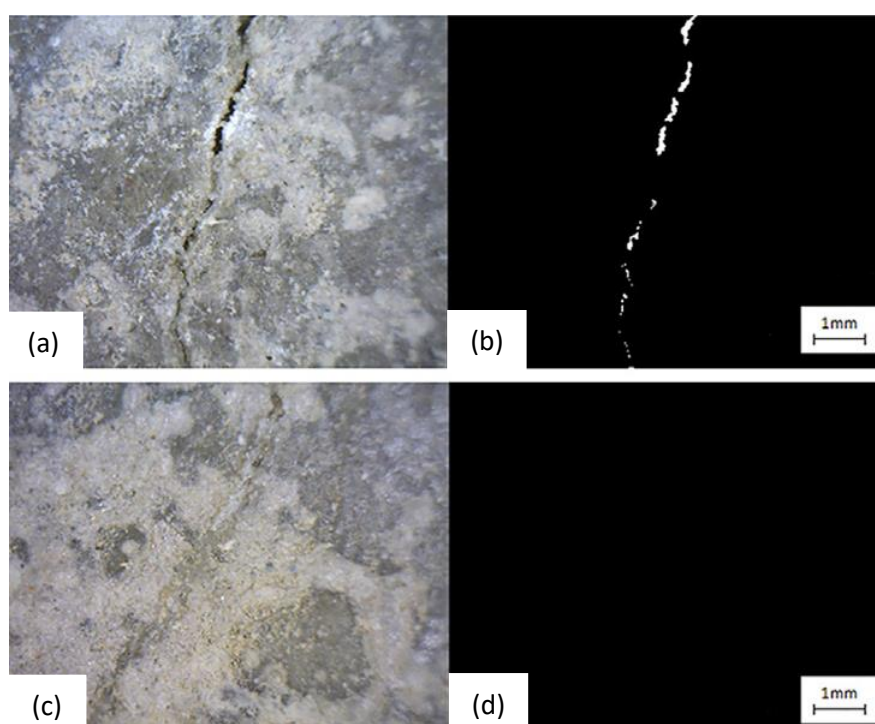
O aumento das intervenções também impacta no custo financeiro. Com base na Lei de Sitter (1984), há um aumento progressivo de razão 5 de acordo com a etapa que a intervenção for executada entre projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva, ou seja, quanto antes um dano for detectado e corrigido, mais eficaz e menos onerosa será a correção.

Há ainda a responsabilidade técnica dos profissionais envolvidos em uma estrutura de concreto, como descrito na ANBT NBR 12655 (2022), em que o profissional responsável pelo projeto estrutural deve especificar requisitos correspondentes à durabilidade da estrutura.

### 3.4 AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A autocicatrização, do inglês *self-healing*, significa cura, recuperação ou restabelecimento. É o mecanismo de selamento total ou parcial de fissuras pelo próprio material quando este sofre fissuração, como na Figura 2, que ilustra imagens de microscopia ótica e quantificação dela por pixel, em amostras fissuradas, antes e depois do processo de autocicatrização (De Belie *et al.*, 2018).

Figura 2 – Microscopia ótica (a, c) e quantificação por pixel (b, d) de amostras cimentícias fissuradas, antes (a, b) e depois (c, d) da autocicatrização da fissura.



Fonte: Cuenca *et al.* (2018).

Os primeiros trabalhos com materiais autocicatrizantes em concreto foram realizados somente na década de 90, e a partir dos anos 2000 é que o tema ganhou maior interesse (Tittelboom; De Belie, 2013), com volume crescente de publicações, passando de 350 em 2021 (Cappellesso *et al.*, 2023).

Em sua revisão bibliográfica, De Belie *et al.* (2018) apresentam diferentes metodologias que buscam restaurar as propriedades funcionais do concreto, após sua fissuração. Segundo o RILEM “Fenômeno de autocicatrização em materiais à base de cimento”, publicado pelo Comitê Técnico 221-SHC (*Self-Healing Phenomena in Cement Based Material*), criado em 2005, o fenômeno é dividido em dois tipos: autônomos e autógenos, e são determinados de acordo com a interação química sujeito-objeto. Porém, há desacordos na literatura quanto ao enquadramento de diferentes tipos de mecanismos dentro destas duas metodologias. Neste estudo foi adotada a classificação de De Belie *et al.* (2018).

Krelani (2015) menciona que além do tipo de mecanismo de autocicatrização, também há outras variáveis que influenciam o processo, como: composição da mistura cimentícia e sua idade, presença de água incluindo pressão e características, condições ambientais de exposição e abertura e forma da fissura. Por exemplo, segundo Li *et al.* (2023), o momento em que ocorre a fissura, traz uma cicatrização mais significativa, em virtude da maior disponibilidade de grãos anidros.

As condições ambientais também são amplamente avaliadas, pois há diversas formas de realizar a cura dos sistemas, que acabam influenciando nos resultados. Cappellesso (2018) menciona que a água é o mecanismo intensificador mais citado para se adquirir quase a maioria dos resultados para a autocicatrização de materiais cimentícios. Roig-Flores *et al.* (2015) analisaram quatro condições de exposição em concretos com aditivo autocicatrizante: imersão, contato de uma das faces das amostras com água, câmara com 95 % de umidade relativa e exposição ao ar a 40 % de umidade relativa. Obtendo como resultado a seguinte ordem de eficiência para o fechamento das fissuras: imersão em água > contato com água > cura úmida > exposição ao ar.

Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013), verificaram que ciclos de 12 h úmido e 12 h seco, apresentaram os melhores resultados referente à recuperação das propriedades mecânicas em amostras de concreto com aditivo autocicatrizante, justificada pela alta disponibilidade de CO<sub>2</sub> no ar durante o ciclo seco, facilitando a formação de CaCO<sub>3</sub>.

Reddy e Ravitheja (2019) verificaram que as amostras imersas e em contato com água obtiveram melhores resultados de selamento, em comparação com as amostras em secagem úmida e exposição ao ar, além disso, em amostras imersas houve a recuperação de 95 % da resistência à compressão.

Lin *et al.* (2023) verificaram uma maior taxa de fechamento das fissuras e recuperação mecânica em corpos de prova sob ciclo úmido/seco do que aqueles curados sob imersão em água ou exposição ao ar.

Doostkami *et al.* (2024) verificaram que, em comparação com ensaios de 28 dias, o ganho de desempenho das amostras com aditivo aos 56 dias foi mais marcante nos ensaios de penetração de cloretos e autocicatrização, o que sugere o predomínio do mecanismo de hidratação tardia em misturas com o aditivo.

Estas tecnologias vêm ganhando um grande destaque e vem sendo muito estudadas dado o foco no desenvolvimento, sustentabilidade e segurança das estruturas. Além disso, também estão vinculadas à condição de prevenção de realização de reparos em estruturas, por meio da formulação de materiais inovadores com propriedades autocicatrizantes. Os principais grupos de estudo sobre o tema são: SARCOS - “*Self-healing as prevention Repair of CONcrete Structures*”; ReSHEALience – “*Rethinking coastal defense and green Energy Service infrastructures through enhanced durability high-performance fiber reinforced cement based materials*”; e SMARTINCS - “*Self-healing Multifunctional Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems*”.

As principais técnicas utilizadas para avaliar a autocicatrização de fissuras estão apresentadas na Tabela 3 abaixo, bem como os autores que aplicaram as metodologias em seus estudos.

Tabela 3 – Principais técnicas para avaliação de autocicatrização.

<b>Técnica de avaliação de autocicatrização</b>	<b>Autores</b>
Velocidade de propagação de onda ultrassônica	Cappellesso (2018); Takagi (2013)
Microscopia	Pacheco (2020); Oliveira (2019)
Controle de fluxo de água passante pela fissura	Roig-Flores <i>et al.</i> (2015)
Recuperação das propriedades mecânicas	Sisomphon <i>et al.</i> (2013); Van Tittelboom e De Belie (2013)
Difusão de cloretos	De belie <i>et al.</i> (2019); Takagi (2013)
Avaliação microestrutural	Oliveira (2019)

Fonte: Autor (2025).

### 3.4.1 Autocicatrização autônoma

A autocicatrização autônoma ou “engenheirada” está associada à presença de materiais incomuns na matriz cimentícia, que são adicionados na matriz no momento de sua confecção. Tem como objetivo proporcionar uma maior capacidade autocicatrizante, seja pela adição de elementos que reagem quimicamente com a matriz ou por elementos que reagem somente após a ocorrência do dano pela liberação de um produto específico para este fim (Geraldo; Guadagnini; Camarini, 2021).

A bibliografia apresenta diversos tipos de autocicatrização autônoma, como: encapsulamento químico; soluções bacterianas; polímeros superabsorventes e redes vasculares.

Nos encapsulamentos químicos, como poliuretanos, os agentes são envoltos por materiais de porosidade compatível, como agregado leve. O gatilho para liberação do agente e reação de autocicatrização está vinculado com a ruptura durante o processo de fissuração do material cimentício, alteração do pH, alteração de umidade, entre outros. Neste processo, a variação de temperatura, poderá alterar a viscosidade do agente e outra desvantagem é a possibilidade e redução na resistência mecânica justificado pelo espaço ocupado pelas capsulas no interior do material (Pacheco, 2020).

As bactérias tem por objetivo induzir a precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) através de seu metabolismo, para preencher as fissuras, após suas paredes celulares serem rompidas no momento da fissuração (Cappellesso *et al.*, 2023). Porém, uma das principais dificuldades, é a necessidade de proteção ou de fornecimento de nutrientes adicionais para a sobrevivência de bactérias em matriz cimentícia alcalina (Lin *et al.*, 2023).

Pacheco (2020) explica que os polímeros superabsorventes possibilitam a entrada de líquidos em seu espaço com até 500 vezes sua massa, ou seja, são materiais expansivos. Quando estes entram em contato com a umidade, a absorvem, e preenchem o vazio aberto pela fissura.

Já as redes vasculares são incorporadas ao material cimentício como micro tubos conectados, que carregam o agente autocicatrizante, podendo este ser carregado externamente (Tittelboom *et al.*, 2016).

Segundo De Belie *et al.* (2018) a maioria destes mecanismos apresentam capacidade de selamento de fissuras com maior abertura, em comparação com a autocicatrização autógena, chegando a estudos com fissuras de até 1 mm preenchidas. Geralmente o processo completo da autocicatrização é mais rápido (1 dia à 3-4 semanas) em comparação aos autógenos.

Porém a maior parte dos estudos com estes materiais foi realizado em condições ideais de laboratório, havendo um histórico insuficiente em situações reais. Ocorre também menor facilidade de fornecimento e maior custo em comparação aos mecanismos autógenos.

### 3.4.2 Autocicatrização autógena

A autocicatrização autógena, intrínseca ou natural, está vinculada a capacidade do próprio concreto de autocicatrização fissuras, geralmente pequenas, da ordem de 0,2 mm. Este fenômeno ocorre pela presença de compostos que reagem com a água e não necessitam de operações e ou componentes externos, ou seja, são propriedades naturais e intrínsecas dos compostos do cimento e suas adições, por exemplo escória de alto forno, cinza volante e aditivo autocicatrizante, que potencializam este fenômeno (Van Tittelboom; De Belie, 2013).

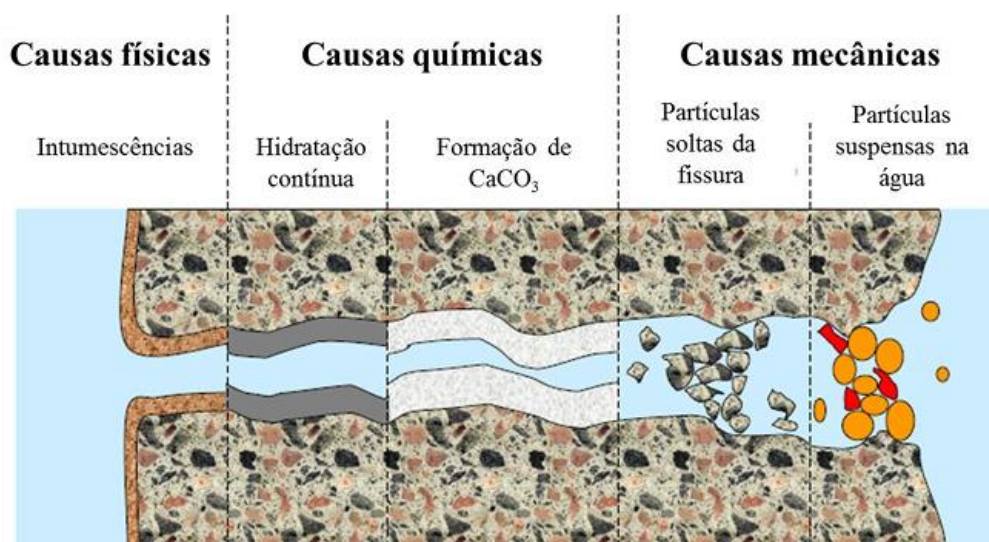
Segundo Reddy e Ravitheja (2019) e De Belie *et al.* (2018), a autocicatrização autógena ocorre principalmente por processos químicos, entre os íons de cálcio do cimento e os íons carbonato da água ou dióxido de carbono do ar, como mostrado na Figura 3. Na hidratação contínua ou tardia a reação ocorre com as partículas de cimento não hidratadas inicialmente e na formação/precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio) ocorre a carbonatação de CH (hidróxido de cálcio).

Os autores também informam que a resistência dos novos produtos de hidratação gerados pela hidratação tardia é maior que a da precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , dada sua semelhança com o C-S-H original, portanto tem maior potencial de recuperação das características mecânicas. Já no segundo há maior formação de CH na superfície onde entra em contato com o  $\text{CO}_2$  e, portanto, apresenta maior potencial de vedação da fissura.

Moha, Dewangan e Deo (2020) mencionam que cerca de 20 a 30 % das partículas do cimento permanecem anidras, ou seja, tem potencial para a hidratação

tardia. Já a formação de carbonato de cálcio, está vinculada com o processo de carbonatação, e portanto, é comum em idades avançadas.

Figura 3 – Principais mecanismos de autocicatrização autógena em materiais cimentícios expostos à água.



Fonte: Adaptado de Rilem (2024).

El-Newihy *et al.* (2018) dividiram em: formação de carbonato de cálcio; hidratação contínua em contato com umidade; inchamento da matriz cimentícia pela absorção de água do C-S-H; e sedimentação de detritos do processo de fissuração ou de impurezas da água, que gera um bloqueio mecânico. Os autores também informam que a hidratação contínua ocorre principalmente em concretos jovens, justificada pela concentração de partículas ainda não hidratadas, e a formação de carbonato de cálcio principalmente em idades avançadas.

Granger *et al.* (2007) concluíram que o uso de uma baixa relação a/c proporciona maior quantidade de cimento não hidratado e conseqüentemente, melhor autocicatrização autógena, pois haverá maior quantidade de material anidro para reagir.

No entanto, a autocicatrização autógena é limitada a pequenas fissuras, e eficaz quando há água disponível, além de difícil controle (Li *et al.*, 2023). Ainda há outro ponto negativo, pois a reação ocorre uma única vez. Assim que o cimento anidro reage, inviabiliza-se nova ocorrência desse fenômeno, sendo que os compostos já foram consumidos para gerar os cristais de preenchimento do vazio (Afifudin *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2016).

A abordagem experimental adotada neste estudo, foca a autocicatrização autógena estimulada de fissuras, com a incorporação de um aditivo autocicatrizante industrializado, adicionado na mistura cimentícia fresca, para estimular a autocicatrização. Esta é a aplicação prática atual mais relevante e utilizada em larga escala em diferentes projetos de engenharia civil, dada a sua facilidade de aquisição/disponibilidade, uso e seu custo-benefício atrativo, em comparação a outros métodos. Além disso, quando o aditivo autocicatrizante é incorporado à materiais cimentícios, fornece um benefício financeiro e sustentável, pois possibilita uma vida útil superior, especialmente em condições ambientais de elevada agressividade. Em consequência, há redução de reparos nas estruturas, reduzindo investimentos financeiros a médio e longo prazo, considerando-se o investimento inicial de aquisição do material. Em termos de benefício sustentável, este aumento da vida útil, reduz o consumo de material e energia para intervenções ou reconstruções, e assim reduz as emissões na atmosfera.

Segundo o relatório da RILEM (2013), a classificação deste tipo de mecanismo seria o autônomo, por haver a incorporação de um material diferente da composição normal de uma mistura cimentícia. Posterior a esta definição, De Belie *et al.* (2018), em sua revisão bibliográfica dos concretos autocicatrizantes, mencionam que este processo é classificado como autógeno estimulado. Oliveira (2019) corrobora esta definição, pois considera que a cicatrização autógena é estimulada pela hidratação no início do processo ou pela cristalização, ou seja, induzem a formação de um arranjo compacto de cristais dendríticos que aderem ao concreto nos locais de fissuração, preenchendo a sua abertura.

Conforme o ACI 212.3R-10 (2010), quando o aditivo entra em contato com a água, reage com os silicatos tricálcicos do cimento hidratado e forma depósitos cristalinos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), modificando e precipitando bloqueadores de poros insolúveis, que se desenvolvem por toda a matriz cimentícia, tornando-se parte permanente do concreto.

Takagi, Lima e Helene (2014), complementam que a reação química do aditivo ocorre entre este, a água e os subprodutos de hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais insolúveis compostos majoritariamente por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), tornando o concreto impermeável. Os autores ainda afirmam que o aditivo possui muitas propriedades físicas e químicas que são semelhantes aos dos argilominerais.

Segundo Ziegler (2020), as reações do aditivo podem ocorrer com água, hidróxido de cálcio (CH), grãos do cimento anidro e íons carbonatos, pois sua composição é dada por variados tipos de aglomerantes e produtos químicos ativos. Sendo assim, podem produzir C-S-H, atuam como pontos de nucleação e podem proporcionar um aumento na precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelo aumento da dissolução dos íons carbonato. Oliveira *et al.* (2020), comentam que o aditivo causa modificações nas reações de hidratação do cimento, alterações na nucleação e cinética de crescimento dos hidratos, além de alterações na morfologia das fases de hidratação.

Quando ocorre uma fissura, os produtos químicos ativos permeiam este local, pela alta umidade possibilitada pela abertura da fissura, e estimulam a formação de hidróxido de cálcio e cristais, por reação de recristalização. Neste processo há o consumo do cimento não hidratado e de CH (sua funcionalidade sofre restrição à medida que o próprio agente de cura é consumido no processo). Além disso, ocorre também a precipitação do carbonato de cálcio na presença de dióxido de carbono presente na superfície. Apesar de diferentes produtos de autocura serem formados, todos são à base de cálcio, e sua concentração e densificação é maior nos produtos de cicatrização, do que na matriz cimentícia não fissurada. Também foi verificado aumento da formação de C-S-H e  $\text{CaCO}_3$  em amostra com o aditivo em relação às amostras sem ele (Lin *et al.*, 2023).

Os aditivos autocicatrizantes são produtos comerciais com formulações mantidas em segredo pela indústria química (descrição genérica na Tabela 4) e com designação que não necessariamente representa sua estrutura molecular. Neste sentido há dificuldades em seu estudo, dadas as diversas variáveis que podem influenciar o processo e as diferentes formulações deste aditivo na indústria. Isso é verificado na literatura inconclusiva acerca dos efeitos do processo de cicatrização das fissuras e as condições para sua ocorrência (Oliveira, 2019).

Define-se que o material é composto majoritariamente por cimento, chegando a 80 % (Lin *et al.*, 2023), e que existe uma mistura de diferentes compostos, incluindo silicatos, pozolanas, escórias e cargas (Oliveira *et al.*, 2021).

Tabela 4 – Composição química do aditivo autocicatrizante segundo a FISPQ (Ficha de informação de segurança de produtos químicos).

<b>Nome químico</b>	<b>%</b>
Cimento Portland	65 a 80
CTS-15-1*	10 a 30
CTS-15-2*	5 a 10
Hidróxido de cálcio e magnésio	1,5 a 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio	1,5 a 6
Hidróxido de cálcio	1 a 2

\* Segredo industrial - a porcentagem exata (concentração) da composição foi retirada como segredo industrial.

Fonte: Adaptado de Penetron (2021).

Na Tabela 5 são apontados os desempenhos de selamento de fissura estudado por diferentes autores, com diferentes aditivos autocicatrizantes comercializados. Nesta tabela não são comparadas as demais variáveis do processo.

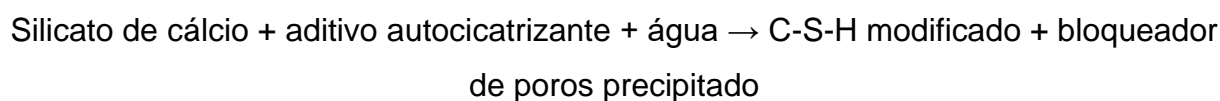
Tabela 5 – Comparativo de desempenho de autocicatrização com diferentes aditivos autocicatrizantes.

<b>Autor</b>	<b>Aditivo autocicatrizante</b>	<b>Desempenho de autocicatrização</b>
Cuenca, Mezzena e Ferrara (2018)	Penetron Admix	Fissura selada
Xue <i>et al.</i> (2020)	Penetron Admix	Fissura selada
Ferrara <i>et al.</i> (2014)	Penetron Admix	Fissura selada
Sisomphon <i>et al.</i> (2013)	Xypex Admix	Fissura selada
Wang <i>et al.</i> (2022)	Xypex Admix	Fissura selada
Azarsa, Gupta e Biparva (2019)	Não identificado	Melhorou selamento da fissura

Fonte: Autor (2024).

Roig-Flores *et al.* (2015), afirmam que os hidróxidos de cálcio, formados a partir da hidratação do cimento, são os responsáveis por reagir com o aditivo. Ziegler *et al.*

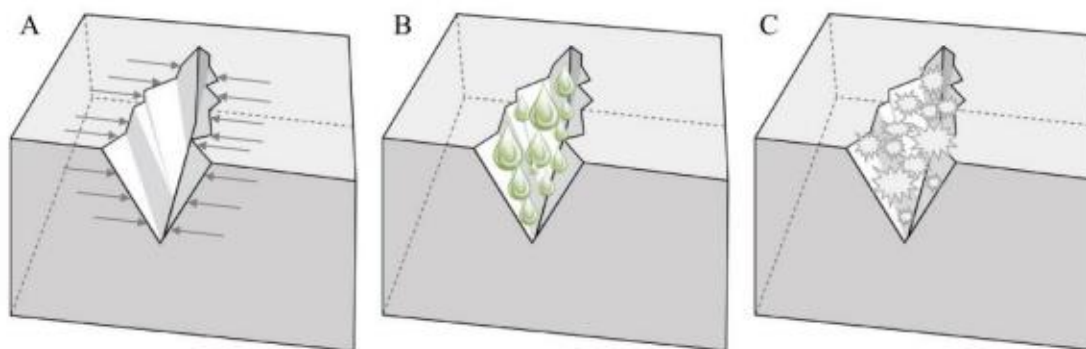
(2020), sugerem que a reação de aditivos autocicatrizantes com compostos cimentícios ocorre conforme a equação:



De forma resumida, Cappellesso *et al.* (2023) abordam que o aditivo provoca alteração nas reações de hidratação do cimento, na cinética de nucleação e no crescimento dos hidratos pelas interações físicas e químicas no sistema cimento-aditivo.

O fornecedor do aditivo autocicatrizante utilizado neste estudo indica que o aditivo consegue selar fissuras passivas/estáticas, ou seja, que não estão movimentando, com maiores aberturas, de até 0,5 mm, desde que entre em contato com água para que ocorra as reações insolúveis nos vazios, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Fenômeno de autocicatrização: abertura de fissura (a), concreto aditivado em contato com umidade (b) e autocicatrização (c).



Fonte: Van Tittelboom e De Belie (2013).

Se ao longo dos anos surgirem novas fissuras na estrutura, os aditivos autocicatrizantes continuam reagindo e sendo ativados em presença de água. Isso é possível pela hidraulicidade latente desse ativo, ou seja, enquanto houver espaço disponível para precipitação, aglomerante anidro e CH, ocorrerá a recristalização tanto na porosidade capilar do concreto quanto nas fissuras (Van Tittelboom *et al.*, 2012).

O aditivo também atua na redução da permeabilidade das misturas cimentícias, pelo preenchimento dos poros e capilares com depósitos cristalinos insolúveis. É

previsto na NBR 11768 (2011) como redutor de permeabilidade (RP), no GB 18445 como materiais impermeabilizantes cimentícios por cristalização capilar e na ACI 212 R3 como PRAH (permeability-reducing admixture: hydrostatic conditions), para concreto exposto a pressão hidrostática. Segundo Ziegler *et al.* (2020), as estruturas com o aditivo podem suportar até 14 bar de pressão de água.

### 3.5 AUTOCICATRIZAÇÃO COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Comparando estudos sobre a autocicatrização de fissuras em misturas cimentícias, existe um consenso sobre as principais formações cristalinas geradas na superfície da fissura, sendo majoritariamente C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio), conforme mostrado na Tabela 6. As identificações foram realizadas pelo ensaio com microscópio eletrônico de varredura com espectroscopia de energia dispersiva de raios X (MEV/EDS).

Tabela 6 - Compostos gerados após ativação do aditivo, analisados por ensaio de MEV/EDS.

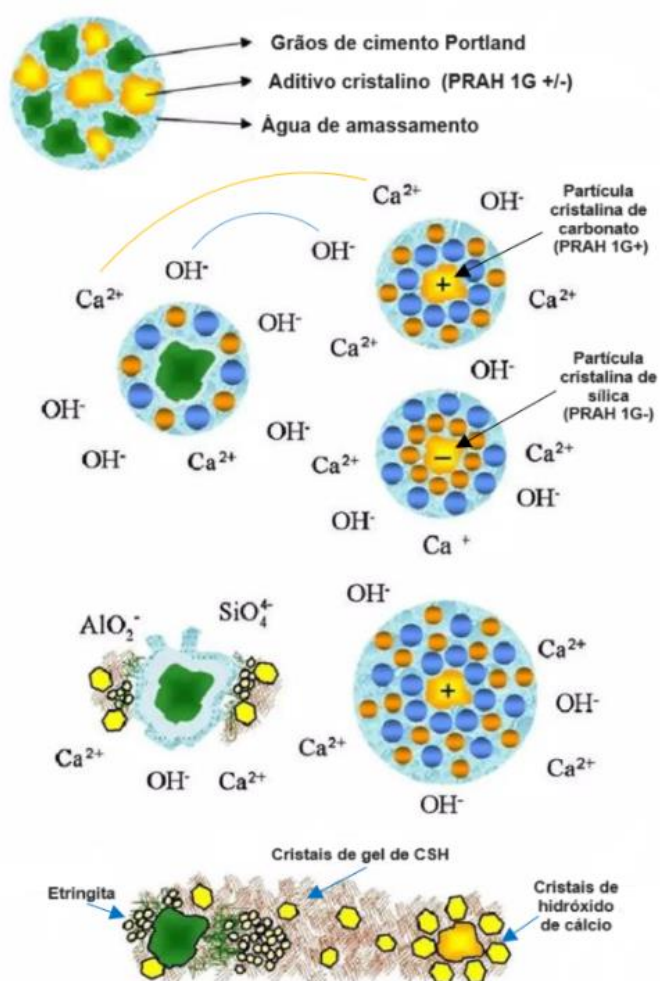
<b>Autor(es)</b>	<b>Compostos gerados após hidratação</b>
ACI (2010)	C-S-H
Roig-Flores <i>et al.</i> (2015)	$\text{CaCO}_3$ e C-S-H
Oliveira <i>et al.</i> (2019)	CH
Guan <i>et al.</i> (2020)	$\text{CaCO}_3$ , C-S-H e etringita
Moha, Dewangan e Deo (2020)	C-S-H e alguns cristais de etringita
Sisomphon; Copuroglu; Koenders (2013)	$\text{CaCO}_3$ , C-S-H e AFt
Ferrara; Krelani; Moretti (2016)	Principalmente C-S-H
Cuenca; Tejedor; Ferrara (2018)	Principalmente C-S-H
Ferrara; Krelani; Carsana (2014)	C-S-H e AFt
Jiang <i>et al.</i> (2018)	Principalmente $\text{CaCO}_3$

Fonte: Autor (2024).

De forma geral, estas são as principais formações cristalinas da hidratação dos cimentos, porém com a utilização do aditivo autocicatrizante há uma potencialização destas formulações. Conforme Takagi *et al.* (2018), o aditivo tem efeito de dissolução

e recristalização de subprodutos da hidratação do próprio cimento, ou seja, sua atividade hidráulica ocorre em consequência da reação química de outros compostos, tendo efeito catalizador na hidratação deles, favorecendo a nucleação e densificação da pasta de cimento (Figura 5).

Figura 5 - Etapas de reação de recristalização ou hidratação do aditivo autocicatrizante.



Fonte: Takagi *et al.* (2018).

Segundo De Belie *et al.* (2018), na reação autógena de autocicatrização, o cimento mais puro tem maior potencial de formação cristalina para o preenchimento de poros e capilares, pois tem maior concentração de clínquer, sendo este a principal fonte de íons  $\text{Ca}^{2+}$ , que são os responsáveis pela formação de  $\text{CaCO}_3$ . Edvardsen (1999) explica que, a formação do  $\text{CaCO}_3$  ocorre a partir da reação entre os íons cálcio

(Ca<sup>2+</sup>) originados da matriz de concreto e a água disponível na forma de íons bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ou íons carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), ou por meio do dióxido de carbono presente no ar (CO<sub>2</sub>). Li *et al.* (2018) concluem que o aditivo tem a função de aumentar a dissolução destes íons Ca<sup>2+</sup>, ou seja, potencializar a reação de autocicatrização.

Na sua conclusão, Oliveira (2019) menciona que é possível que os mecanismos físico-químicos de ação do aditivo correspondam ao somatório de vários processos, podendo este reagir diretamente com a água, grãos anidros, CH, íons carbonatos, bicarbonatos. As reações podem ser: a interação do CH com a sílica em sua composição produz C-S-H; aumento da dissolução do Ca<sup>2+</sup> produzem CaCO<sub>3</sub>; e pode ser ponto de nucleação e precipitação de CH para a formação de C-S-H, carboaluminatos, AFt entre outros.

Na análise de desempenho entre o aditivo autocicatrizante e materiais cimentícios suplementares, Sahamaran, Yildirim e Erdem (2013) observaram melhor desempenho da autocicatrização com o aditivo em misturas com uso de escória em comparação com a pozolana, isso porque apesar da pozolana ter maior quantidade de material não reagido, a escória consegue reagir no processo de hidratação mesmo com pouco hidróxido de cálcio decorrente da redução de cimento.

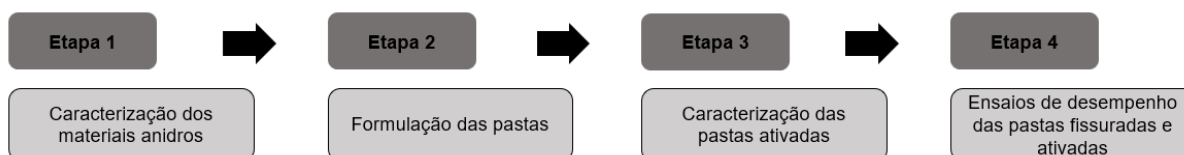
Segundo Van Tittelboom *et al.* (2012), as escórias de alto forno e as pozolanas, por terem reação mais lenta, possuem maior quantidade de material anidro, o que possibilita o mecanismo de autocicatrização autógena por hidratação tardia, porém, por consumirem CH, podem reduzir o potencial de cicatrização por meio da formação do CaCO<sub>3</sub>. Os autores verificaram que o efeito de autocicatrização foi melhor nas amostras com escória de alto forno do que com pozolana. Cappellesso (2018) reforça que as cinzas volantes e escórias de alto forno são materiais com capacidade de autocicatrização autógena, devido as suas reações tardias decorrentes da hidratação incompleta dos materiais constituintes do cimento.

Guan *et al.* (2020) comentam que o desempenho da autocicatrização em amostras com uso de *filler* calcário é melhor do que as amostras de referência, ou seja, de concretos convencionais sem o aditivo. Oliviera *et al.* (2015) também corroboraram esta informação com base nos resultados de seus ensaios.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme ilustrado na Figura 6 abaixo, o procedimento experimental foi realizado em quatro etapas.

Figura 6 – Fluxograma com as etapas do procedimento experimental.



Fonte: Autor (2024).

A primeira etapa do estudo foi composta pela caracterização dos materiais utilizados neste trabalho: cimento Portland CP I, aditivo autocicatrizante e os SCMs *filler* calcário (F), escória de alto forno (E) e pozolana/cinza volante (P).

A partir das caracterizações dos materiais, na segunda etapa foi determinado o teor de substituição de cimento pelos SCMs, de acordo com os limites estabelecidos em norma e os respectivos valores de superfície específica (BET). Desta forma, os teores de cada SCMs foram equivalentes em área de superfície específica.

Com as proporções definidas, na terceira etapa, foram moldadas pastas de cimento Portland, com e sem aditivo autocicatrizante e com os diferentes SCMs, separadamente.

Na etapa final, após análise e comparação dos resultados obtidos nas caracterizações anteriores, foram moldadas pastas nas mesmas proporções da etapa anterior. O objetivo desta etapa foi realizar ensaios de desempenho de autocicatrização por permeabilidade e microscopia óptica.

### 4.1 MATERIAIS

O cimento utilizado foi o CP I (Cimento Portland comum, CSN - Companhia Siderúrgica Nacional), cimento com baixo teor de materiais cimentício suplementar, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018) tendo de 95 a 100 % de clínquer + sulfato de cálcio e até 5 % de SCMs. A importância do uso deste ligante hidráulico, na base experimental da pesquisa, se dá pelo menor teor de SCMs. Sendo assim, possibilita

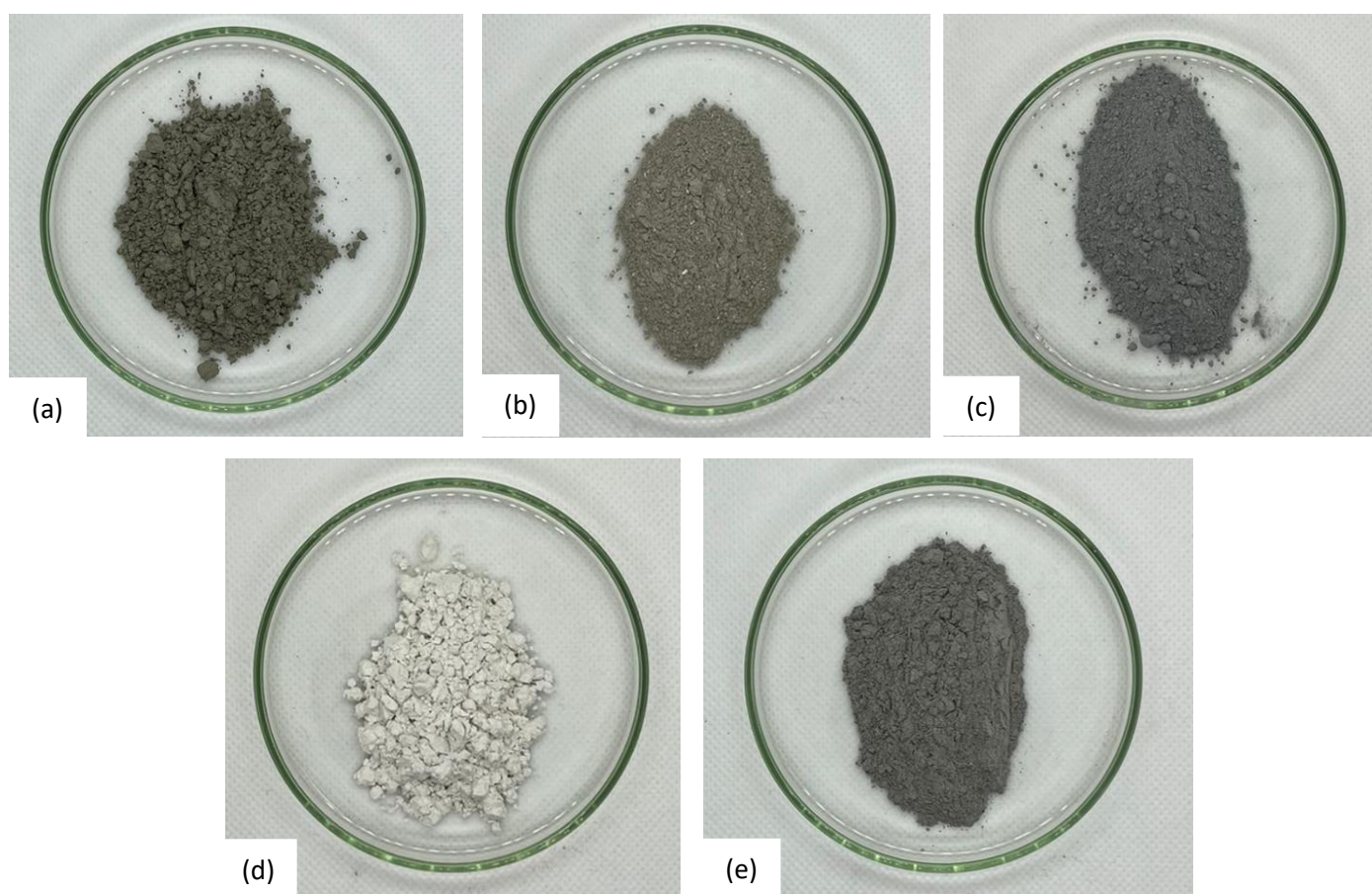
uma análise ampliada dos diferentes SCMs com o aditivo autocicatrizante a partir das composições preparadas e das propriedades apresentadas.

Os três materiais cimentícios suplementares utilizados foram o *filler* calcário (fabricante: Botuverá); escória de alto forno (fornecedor: CSN), e a pozolana proveniente da Termoelétrica de Capivari de Baixo/SC.

O aditivo autocicatrizante utilizado foi o Penetron Admix P da marca Penetron (Penetron Brasil).

Os materiais anidros utilizados estão ilustrados na Figura 7, apresentados em sua granulometria conforme o fornecedor/fabricante, com exceção da escória, que precisou ser cominuída até passar em peneira com de malha 325 mesh (45  $\mu\text{m}$ ), pois apresentava-se em granulometria superior e, por este processo, apresenta-se com coloração branca.

Figura 7 – Fotografia dos materiais utilizados CP I (a); aditivo autocicatrizante (b); *filler* calcário (c); escória de alto forno (d), e pozolana/cinza volante (e).



Fonte: Autor (2024).

## 4.2 MÉTODOS

Para possibilitar a análise dos materiais anidros e suas pastas hidratadas, relacionando as reações desencadeadas pelos SCMs em conjunto com o aditivo, foram realizados ensaios de caracterização físico-químicos. Adicionalmente, para possibilitar a definição das proporções equivalentes dos SCMs em cada mistura nas pastas, foram analisadas propriedades de superfície. Por fim, para validar a eficiência das misturas, foram realizados ensaios de desempenho (Figura 8).

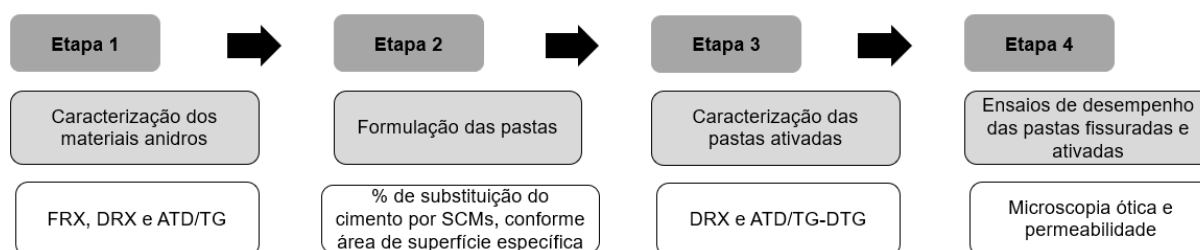
A caracterização dos materiais foi feita por meio de ensaios de massa específica, granulometria, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG).

Para definir as formulações, foram identificadas as áreas de superfície específica (BET) de cada material anidro.

A caracterização das pastas hidratadas e ativadas foi feita por meio de ensaios de difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG).

Para os ensaios de desempenho, as amostras de pasta foram fissuradas de forma controlada e monitoradas quanto ao fechamento da fissura antes e depois da ativação do aditivo por água. Foi realizada análise visual por microscopia ótica do preenchimento físico da fissura e controle de fluxo passante em permeâmetro de baixa pressão, fixado na área fissurada da amostra, para verificação da permeabilidade.

Figura 8 – Ensaios a serem executados em cada etapa do procedimento experimental.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.1 Caracterização dos materiais: Etapa 1

Na Etapa 1, foi feita a caracterização dos materiais anidros incluindo: aditivo autocicatrizante Penetron Admix P, CP I e materiais cimentícios suplementares de *filler* calcário, escória e pozolana. Foram realizados ensaios de granulometria a laser, superfície específica (BET), massa específica real (picnometria), fluorescência de raios X (FRX) com perda ao fogo, difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG).

Antes da realização dos ensaios das Etapas 1, 2, 3 e 4, toda amostra de escória, que se apresentava em maior volume retido na peneira de malha 30 mesh (600  $\mu\text{m}$ ), foi cominuída em moinho de bolas, até se tornar passante na peneira de malha 325 mesh (45  $\mu\text{m}$ ). Os demais materiais foram usados em sua granulometria original com tamanho médio de até 20  $\mu\text{m}$ , com exceção da pozolana, com até 58  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, conforme necessidade requerida por cada ensaio da Etapa 1, algumas amostras passaram pelo moinho de bolas.

Para análise complementar das amostras anidras, foi realizado ensaio de granulometria a laser, a fim de conhecer a distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas. O ensaio foi realizado com uso de um equipamento PSA 1090 L (Anton Paar, Áustria). A análise foi desenvolvida por via úmida através do meio dispersor em álcool. O equipamento usa espectroscopia de difração a laser (LDS), onde um feixe do laser é direcionado para as partículas dispersas, em seguida, a luz do laser é difratada pelas partículas e o padrão de difração correspondente é detectado e avaliado, em uma faixa de análise de 0,04 a 500  $\mu\text{m}$ .

O ensaio de superfície específica, foi executado conforme o método de Brunauer-Emmett-Teller (BET), foi realizado com a finalidade de encontrar um teor equivalente entre as diferentes substituições, que esteja dentro dos limites da norma NBR 16697 (2018), para determinação do teor fixo médio de substituição ao clínquer.

As amostras passaram por um processo de desgaseificação, para eliminar possíveis obstruções ou umidade adsorvida na superfície das partículas, e foram então caracterizadas em um equipamento modelo NOVA 1200e (Quantachrome Instruments, Estados Unidos). Ressalta-se que os ensaios foram conduzidos à condição de temperatura constante em banho com nitrogênio líquido e submetidos à pressão com nitrogênio gasoso, no qual as moléculas de nitrogênio são adsorvidas pela superfície da partícula.

A massa específica das amostras foi determinada por picnômetro de gás hélio modelo Ultrapyc 5000 (Anton Paar, Áustria).

A caracterização química foi realizada por fluorescência de raios X (FRX) em um equipamento modelo EDX 7000 (Shimadzu, Japão), seguindo o método semi-quantitativo de óxidos. As amostras analisadas foram cominuídas em moinho, até se tornarem passantes em peneira de malha 270 mesh (53  $\mu\text{m}$ ), obtidas após moagem a seco em um moinho tipo gira-jarros antes do ensaio. Esta caracterização foi complementada com o ensaio de perda ao fogo (PF) à temperatura 950 °C, seguindo a norma D7348 (ASTM, 2021).

Para a determinação qualitativa das fases cristalinas, foi realizado ensaio de difração de raios X (DRX), com as amostras em pó, passantes na peneira de malha 325 mesh (45  $\mu\text{m}$ ). O equipamento utilizado foi o modelo D-5000 (BRUKER AXS, Estados Unidos), equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. A amostra foi analisada no intervalo angular de 3 a 70 °,  $2\theta$  em passo de 0.05 °/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1 ° e 0.6 mm no detector.

A identificação parcial das fases foi realizada por meio da comparação das intensidades dos picos, com os difratogramas contidos no banco de dados ICDD (International Center for Diffraction Data com sede nos EUA) empregando o software X'Pert High Score.

Para a verificação do comportamento térmico, os materiais foram cominuídos até se tornarem passantes na peneira de malha 270 mesh (53  $\mu\text{m}$ ). A análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG), foi realizada em equipamento SDT Q 600 modelo STA 449F3 JUPITER, (NETZSCH, Alemanha). A taxa de aquecimento usada para a amostra foi de 10 °C/min, variando a temperatura de 35 °C até 1.000 °C, sob fluxo de ar sintético.

#### **4.2.2 Formulação das pastas: Etapa 2**

Para definição do teor de substituição do clínquer por *filler* calcário, pozolana e escória de alto forno, foram avaliados os percentuais limites que constam na NBR 16697 (2018). O teor que atende os limites estabelecidos na norma, entre todos os SCMs (*filler*, escória e pozolana), considerando-se CP II – E e CP III em conjunto para

a escória e CP II – Z e CP IV em conjunto para a pozolana, foi de 15 %, conforme verificado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos teores limites de composição dos cimentos.

<b>Cimento</b>	<b>Escória de alto forno (%)</b>	<b>Pozolana (%)</b>	<b>Filler calcário (%)</b>
CP II - E	6-34	-	0-15
CP III	35-75	-	0-10
CP II - Z	-	6-14	0-15
CP IV	-	15-50	0-10
CP II - F	-	-	11-25

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2025).

Também foram estabelecidas as formulações de cada pasta cimentícia, considerando as composições mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição de cada mistura das pastas e sua sigla.

<b>Sigla</b>	<b>Composição</b>
C	CP I + água
A	Aditivo autocicatrizante + água
CA	CP I + aditivo autocicatrizante + água
CF	CP I + <i>filler</i> calcário + água
CAF	CP I + <i>filler</i> calcário + aditivo autocicatrizante + água
CE	CP I + escória + água
CAE	CP I + escória + aditivo autocicatrizante + água
CP	CP I + pozolana + água
CAP	CP I + pozolana + aditivo autocicatrizante + água

Fonte: Autor (2025).

Foi determinado o teor equivalente de cada SCMs em relação ao cimento, com base nos ensaios de superfície específica por BET. Em paralelo foram analisados os ensaios de massa específica, picnometria com gás hélio, e granulometria a laser, em comparação com os resultados de BET, conforme Tabela 9. Foi definido utilizar este parâmetro principal como comparativo equivalente entre os SCMs, pois a reatividade

do clínquer, referente à hidratação do cimento, está vinculada ao tamanho de partícula e sua distribuição granulométrica, as quais são determinadas com base em sua moagem e taxa de resfriamento (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2011).

Foi fixada a dosagem do aditivo autocicatrizante em 0,8 % sobre o peso do cimento, seguindo a orientação do fabricante, que atende o desempenho em concretos convencionais. Como foi realizada substituição parcial do cimento por SCMs, a dosagem foi considerada sobre o peso total (cimento + SCM).

Também foi fixada a relação água/cimento + SCM em 0,4, ou seja, 1 parte de água para 2,5 partes sólidas, a fim de atingir a trabalhabilidade mínima para moldagem das amostras, e atender a quantidade mínima necessária para hidratação completa da matriz, considerada 0,36 por Neville (2016).

Para quantificar as proporções de substituição do cimento por SCM, foi calculada a equivalência de 15 % de área de superfície específica do cimento, em relação a cada material cimentício suplementar, tendo como base uma amostra de 30 g, que foi a quantidade necessária para moldagem dos corpos de prova de cada mistura. Os cálculos estão descritos no Anexo A.

Nos cálculos encontramos inicialmente a área de superfície total da amostra, considerando-a somente cimento, com massa total de 30 g. Posteriormente calculou-se a área de superfície equivalente a 85 % de cimento, sendo esta a quantidade fixa de cimento para todas as amostras. Então verificou-se esta quantidade em massa, considerando-a somente cimento, ou seja, calculando com base na área de superfície deste.

Por fim, foi calculado a área de superfície equivalente a 15 % para cada substituição com SCMs (F, E e P) e também a equivalência deste resultado em massa, para possibilitar a sua formulação para moldagem, que se dá em gramas.

Na Tabela 9 são apresentadas as quantidades de cada material utilizado nas composições das misturas definidas, para a moldagem das amostras. Com base nestas proporções foram posteriormente calculadas as quantidades para as moldagens das amostras maiores, para ensaios de desempenho das pastas fissuradas e ativadas.

Tabela 9 – Composição das pastas para ensaios de caracterização.

Mistura	Cimento (g)	Aditivo (g)	Filler (g)	Escória (g)	Pozolana (g)	Água (mL)
C	30,00	-	-	-	-	12,00
A	-	30,00	-	-	-	12,00
CA	30,00	0,24	-	-	-	12,10
CF	25,50	-	3,79	-	-	11,72
CAF	25,50	0,23	3,79	-	-	11,81
CE	25,50	-	-	8,63	-	13,65
CAE	25,50	0,27	-	8,63	-	13,76
CP	25,50	-	-	-	6,91	12,96
CAP	25,50	0,26	-	-	6,91	13,07

Fonte: Autor (2024).

### 4.2.3 Caracterização das pastas ativadas: Etapa 3

Com objetivo de avaliar as reações desencadeadas pelo aditivo com cada SCM e os produtos de autocicatrização após a hidratação das pastas, foram moldados corpos de prova de 2,6 cm Ø superior x 2,2 cm Ø inferior x 2 cm de altura (Figura 9), utilizando as proporções definidas no item 4.2.2, e realizados ensaios de difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG).

Figura 9 – Molde e corpos de prova para ensaio em pasta de ATD/TG e DRX.



Fonte: Autor (2025).

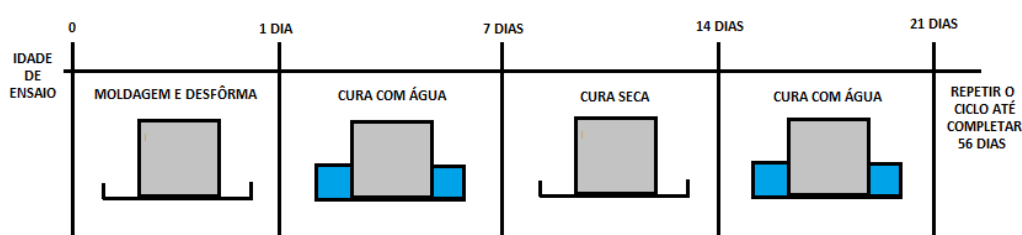
Para preparação das pastas, os materiais foram previamente pesados separadamente em balança de precisão 0,01 g modelo UX6200H (Marte, Brasil).

Os materiais anidros foram homogeneizados de forma manual com haste metálica, conforme composição de cada mistura. Em um recipiente metálico, foi despejada a quantidade total de água e gradativamente adicionados os materiais

anidros. Simultaneamente, os materiais foram misturados de forma manual com haste metálica, até atingir uma mistura homogênea, formando uma pasta, a qual foi adicionada nas fôrmas plásticas com desmoldante.

Os corpos de prova foram retirados dos moldes após 24 h, quando se apresentaram adequados para desmoldagem e iniciou-se o processo de cura e ativação do aditivo, seguindo a orientação do fornecedor. Objetivando a intensificação do processo de autocicatrização, sendo a água fundamental para o desenvolvimento das reações e o CO<sub>2</sub> responsável pela carbonatação, as amostras foram curadas conforme Figura 10. Cada variável foi mantida em recipiente individual e permaneceram 7 dias com metade do corpo de prova submerso em água e a outra metade acima do nível d'água e mais de 7 dias em cura seca (ambiente natural de laboratório), mantendo-se este ciclo sucessivamente até completarem 56 dias.

Figura 10 – Procedimento de cura das amostras para ativação do aditivo.



Fonte: Autor (2023).

A orientação de cura com ciclos de molhagem e secagem é justificada pela disponibilidade de troca com CO<sub>2</sub>, ou seja, carbonatação do hidróxido de cálcio. Já em situação de submersão em água, os vazios permanecem preenchidos com H<sub>2</sub>O, não permitindo esta reação.

Cada amostra, após a cura e ativação, ficou exposta a temperatura ambiente por 3 dias, para a secagem e liberação da água livre. Depois foi cominuída em moinho de bolas até passar na peneira de malha 325 mesh (45 µm), para realização dos ensaios de difração de raios X (DRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG).

No ensaio de análise térmica, foram comparadas as perdas de massa, por reações de desidratação, desidroxilação, decarbonatação, decomposição, transição de fase ou fusão, de forma proporcional as curvas de cada mistura na mesma faixa

de temperatura, levando-se em consideração também os resultados de caracterização dos materiais.

Na análise da difração de raios X (DRX), foram comparados os picos formados, entre as diferentes misturas, a fim de verificar a possível formação de uma nova fase, ou o aumento de uma fase já existente, dada a hidratação e a reação do aditivo autocicatrizante de nucleação e precipitação.

#### 4.2.4 Ensaios de desempenho das pastas fissuradas e ativadas: Etapa 4

Para avaliação do desempenho do aditivo quanto a autocicatrização e redução da permeabilidade, nas diferentes misturas cimentícias, foram moldadas pastas de cimento, em moldes metálicos, com amostras de 5 x 4 x 3 cm (largura x profundidade x altura) (Figura 11).

Figura 11 – Moldagem dos corpos de prova para ensaios de desempenho das misturas cimentícias.



Fonte: Autor (2024).

Os corpos de provas foram fissurados monitorados quanto ao fechamento da fissura antes e depois da ativação do aditivo por água. Para esta avaliação foi realizada análise visual por microscopia ótica do preenchimento físico da fissura, com microscópio OI-1004 (OI VIDA, Brasil) e controle de fluxo passante em permeâmetro de baixa pressão (tubete graduado) fixado na área fissurada da amostra.

O processo de dosagem, moldagem e cura foi o mesmo descrito em 4.2.2 e 4.2.3, com exceção do processo de mistura das pastas, onde aqui houve o uso de misturador mecânico, dada a maior quantidade de material a ser homogeneizado pois as amostras tem maior tamanho e mais quantidade (realização dos ensaios em duplicata).

Para definição do tamanho mínimo de amostra a ser utilizada, foram realizados pré testes de fissuração, que apontaram a dificuldade de geração de fissuras com abertura de 0,4 a 0,5 mm em amostras pequenas, pois o corpo de prova era facilmente rompido quando submetido à carga. Sendo assim, foi adotada metodologia alternativa, que será explicada a seguir, possibilitando o uso de pequenas amostras com tamanho de 5 x 4 x 3 cm.

As pastas foram retiradas dos moldes com 3 dias de idade, quando se apresentaram firmes para desmolde, e imediatamente foram submetidas ao processo de fissuração, simulando a abertura de fissura por retração do concreto nas idades iniciais, sendo esta uma causa comum de fissuração.

Dada a dificuldade de controle de aberturas de fissuras com mesma abertura em todas as amostras e a grande perda de amostras no processo de fissuração com grande abertura (0,4 a 0,5 mm), pois ocorre a ruptura dada a rigidez dos materiais cimentícios após seu endurecimento, foi adotado um procedimento experimental alternativo.

Usualmente a indução da fissura é realizada em prensa manual, com uma ou duas barras metálicas, de tamanho igual ou aproximado ao da fissura desejada, fixadas em uma ou em ambas as faces de apoio da amostra. O objetivo é induzir a abertura da fissura neste ponto, que recebe a carga por compressão axial de forma lenta, para evitar ruptura brusca, por meio do monitoramento visual do carregamento até a abertura da fissura.

Neste estudo, a metodologia aplicada seguiu a carga na prensa, porém até sua ruptura completa, direcionada no local de fixação da barra metálica (Figura 12), para posterior controle da abertura da fissura desejada.

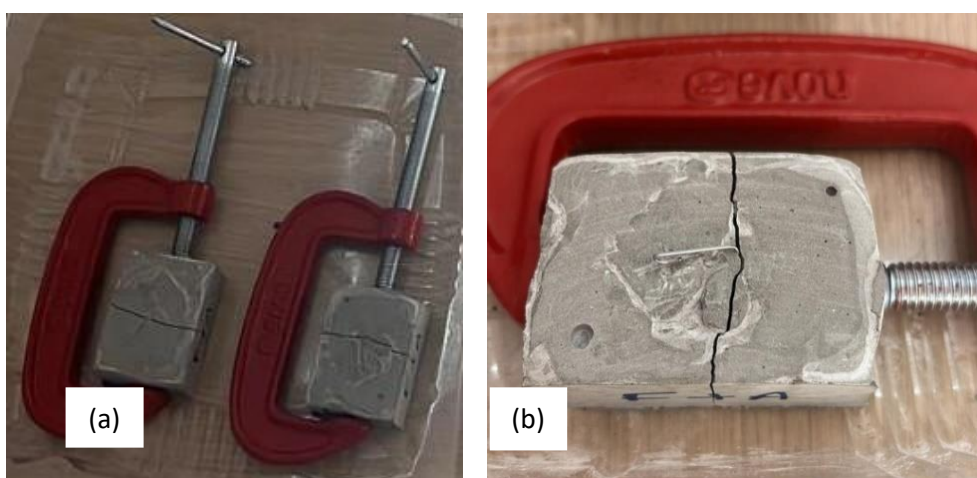
Figura 12 – Fissuração da amostra em máquina de ensaio universal, com célula de carga de 10 ton e fixação de haste metálica na face inferior da amostra.



Fonte: Autor (2024).

Para controle e padronização da abertura da fissura, cada amostra recebeu fixação das suas duas metades com uma presilha metálica modelo “C”, objetivando a união de seus dois pedaços, de modo a não haver movimentação da fissura durante o ensaio (Figura 13).

Figura 13 – Imagens fotográficas com detalhes da: amostras fixadas com presilha (a) e haste para delimitação da abertura da fissura (b).



Fonte: Autor (2024).

Para delimitar a abertura da fissura em 0,4 mm, sendo esta uma abertura de possível selamento pelo aditivo segundo o fabricante, foi fixada uma mini haste metálica de 0,4 mm de espessura, entre os dois pedaços de cada amostra, antes do travamento da presilha.

Imediatamente foi verificada a abertura da fissura com uso de fissurômetro (Figura 14) e imagem de microscopia, na área próximo à fixação da haste, onde apresenta-se a maior abertura da fissura, para possibilitar sua posterior comparação por meio da visualização do preenchimento físico do vazio da fissura.

Figura 14 – Medição da abertura de fissura com fissurômetro



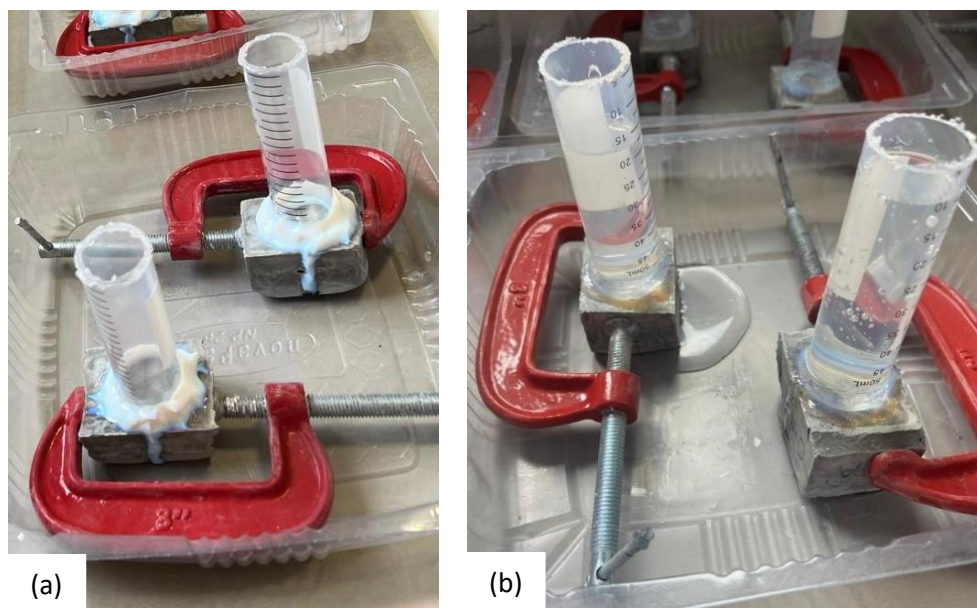
Fonte: Autor (2024).

Posteriormente, foi iniciado o processo de ativação com água conforme Figura 10 (página 54), por 56 dias. Após a conclusão da ativação, as amostras ficaram 24 h em ambiente natural para sua secagem e então foram submetidas a novas imagens de microscópio, para comparar visualmente o selamento da fissura.

A determinação complementar da autocicatrização das fissuras foi realizada por meio de permeabilidade a baixa pressão, nas mesmas amostras utilizadas no ensaio de microscopia, de forma qualitativa. Para isso foram fixados com selante, sobre uma das faces fissuradas, tubetes com 10 centímetros de altura e 2,5 centímetros de diâmetro. Em complemento, as laterais fissuradas também receberam selante, para que não houvesse perda de água descontrolada, sendo que a água deve permear de uma face a outra, garantindo maior gradiente hidráulico (altura de água/altura da amostra).

Após a secagem do selante (24 h), os tubetes foram preenchidos com água constante por 24 h. O monitoramento se deu pelo controle da altura da água nos tubetes, bem como pelo acúmulo de água no recipiente de contenção das amostras. Também foi avaliada a umidade nas faces do concreto (Figura 15).

Figura 15 – Imagens da fixação do tubete em uma face da fissura e selamento das fissuras nas faces laterais (a) e preenchimento do tubete com água (b).



Fonte: Autor (2025).

Como as amostras já haviam sido ativadas, este ensaio ilustra o resultado de forma imediata, com o controle após 24 h de carga, objetivando verificar quais amostras haviam preenchido e selado as fissuras, de forma a suportar a baixa pressão de água atuante.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios realizados e sua discussão estão apresentados e divididos neste item em análises da caracterização dos materiais, seguido pela formulação das pastas cimentícias, caracterização das pastas ativadas e por fim, os resultados de desempenho das pastas fissuradas e ativadas.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa são apresentados os resultados da caracterização química, mineralógica e térmica de cada material anidro.

#### 5.1.1 Caracterização química

O resultado da composição química dos materiais utilizados neste estudo, de acordo com o ensaio de fluorescência de raios X (FRX), expresso em base de óxidos, é apresentado na Tabela 10.

O CP I atende as premissas da NBR 16697 (2018) referente a perda ao fogo, que deve ser inferior a 4,5 % e ao teor de MgO que deve ser  $\leq 6,5$ , porém, não atendeu o teor de SO<sub>3</sub>, que deve ser  $\leq 4,5$ . O SO<sub>3</sub> está presente no gesso, que é utilizado para controlar o tempo de endurecimento do cimento durante sua hidratação (Silva; Borges; Barañano, 2021).

Nobre *et al.* (2022) apontam que se deve haver de 2 a 5 % de Fe na composição dos cimentos Portland, neste caso, o CP I utilizado nesta pesquisa atende esta premissa.

O teor de 2,41 % de perda ao fogo é justificado pela volatilização da água das adições minerais contidas no CP I (Tabela 1, p. 26), pois o clínquer apresenta baixa perda ao fogo, dada a decomposição do calcário durante seu processamento (Silva; Borges; Barañano, 2021). Esse resultado é apoiado pela análise térmica (Figura 21). Nobre *et al.* (2022) utilizaram CP V em sua pesquisa, e encontraram 3,77 % de PF, comprovando maior quantidade de SMCs (*filler* e pozolana) em relação ao CP I.

A composição química anidra do aditivo Penetron Admix P, apresentou óxidos semelhantes ao cimento, conforme também informado por Takagi, Lima e Cofre (2020). O teor de perda ao fogo presente no aditivo, ou seja, de material orgânico, é

considerado não eficiente no desempenho da autocicatrização, sendo que, é o material que irá se decompor ao longo do tempo. O segredo composicional industrial do aditivo, dificulta a identificação da matéria orgânica presente em sua composição

A presença majoritária dos elementos Ca (55,95 %) e Si (11,42 %) no aditivo, estimulam as reações de hidratação por contribuírem para o aumento da nucleação e crescimento dos produtos de hidratação. Há um aumento da floculação e aumento da taxa de precipitação de cristais de hidróxido de cálcio (CH), gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases etringita (AFt) e monossulfoaluminato (AFm), responsáveis pelo preenchimento dos poros e capilares. Tem-se também, para potencializar este crescimento dos cristais, os elementos Fe e K que também são os responsáveis pelo aumento dos cristais. Estes elementos tem potencial para dissolução e recristalização dos subprodutos da hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais não solúveis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita ( $C_6ASH_{32}$ ) e carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). Também se tem a presença de Al, componente presente em agentes químicos expansores a base de sulfoaluminato de cálcio (CSA). Porém, a presença de S (enxofre), não foi detectada no ensaio de FRX realizado (Takagi *et al.*, 2020).

Na análise da escória e da pozolana em relação ao atendimento da NBR 12653 (2015) é verificado que somente a pozolana atende  $Si + Al + F \geq 70$ , ambas atendem  $S < 4$  e  $PF < 10$ .

O  $Al_2O_3$  encontrado majoritariamente na pozolana e em menor quantidade na escória, segundo Pereira, Martins e Bezerra (2024), pode contribuir para a formação de compostos de alumínio que melhoram e aumentam a hidratação.

Na comparação entre os SCMs, é possível verificar a maior concentração de cálcio e sílica na pozolana (1,63 e 59,43 %, respectivamente) e escória de alto forno (45,66 e 35,12 %, respectivamente), tendo, portanto, maior potencial reativo (Hoppe *et al.* 2017). No *filler* tem-se 49,57 e 4,88 %, respectivamente.

Nota-se que a pozolana e o CP I apresentaram teores baixos de perda ao fogo (2,17 e 2,41 %), devido a sua característica processual. O *filler* calcário apresentou o maior teor (37,64 %), o que já era esperado devido a presença de material carbonático.

Entendendo que os SCMs estudados apresentam benefícios na hidratação do cimento, segundo Takagi, Lima e Cofre (2020), ocorrerá reação com o aditivo

autocicatrizante, o qual utiliza os produtos de hidratação gerados para potencializar o preenchimento de poros, capilares e fissuras.

Tabela 10 - Composição química (FRX) do aditivo, cimento e SCMs utilizados neste trabalho.

ÓXIDO	PENETRON ADMIX P (%)	CP I (%)	FILLER CALCÁRIO (%)	ESCÓRIA DE ALTO FORNO (%)	POZOLANA (%)
CaO	55,95	67,31	49,57	45,66	1,63
SiO <sub>2</sub>	11,42	16,57	4,88	35,12	59,43
MgO	9,13	1,16	2,86	4,56	0,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,20	2,76	0,73	10,70	25,88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87	3,43	0,93	0,46	4,83
SO <sub>3</sub>	-	5,63	2,83	1,43	0,46
K <sub>2</sub> O	0,41	0,23	0,27	0,55	3,39
TiO <sub>2</sub>	0,19	0,27	0,12	0,85	1,29
SrO	0,28	0,23	0,16	0,16	0,02
MnO	0,10	-	-	0,46	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	-	-	-	0,02
ZnO	-	-	-	-	0,04
Zr <sub>2</sub> O	-	-	-	0,04	0,08
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	0,07
Rb <sub>2</sub> O	-	-	-	-	0,02
P.F.	18,43	2,41	37,64	0,00	2,17

Fonte: Autor (2023).

### 5.1.2 Caracterização mineralógica

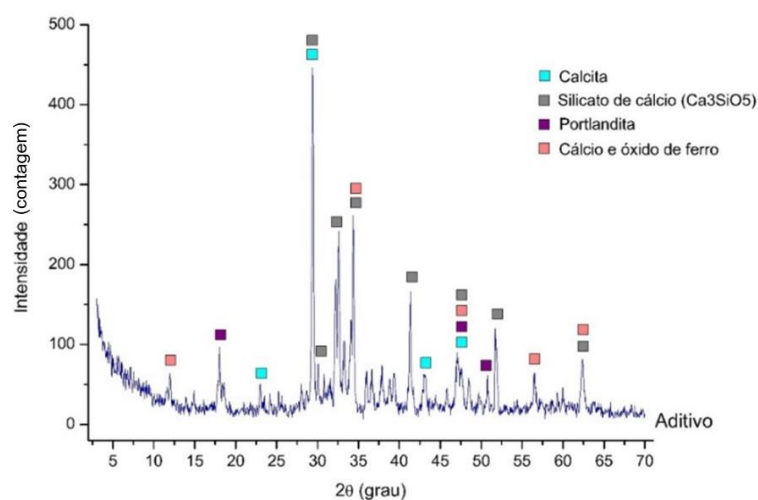
A combinação da composição química de cada material, apresenta estruturas distintas que são apresentadas por meio da análise de difração de raios X (DRX). Foram identificados os principais picos das fases cristalinas de cada material anidro separadamente, conforme abaixo (Figuras 16, 17, 18, 19 e 20).

Em todas as amostras há presença de pequenos halos amorfos, indicando-os como materiais reativos segundo Hoppe *et al.* (2017).

Na Figura 16, onde é apresentado o difratograma do aditivo autocicatrizante, é observado a presença de fases comuns ao cimento, sendo todas elas com a presença de cálcio. A presença de carbonato de cálcio, identificado no difratograma como calcita, está vinculada à presença de material carbonático, como SCMs, também encontrado por Oliveira (2019) e de hidróxido de cálcio é característica de uma pequena hidratação presente (Nobre *et al.*, 2022).

Ferrara, Krelani e Moretti (2016) discutem sobre a vasta presença de diferentes materiais, ilustrando a complexa formulação do material.

Figura 16 - Difratograma de raios X do aditivo autocicatrizante.

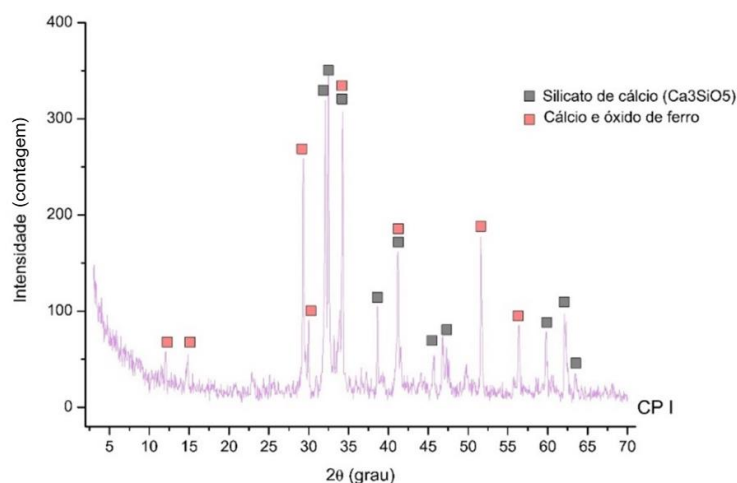


Fonte: Autor (2024).

No difratograma do CP I (Figura 17), as principais fases encontradas foram silicato de cálcio, cálcio e óxido de ferro. Os maiores picos estão entre 30 e 35 °, por tratar-se de um cimento mais puro e, portanto, possuir mais clínquer (CAPELESSO, 2018).

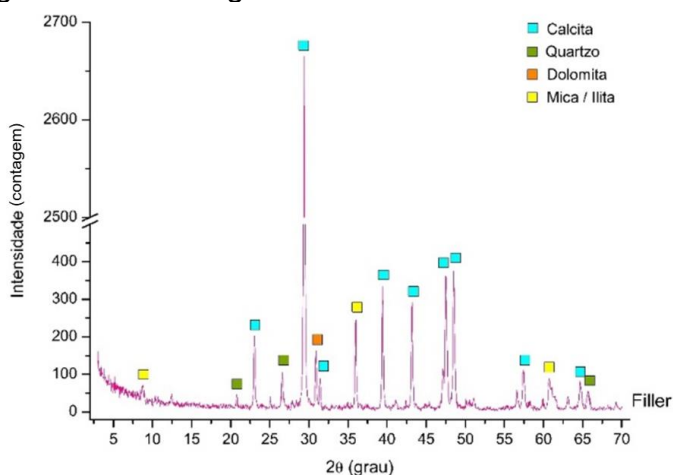
Em comparação com o difratograma do aditivo, é observado menos compostos cristalinos, ilustrando a pureza do CP I.

Figura 17 - Difratoograma de raios X do cimento CP I.



Fonte: Autor (2024).

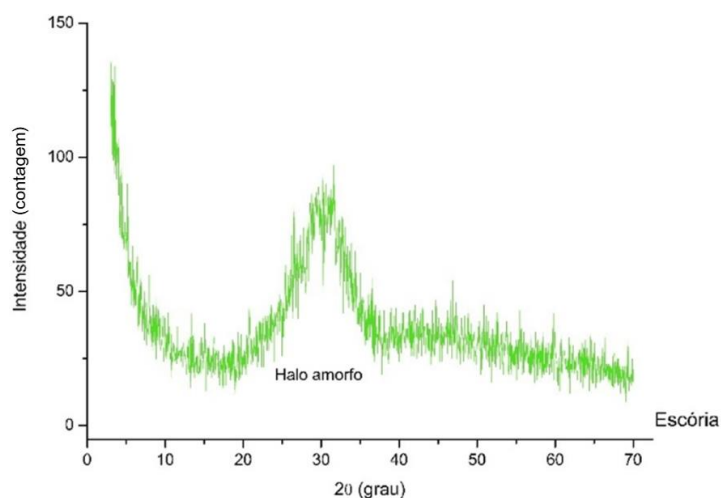
Na Figura 18 são observados picos acentuados das fases de  $\text{CaCO}_3$  ilustrando sua cristalinidade e também quartzo e dolomita. Além disso, não possui halo amorfo, sendo assim, não são passíveis de interação com hidróxido de cálcio, conforme discutido no item 3.2.1 (página 19), conforme os autores Hoppe *et al.* (2017), que também encontraram um espectro similar.

Figura 18 - Difratoograma de raios X do *filler* calcário.

Fonte: Autor (2024).

No difratograma da escória (Figura 19) nota-se que o material é amorfo, devido ao seu resfriamento brusco, com picos entre 25 e 35 °, característico do material, conforme encontrado nos estudos de Palacios *et al.* (2012). Sua estrutura e alta energia interna, facilita a participação em reações químicas.

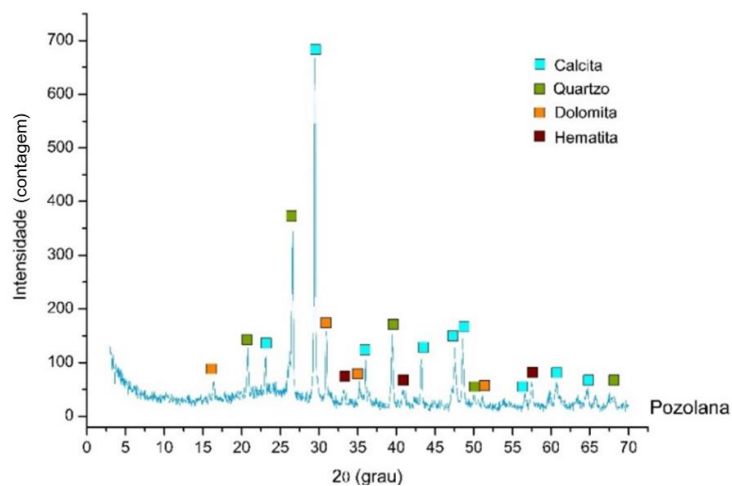
Figura 19 - Difratograma de raios X da escória de alto forno.



Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 20, observa-se o principal pico entre 25 e 30 °, sobre um pequeno halo amorfo, característico da pozolana, segundo Capelesso (2018) e Gobbo (2009).

Figura 20 - Difratograma de raios X da pozolana.



Fonte: Autor, 2024.

Apesar da escória e da pozolana apresentarem alta reatividade, conforme discutido em 3.2, é observada sua diferença nos difratogramas, isso porque elas têm mecanismo de reação diferente. Em ambas, sua parte amorfa reage e consome o hidróxido de cálcio, formando os silicatos de cálcio hidratados, porém na pozolana tem-se ainda o efeito *filler*, pelo efeito de empacotamento pelos finos inertes, ilustrando sua parcial similaridade com o difratograma deste (Hoppe *et al.*, 2017).

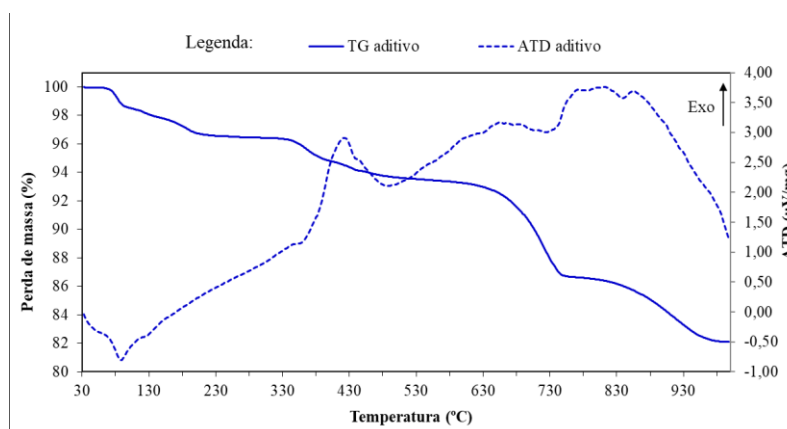
### 5.1.3 Análises térmicas

A análise do comportamento térmico dos materiais anidros foi realizada por meio da termogravimetria (TG) e da análise térmica diferencial (ATD), ambas apresentadas nas Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 abaixo.

Conforme Figura 21, o aditivo apresentou uma perda de massa inferior a 2 % próximo aos 100 °C, possivelmente vinculada à água da mistura, com comportamento endotérmico, e a partir de 600 °C as perdas de massa tem comportamento exotérmico, ou seja, liberam calor/energia. É observado um evento térmico significativo próximo a 730 °C, também encontrada por Oliveira (2019), com uma perda de massa de aproximadamente 9 %, que pode ser justificada pela descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ , identificada na análise mineralógica do aditivo.

A PF identificada no FRX (18,43 %), pode ser comparada a perda total de massa de 17,6 % encontrada na curva de termogravimetria, considerando a realização do ensaio de PF com 950 °C.

Figura 21 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do aditivo.



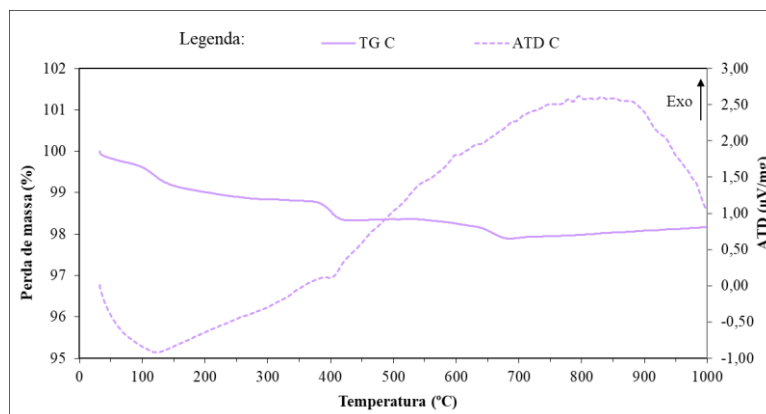
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 22 são mostradas as curvas da ATD/TG do CP I utilizado.

É observado um pico em aproximadamente 100 °C, que segundo Oliveira (2019) indica a evaporação da água combinada, associada a um evento endotérmico. Já próximo aos 400 °C ocorre a desidroxilação de CH correspondente a menos de 1 % da perda de massa total, e a partir de 600 °C ocorre a descarbonatação de  $\text{CaCO}_3$ . Ambos associados a um comportamento exotérmico.

Há uma perda total de massa de aproximadamente 2 %, referente a presença de material pozolânico ou carbonático, estando de acordo com o resultado encontrado na perda ao fogo, de 2,41 % e atendendo o limite de 5 % da NBR 16697 (2018).

Figura 22 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do CP I.



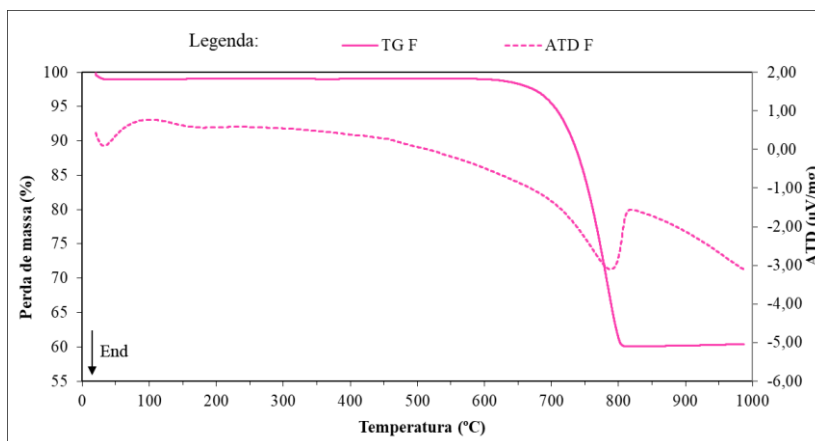
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 23 é possível verificar uma perda de massa significativa entre 600 e 850 °C, indicando a presença de  $\text{CaCO}_3$ , associada a um evento endotérmico, também encontrado nos estudos de Cândido *et al.* (2021) e Zanchetta (2021).

O carbonato de cálcio provavelmente foi a responsável pela perda ao fogo, pois esta se decompõe a partir de 700 °C.

É confirmado o resultado de PF encontrado (37,6 %) na amostra de *filler* com a perda de massa total da Figura 23, de aproximadamente 40 %.

Figura 23 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) do *filler* calcário.



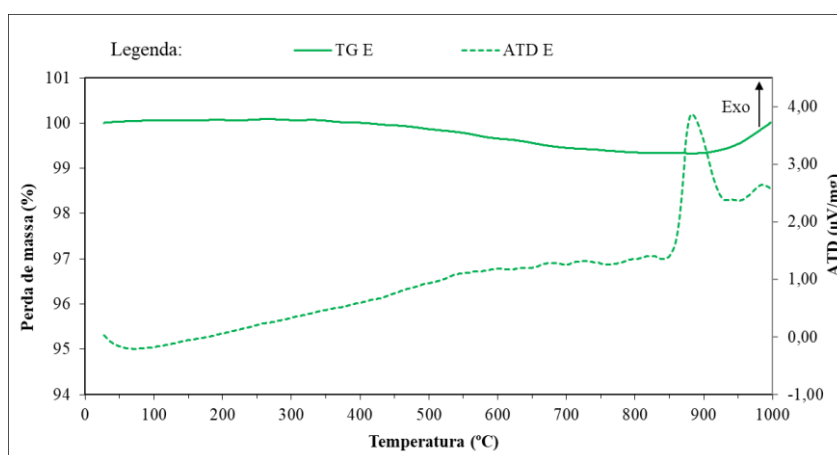
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 24 é verificado um pico exotérmico em aproximadamente 900 °C, indicando alguma cristalização, com perda de massa de aproximadamente 1,5 %, referente a fusão de algumas fases de cristalização.

Também é verificado um comportamento atípico encontrado a partir de 900 °C, com um pequeno ganho de massa, que, dada a alta temperatura, o material pode ter fundido (Soares, 2020).

Verificando-o com o ensaio de PF no FRX, é corroborada a perda de massa de 0,5 % aos 950 °C (temperatura do ensaio de PF).

Figura 24 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) da escória de alto forno.

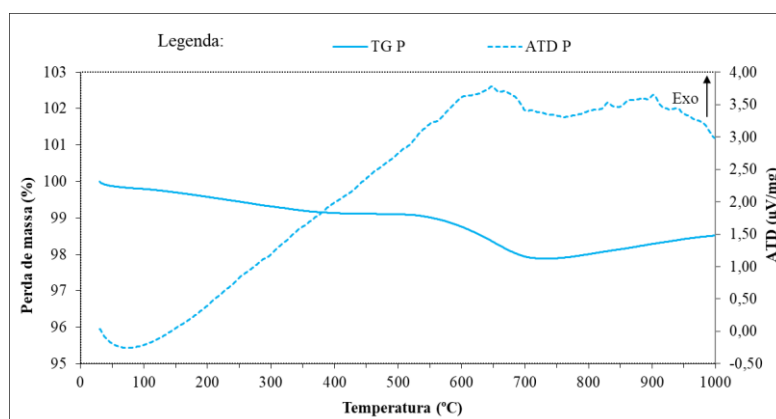


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 25, observa-se um evento endotérmico contínuo entre 100 e 400 °C, com perda de massa de aproximadamente 1 %, associada a perda de água, a decomposição de produtos voláteis e a matéria orgânica residual do carvão.

Entre 580 e 750 °C, ocorre outro evento térmico, exotérmico, com perda de massa de 1,5 %, decorrente da decomposição do carbonato de cálcio e da volatilização do dióxido de carbono, conforme também verificado por Cirino *et al.* (2021).

Figura 25 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) da pozolana.



Fonte: Autor (2023).

## 5.2 FORMULAÇÃO DAS PASTAS

O teor de substituição do cimento por SCMs nas pastas cimentícias, foi definido por meio do ensaio de área de superfície específica pelo método BET, realizado nas amostras anidras, separadamente, para verificar a equivalência entre elas. Em complemento, foram realizados ensaios de massa específica por picnometria e granulometria a laser. Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados de propriedades físicas dos materiais anidros usados nas misturas cimentícias.

Material	Área de superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Tamanho médio de partícula (μm)
Filler calcário	1,70	2,78	2,26	13,18	44,51	19,56
Escória de alto forno	0,75	2,95	1,19	4,27	17,22	7,24
Pozolana	0,93	2,14	4,49	33,88	138,74	57,51
CP I	1,43	3,16	1,92	10,76	27,41	13,45

Fonte: Autor (2023).

Os dados obtidos para o cimento Portland CP I usados nesta pesquisa são similares ao CP V ARI obtido por Nobre *et al.* (2020), sendo 1,53 m<sup>2</sup>/g de área de superfície específica, 3,06 g/cm<sup>3</sup> de massa específica, 1,87 μm em D10, 14 μm em

D50 e 40,45  $\mu\text{m}$  em D90. A similaridade reforça a coerência entre as técnicas aplicadas no preparo das amostras e durante o ensaio.

Os ensaios físicos ajudam no entendimento da natureza do material, por exemplo: a pozolana possui maior área de superfície específica que a escória, apesar de um tamanho médio de partícula maior. Isso deve-se ao fato da natureza da partícula, composta de poros abertos.

Apesar da escória e da pozolana apresentarem grandes proporções de sílica e alumina em suas composições (45,82 e 85,31 %, escória e pozolana respectivamente), ambas apresentaram massas específicas diferentes. Aqui, mais uma vez, a superfície da partícula demonstra a necessidade de análise, visto que a reatividade se dá na superfície.

Com base nos dados de área de superfície específica (BET), foram realizados os cálculos de equivalência considerando-se uma amostra total de 30 g, descritos no item 4.2.2 e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Cálculo da área de superfície específica equivalente de cada substituição mineral com base no ensaio de BET.

Tipo de pasta	Material	Características físicas		
		Área de superfície específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Massa do material (g)	Área total de superfície específica ( $\text{m}^2$ )
Pasta padrão	CPI	1,43	30,00	42,90
	Pasta		30,00	42,90
Pasta com <i>filler</i>	<i>Filler</i> calcário	1,70	3,79	6,44
	CPI	1,43	25,50	36,46
	Pasta		29,29	42,90
Pasta com escória	Escória de alto forno	0,75	8,59	6,44
	CPI	1,43	25,50	36,46
	Pasta		34,09	42,90
Pasta com pozolana	Pozolana	0,93	6,92	6,44
	CPI	1,43	25,50	36,46
	Pasta		32,42	43,02

Fonte: Autor (2023).

Nesta tabela tem-se a quantidade de cada material usado na mistura, com base em sua área de superfície específica equivalente (massa do material em gramas) e a verificação de que todas as misturas apresentam a mesma área total de superfície específica de 42,90  $\text{m}^2$ .

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS ATIVADAS

Os aditivos promovem interações físicas e químicas no sistema cimento-aditivo-água, provocando alterações no curso das reações de hidratação do cimento, na cinética de nucleação e no crescimento dos hidratos, assim como na morfologia dos produtos de hidratação. Sendo assim, para encontrar as alterações entre as diferentes misturas após passarem por um período de hidratação/ativação com água por 56 dias, foram analisados os resultados de caracterização das pastas.

#### 5.3.1 Caracterização mineralógica

Por meio da análise de difração de raios X (DRX), foram identificados os principais picos das fases cristalinas e a presença ou não de halo amorfo de cada pasta hidratada separadamente, e analisadas as variáveis com e sem o aditivo autocicatrizante, conforme abaixo (Figuras 26, 27, 28 e 29).

De forma geral, são observados os mesmos compostos principais em todas as pastas cimentícias, ilustrando o processo de hidratação dos materiais cimentícios previsto, com formações a base de cálcio e sílica, conforme apresentado na Tabela 6. A presença do hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), como produtos da reação de hidratação de silicatos de cálcio e, dada a carbonatação de CH, gera-se também formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

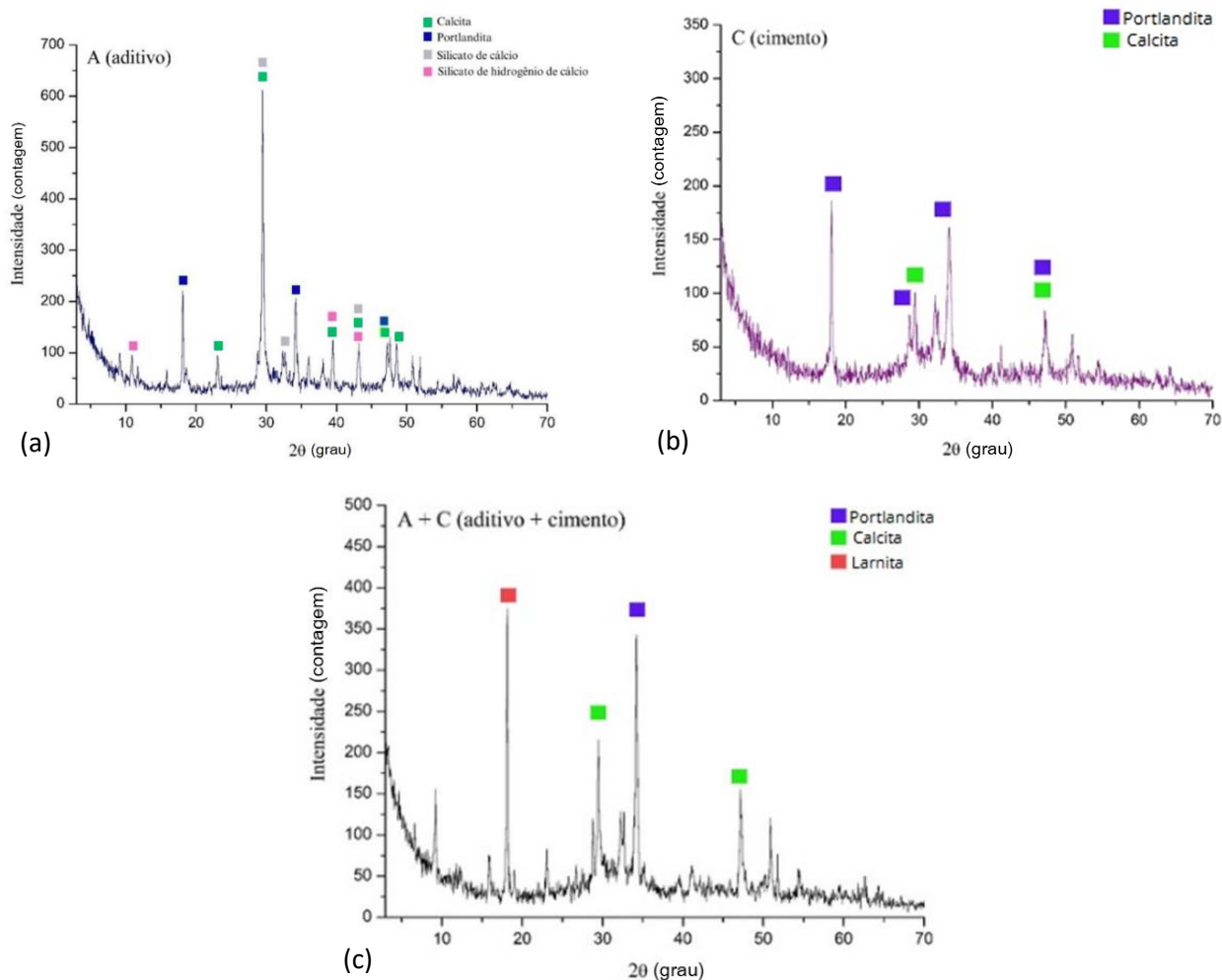
Também é importante pontuar que nas análises entre cada variável com e sem o aditivo, a posição dos picos se manteve a mesma, alterando-se somente a intensidade do pico. Foi observada maior intensidade dos picos nas amostras com uso do aditivo, confirmando o aumento da cristalinidade proporcionado pelo material.

O C-S-H apresenta baixa cristalinidade, portanto sua identificação no difratograma é feita através do teor de estruturas semi-cristalinas e amorfas (picos sequenciais de menor intensidade) (Nobre *et al.*, 2022). Pode ser observado essa característica na amostra de C, em relação à mistura de CA e A, confirmando o C-S-H de estequiometria variável como principal produto de hidratação do cimento

Avaliando-se o difratograma de A (Figura 26-a), é possível observar maior quantidade de fases, ou seja, uma quantidade maior de estruturas cristalinas.

A presença de Larnita na amostra CA é comum na hidratação de cimentos. Nobre *et al.* (2022) também verificaram sua presença e ainda pontuam que esta fase continua a se hidratar por idades mais longas, auxiliando no processo de hidratação tardia do selamento das fissuras.

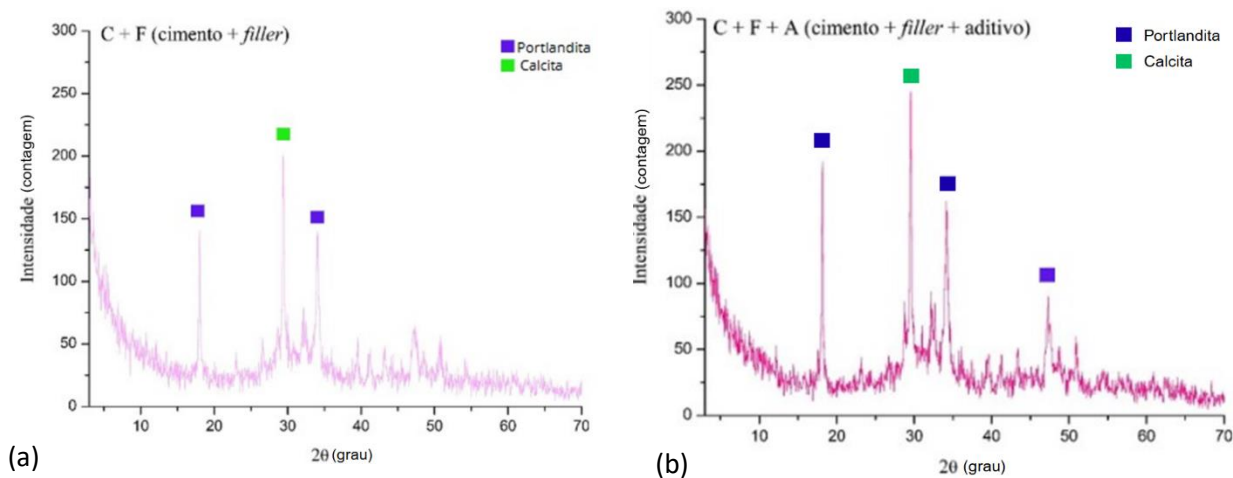
Figura 26 - Difratomogramas de raios X das pastas A (a), C (b) e CA (c).



Fonte: Autor (2024).

Em seu estudo, Oliveira (2019) apresenta difratogramas muito similares aos encontrados na Figura 27, com principais compostos o hidróxido de cálcio (portlandita) e o carbonato de cálcio (calcita) e aumento da intensidade dos picos nas amostras com o aditivo.

Figura 27 - Difratoograma de raios X das pastas hidratadas de CF (a) e de CAF (b).

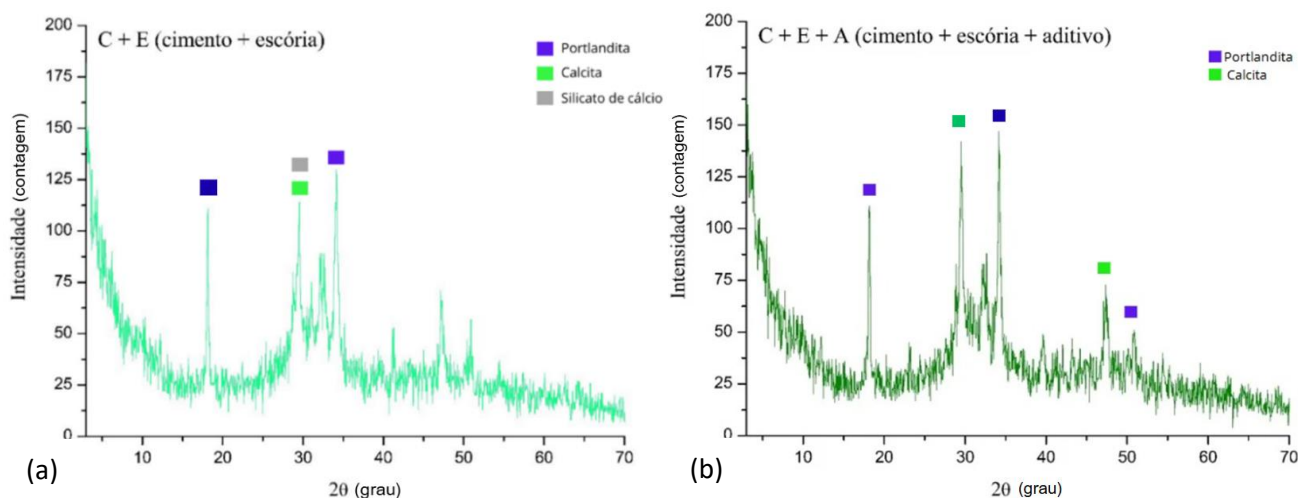


Fonte: Autor (2024).

Na Figura 28 é verificado em ambos difratogramas a presença de fases cristalinas de CH (Portlandita), corroborado por Huang, Ye e Damidot (2014) que em seu estudo encontraram a presença majoritária de CH em amostras de cimento com escória.

Como já discutido anteriormente, dada a estrutura amorfa da escória, nota-se que mesmo com a presença do aditivo, a intensidade dos picos é menor que aquela apresentada nas misturas com *filler* ou pozolana.

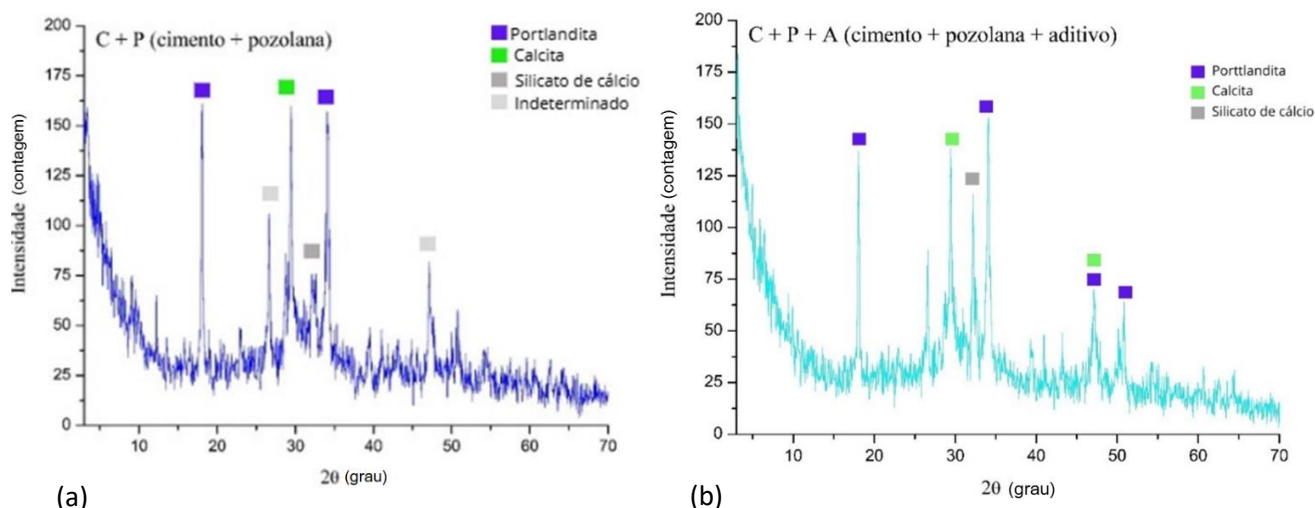
Figura 28 - Difratoograma de raios X das pastas hidratadas de CE (a) e de CAE (b).



Fonte: Autor (2024).

Como esperado, nas amostras de CP e CAP (Figura 29) é verificada a presença de C-S-H, CH e  $\text{CaCO}_3$ , ilustrando os produtos de hidratação gerados. A presença de sílica é referência em amostras hidratadas com pozolana (Pacheco, 2020) porém, neste caso, dado o baixo teor de pozolana na mistura, a presença da sílica é ilustrada somente na fase de silicato de cálcio.

Figura 29 - Difratoograma de raios X das pastas hidratadas de CP (a) e de CAP (b).



Fonte: Autor (2024).

Comparando-se os difratogramas, nota-se pequenas diferenças de intensidade nos picos, mas os compostos encontrados foram os mesmos, ou seja, estão apresentados no mesmo ponto em  $2\theta$ . O efeito de potencialização do aditivo sobre os produtos de hidratação é característico (Van Tittelboom; De Belie, 2013). Porém este efeito dificulta a análise isolada do aditivo.

### 5.3.2 Análises térmicas

Com o objetivo de auxiliar na compreensão dos compostos presentes nas pastas cimentícias, foram realizadas análises térmicas diferenciais e termogravimétricas (com os respectivos tratamentos matemáticos da derivada primeira das curvas termogravimétricas) (ATD/TG-DTG), mostradas separadamente com e sem o aditivo autocicatrizante, nas Figuras 30, 31, 32 e 33.

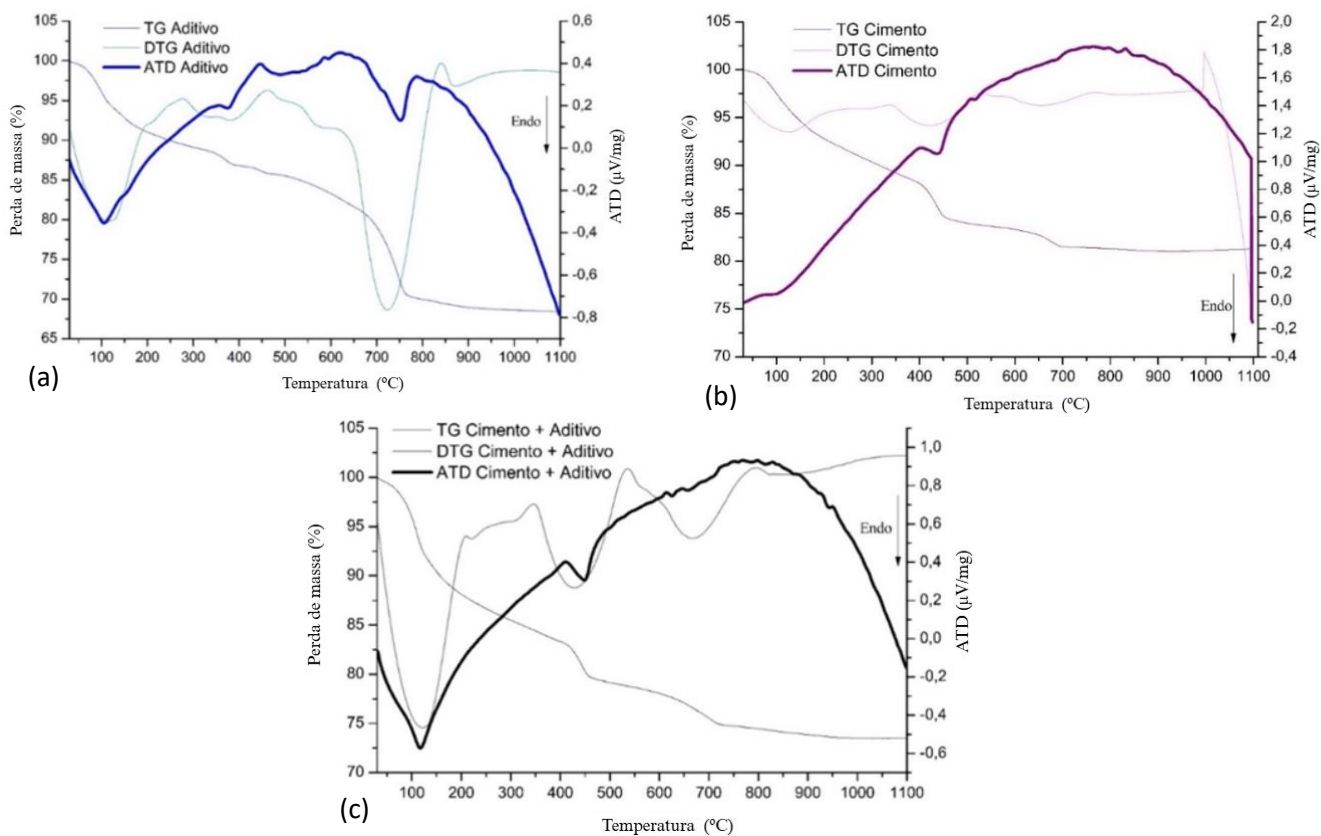
Avaliando-se as curvas da Figura 30, é observado que o teor de água quimicamente combinada relacionada à formação de C-S-H e das fases aluminato

hidratadas é representado pela perda de massa de 11,5 % no CP I e de 16,5 % em CA, ocorrida até 400 °C. Ilustrando o aumento da presença de C-S-H com o uso do aditivo. Deste ponto até 500 °C tem-se a perda da água de composição do hidróxido de cálcio (CH), sendo de 3,5 % em ambas as amostras. Por fim, até 1000 °C ocorre a perda de massa referente ao carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), correspondente ao fenômeno de descarbonatação, onde é observado um teor de 3 % na amostra de C e 6 % na amostra de CA, corroborando o aumento de potencial de formulação de produtos de hidratação pelo aditivo (Hoppe *et al.*, 2017).

Uma diferença pontual é verificada em relação ao cimento e ao aditivo, com um pico endotérmico próximo aos 120 °C nas amostras de A e de CA, com justificativa inconclusiva.

Em uma análise comparativa entre as três amostras, é verificada uma maior perda de massa total em A, próximo a 32 %, seguido da pasta de CA, próximo a 26 % e por fim C, com aproximadamente 18 %, ilustrando a maior presença de material carbonático no aditivo, como confirma o ensaio de PF.

Figura 30 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de A (a), C (b) e CA (c).

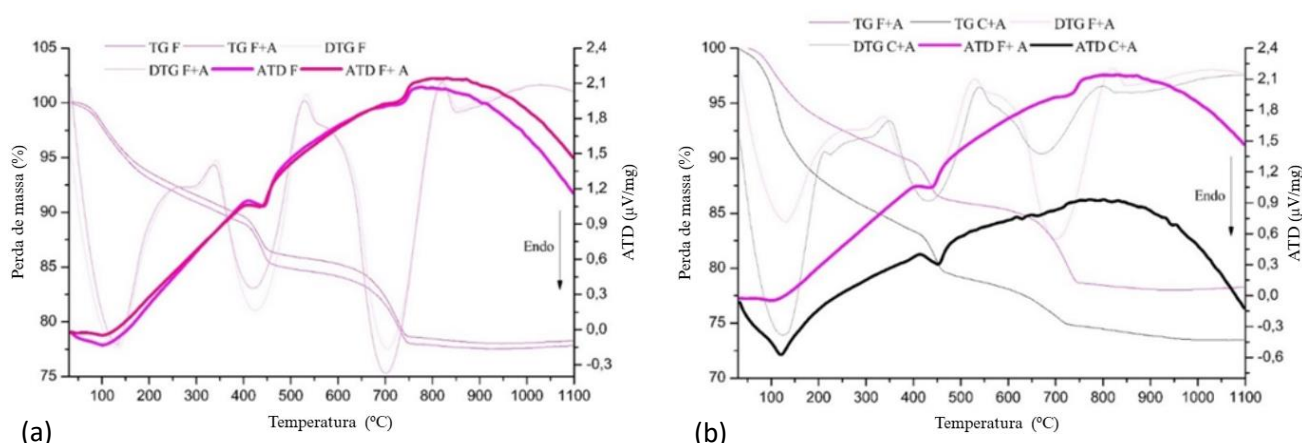


Fonte: Autor (2024).

Em uma análise comparativa da perda de massa entre as pastas cimentícias de CF e CAF (Figura 31-a), é verificada uma diferença inferior a 1 %.

Na análise entre as amostras de CA e CAF (Figura 31-b), pode-se verificar diferenças. Segundo Hoppe *et al.* (2017), as amostras de cimento apresentam maiores teores de água combinada, em relação às amostras com *filler*, como é verificado na perda de massa até 400 °C, onde tem-se 10 % na amostra com CAF e 17 % na amostra de CA. A presença do carbonato de cálcio é característica do *filler* e pode ser confirmada pela perda de massa a partir de 500 até 1.000 °C, onde tem-se 5 % na amostra de CA e 9 % na amostra de CAF, ilustrando sua maior presença na amostra com *filler*. Também como esperado, houve uma maior perda de massa até 430 °C na amostra de CA, ilustrando a maior presença de C-S-H e das fases aluminato hidratadas no CP I.

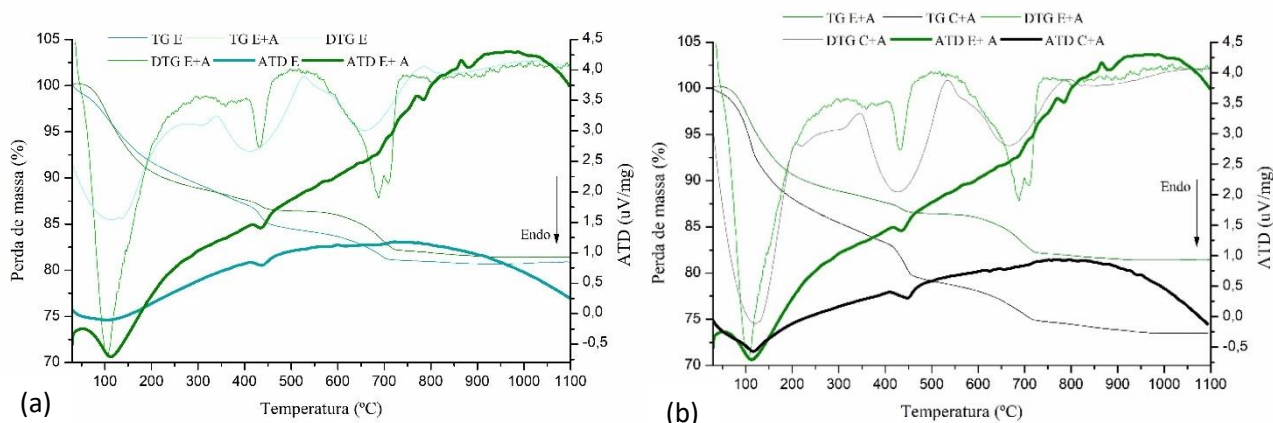
Figura 31 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CF e CAF (a) e CA e CAF (b).



Fonte: Autor (2024).

Na comparação entre as curvas das pastas com CAE e CE (Figura 32) é verificada similaridade, com a formação dos mesmos tipos de hidratos, com pequenas diferenças nas quantidades indicadas nas variações das suas perdas de massa correspondentes a um intervalo de temperatura. Nas curvas são observados: um evento endotérmico até 400 °C, ilustrando a desidratação de fases como C-S-H, encontrada no DRX; outro evento endotérmico próximo a 425 °C, ilustrando a desidroxilação do CH, também encontrado no DRX; por fim, outro evento endotérmico próximo a 700 °C, ilustrando a descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ , também encontrado no DRX (Oliveira, 2019).

Figura 32 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CE e CAE (a) e CA e CAE (b).



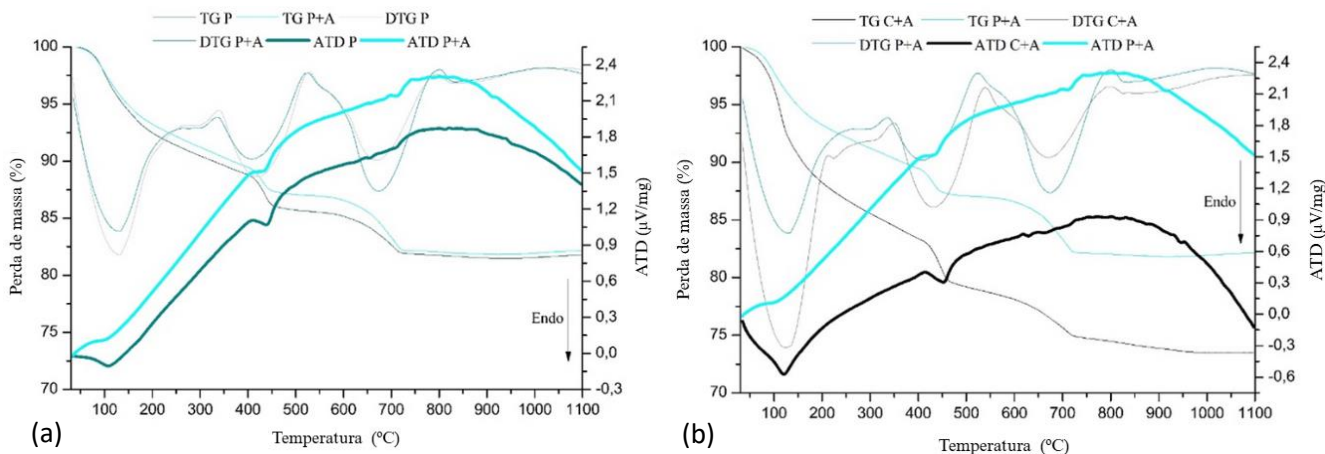
Fonte: Autor (2024).

Analisando-se as curvas de pozolana com e sem aditivo (Figura 33-a), não há diferenças significativas, somente um pico levemente mais acentuado em 700 °C, característico do aditivo, referente ao seu material carbonático.

Já na análise das curvas de CAP e CA (Figura 33-b), são verificadas diferenças somente na intensidade dos picos, apresentado as mesmas reações discutidas nas Figuras 30, 31 e 32, porém ilustrando um menor teor, referente à presença de CH, no pico próximo à 425 °C característico da atividade pozolânica (Hoppe *et al.*, 2017).

Também foi observado um maior pico exotérmico com o uso do aditivo na Figura 33 (b), porém sem alguma justificativa específica.

Figura 33 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG-DTG) das pastas hidratadas de CP e CAP (a) e CA e CAP (b).



Fonte: Autor (2024).

## 5.4 DESEMPENHO DAS PASTAS FISSURADAS E ATIVADAS

Nesta etapa foram avaliados os desempenhos de cada mistura em relação à sua autocicatrização de fissuras com abertura de 0,4 mm, por meio de ensaios de microscopia ótica e de permeabilidade à baixa pressão (0,1 m.c.a.).

### 5.4.1 Autocicatrização: análise por microscopia ótica

O selamento superficial das aberturas das fissuras foi determinado de forma qualitativa, com base em uma análise visual, feita por meio de imagens de microscópio ótico, geradas pelo software HiView.

As imagens foram geradas antes e depois das amostras passarem pelo período de ativação com água, conforme descrito no item 4.2.4.

Como foram executadas em duplicata, as amostras 1 são identificadas como “a” e “c” e “e” e “g” e as amostras 2 como “b” e “d” e “f” e “h”. As imagens identificadas como “a” e “b” e “e” e “f” ilustram a fissura antes da ativação e “c” e “d” e “g” e “h” após a ativação, em ambos os casos referentes às amostras sem e com o aditivo, respectivamente.

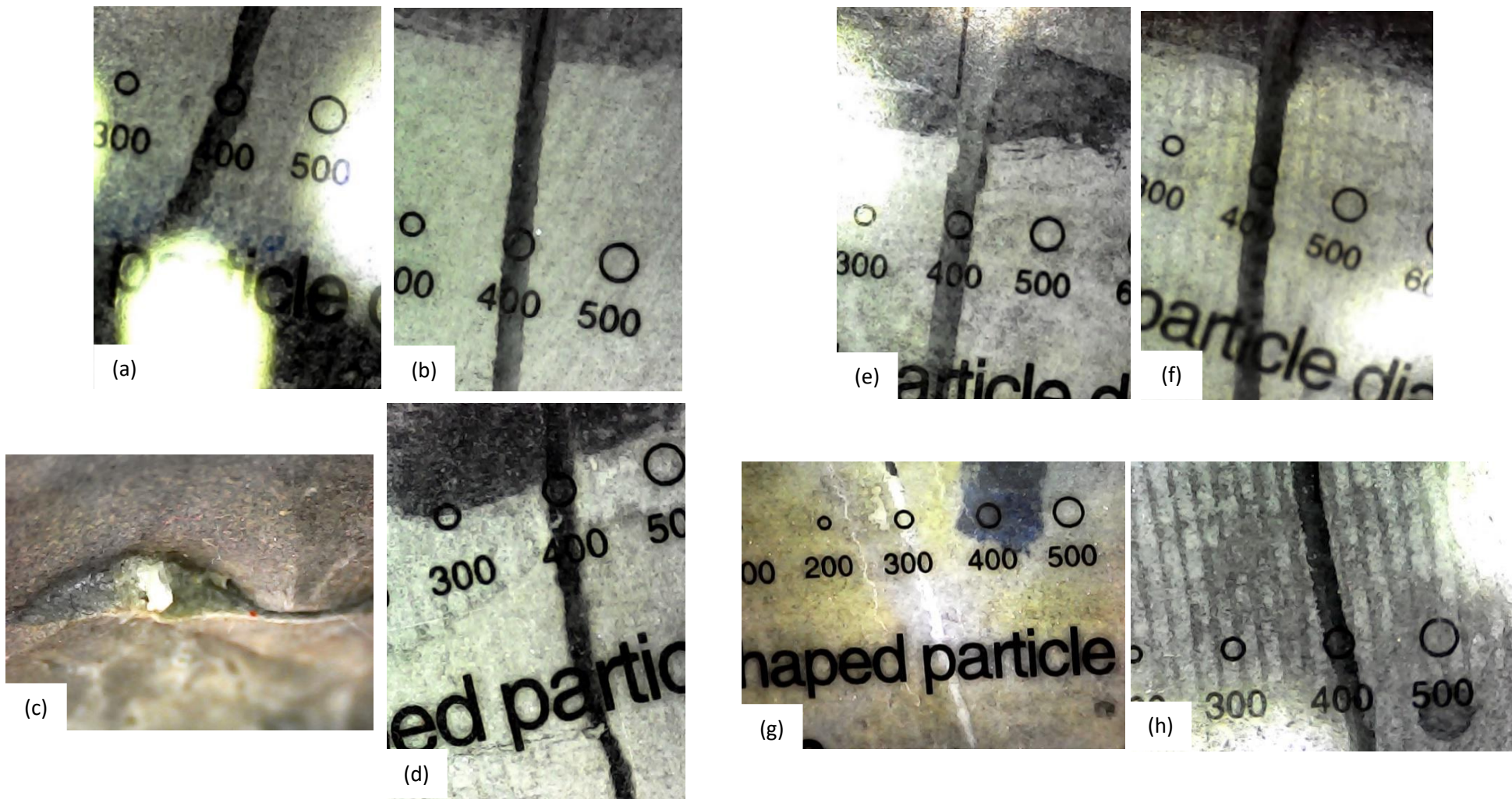
Nesta análise foram mostrados os pontos/faces encontrados com melhor desempenho, ou seja, com maior preenchimento da fissura. Porém nenhuma amostra apresentou completo selamento superficial da fissura.

Na Figura 34, referente as amostras de C (a, b, c, d), quando comparadas as imagens antes e depois da ativação, é observada a presença de alguns pequenos pontos isolados de formação de produtos de hidratação em uma das amostras (a, c), porém na outra não foram encontrados indícios de selamento da fissura (b e d).

A autocicatrização em amostras com cimento com a formação de produtos de hidratação pode ser pontual (Hilloulin *et al.*, 2016). Pacheco (2020) complementa que nos locais do selamento pode haver o predomínio de formação de produtos de hidratação pelo acúmulo de água nestes pontos, favorecendo a hidratação.

Na Figura 34, referente as amostras de CA (e, f, g, h), é possível verificar o selamento completo em determinado trecho de forma contínua com abertura máxima de 0,3 mm em uma das amostras (e, g). Na outra amostra não foram encontrados produtos de hidratação na superfície (f, h).

Figura 34 – Imagens de microscopia ótica: amostras de C (a, b) e CA (e, f) antes da ativação e amostras de C (c, d) e CA (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

Na avaliação da Figura 35 das amostras de CF (a, b, c, d), é verificado o selamento completo em determinado trecho, de forma contínua em uma das amostras. O mesmo não é verificado na sua duplicata, que ilustra somente o selamento parcial da fissura no trecho analisado, com abertura de 0,3 mm.

Na literatura são apresentados potenciais de selamento de até 0,2 mm nas amostras com uso de SCMs sem complemento de aditivo (Van Tittelboom; De Belie, 2013), sendo encontrados resultados superiores neste estudo.

Na Figura 35 das amostras da CAF (e, f, g, h), em comparação às amostras CF, é possível observar um incremento no selamento das fissuras nestas amostras com aditivo, atingindo o selamento em um trecho da fissura com 0,4 mm em ambas as amostras 1 e 2, ilustrando o melhor desempenho da autocicatrização nas amostras de *filler* com aditivo autocicatrizante.

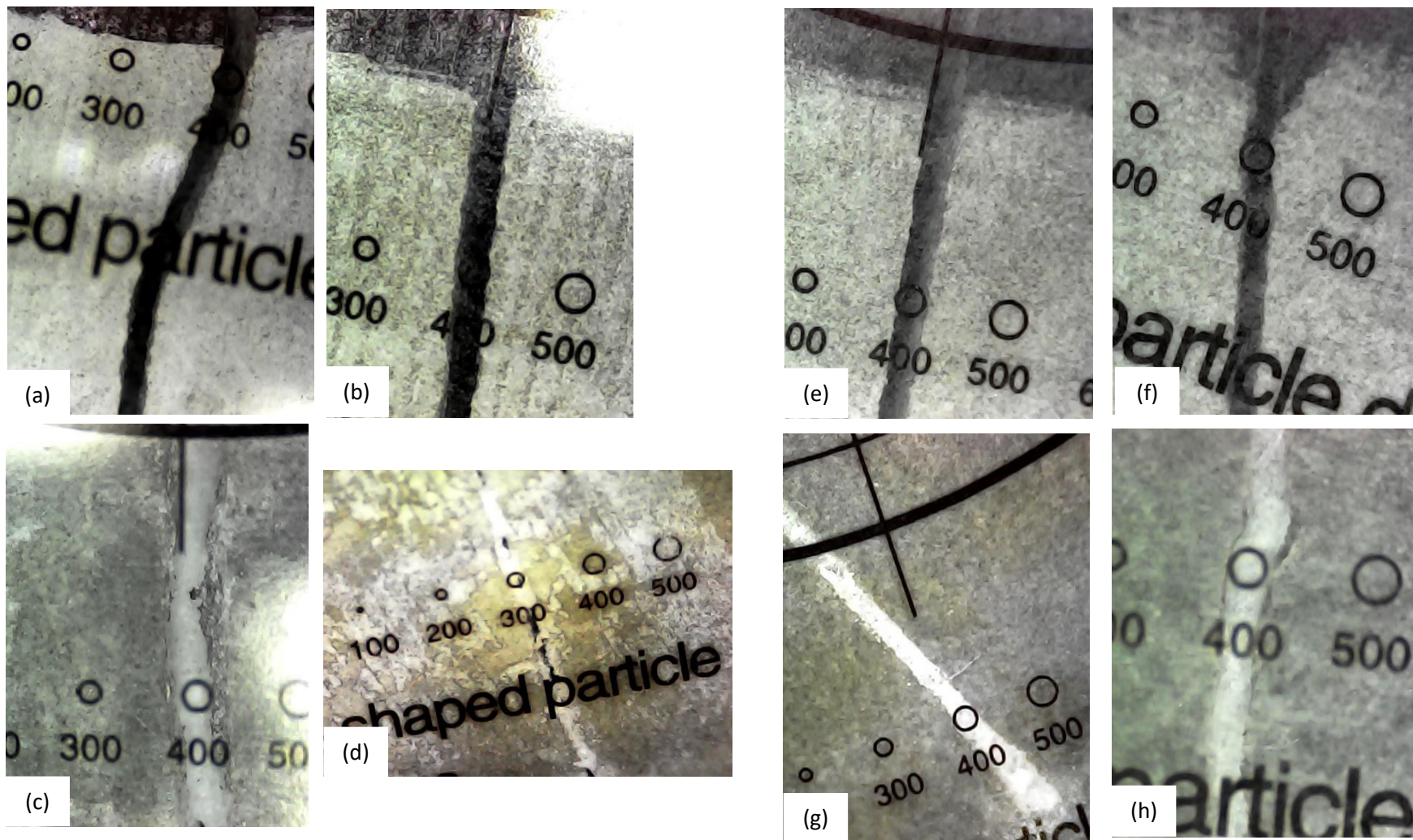
Isso confirma o que Takagi *et al.* (2018) informaram sobre o efeito do aditivo de dissolução e recristalização de subprodutos da hidratação do próprio cimento, ou seja, sua atividade hidráulica ocorre em consequência da reação química de outros compostos.

Também cabe citar o aspecto de adesão dos produtos formados, indicando melhor qualidade do selamento.

Nas amostras de CE da Figura 36 (a, b, c, d) é verificado na amostra 1 o fechamento parcial em trechos onde a fissura é menos espessa, com abertura máxima de 0,2 mm. Na amostra 2 foi observado o selamento total da fissura em determinados locais da amostra, com abertura de 0,4 mm.

Apesar de não haver o aditivo autocicatrizante nesta mistura, a autocicatrização visualizada pode estar vinculada com os efeitos de hidratação e carbonatação dos compostos da escória, que contém altos teores de cálcio. Os acúmulos de produtos precipitados próximo à abertura da fissura, podem ser justificados principalmente, pelo processo de hidratação contínua, que ocorre em concretos jovens, justificada pela disponibilidade de partículas ainda não hidratadas, como no caso das amostras com 56 dias. Também há contribuição pela presença de CO<sub>2</sub>, que possibilita a formação de carbonato de cálcio (De Belie *et al.* (2018).

Figura 35 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CF (a, b) e CAF (e, f) antes da ativação e amostras de CF (c, d) e CAF (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

Assim como nas amostras de CF E CAF, é possível observar um melhor desempenho nas amostras de CAE em comparação às de CE. Nos dois corpos de prova analisados foi verificado o selamento de fissura até 0,4 mm (Figura 36 – e, f, g, h)

Na Figura 36 (e, g) é notada uma pequena diferença, com um vazio no meio dos produtos autocicatrizados, ilustrando o crescimento de produtos de hidratação nas paredes da fissura, de forma progressiva das bordas para o centro assim como registrado por Khaliq e Ehsan (2016).

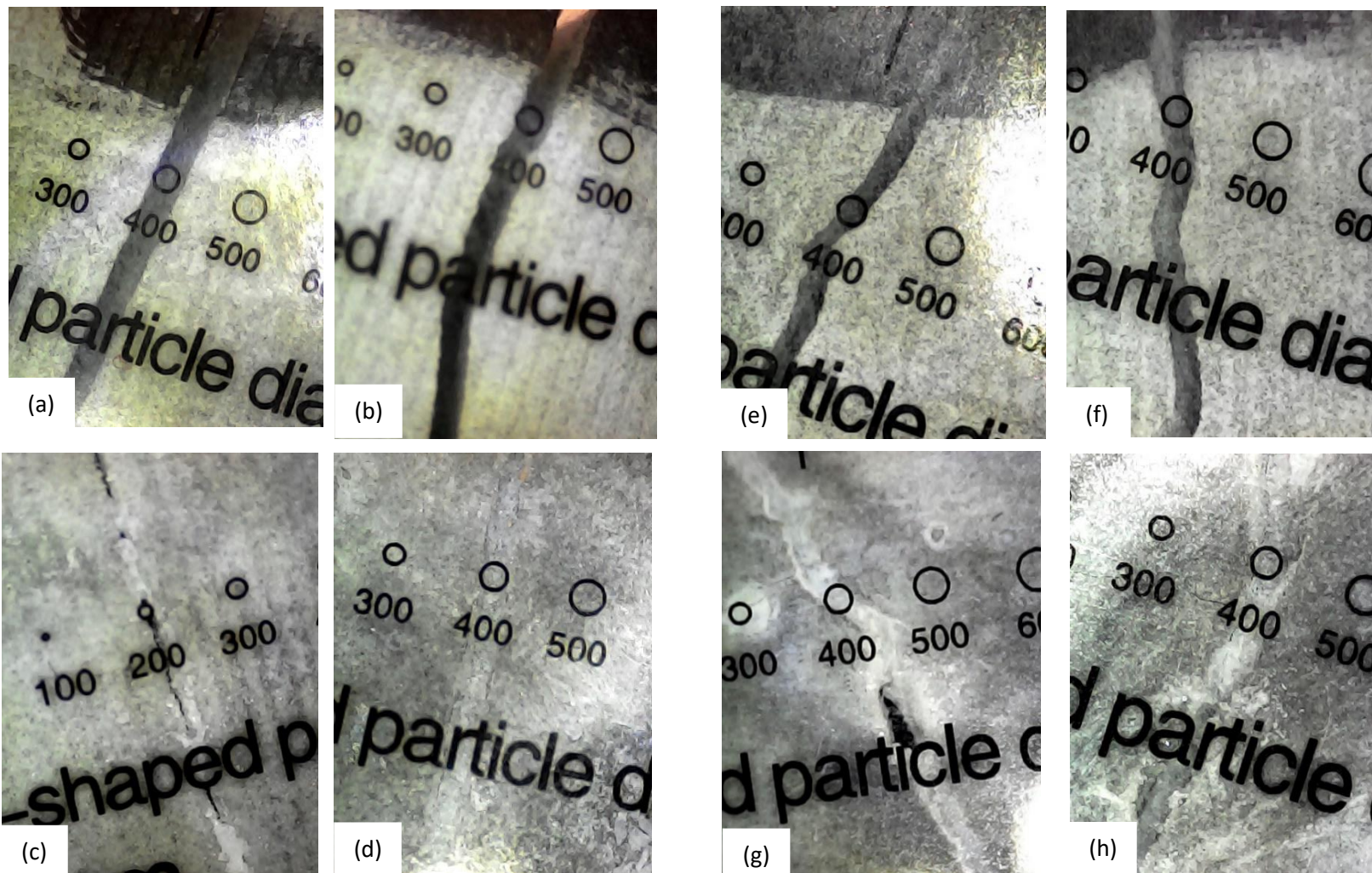
Na Figura 37 (a, b, c, g) foi verificado o preenchimento parcial do trecho com abertura máxima de 0,2 mm, em ambas as amostras, conforme verificado por Roig-Flores *et al.* (2015). Tal crescimento de hidratos é justificado pela reatividade da pozolana, na presença de umidade, com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, precipitando principalmente C-S-H (Hoppe *et al.*, 2017).

Em sua tese, Pacheco (2020) também verificou o selamento de fissuras com uso de pozolana, tanto pela formação de C-S-H quanto  $\text{CaCO}_3$ , ilustrando geometria similar ao encontrado neste estudo.

Em seu estudo com CP IV + pozolana, Capelesso (2018) não verificou o preenchimento das fissuras, mesmo com menor abertura (na faixa de 0,1 mm) e em idades avançadas (91 dias). Isso pode ser justificado pelo uso de um cimento mais puro e de um baixo teor de substituição do cimento por SCMs neste estudo, complementando a hipótese de haver menor selamento da fissura em amostras com pozolana pois esta consumiria o hidróxido de cálcio que se depositaria na fissura.

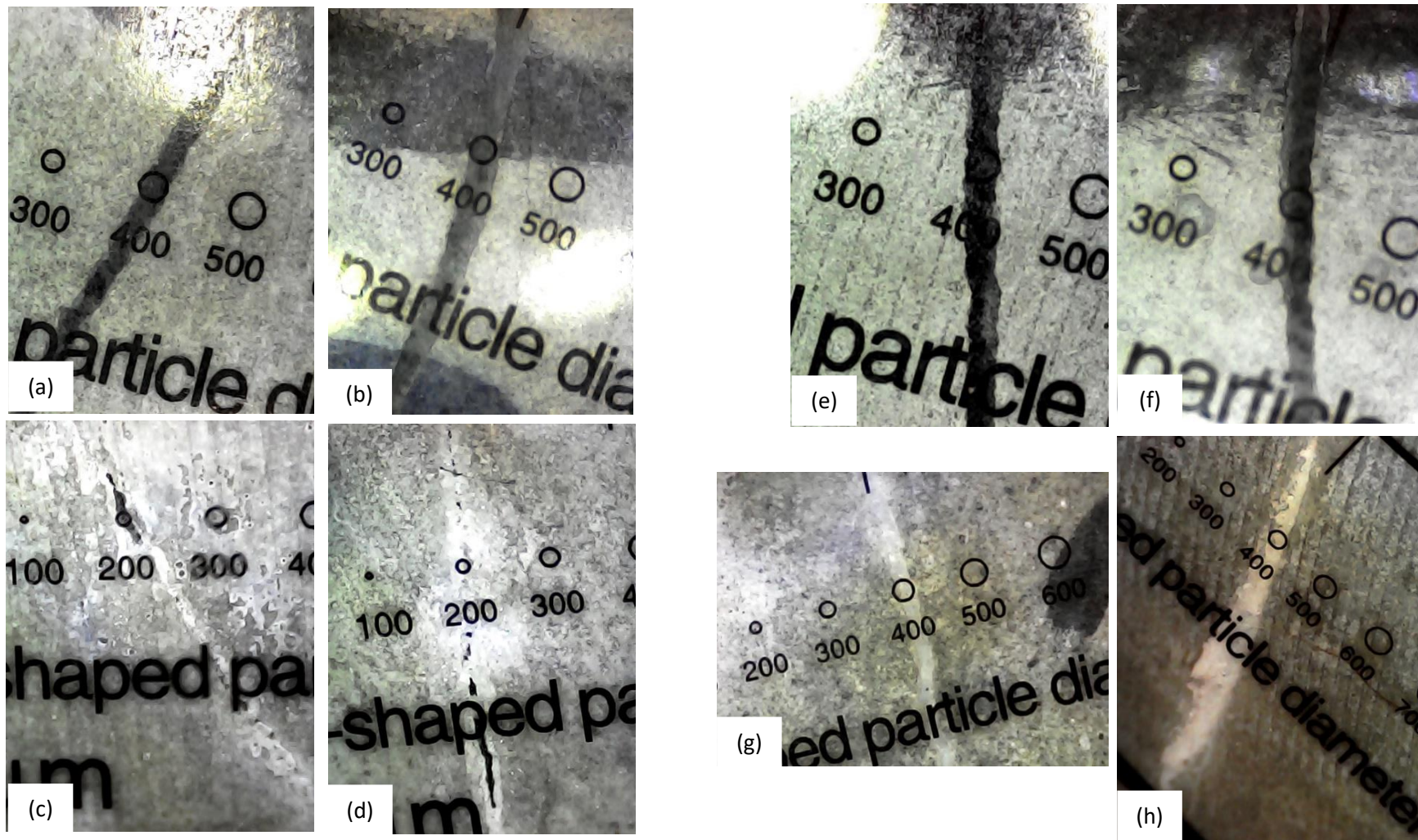
Na Figura 37 (e, f, g, h) referente às amostras de CAP, em ambas as amostras é verificado o preenchimento completo da fissura no trecho analisado, com abertura de 0,4 mm, ilustrando a melhoria de desempenho em relação às amostras de CP, assim como ocorre com o *filler* e a escória.

Figura 36 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CE (a, b) e CAE (e, f) antes da ativação e amostras de CE (c, d) e CAE (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

Figura 37 – Imagens de microscopia ótica: amostras de CP (a, b) e CAP (e, f) antes da ativação e amostras de CP (c, d) e CAP (g, h) depois da ativação, nas amostras 1 e 2 respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

De forma geral, foi observado formação de hidratos em todas as variáveis (F, E e P), mesmo sem o uso do aditivo autocicatrizante, o que já era esperado pelo conhecimento do potencial de hidratação dos SCMs utilizados.

Ainda há a potencialização destas reações pela utilização de amostras em pasta, ou seja, sem utilização de agregado, o que, segundo Roig-Flores *et al.* (2015) há maior disponibilidade de material reativo.

Além disso, foi observado um maior volume dos produtos gerados nas amostras com aditivo, conforme Figura 38, o que valida a informação da estimulação de produtos de hidratação pelo aditivo, ou seja, potencializa os materiais já existentes na mistura cimentícia com e sem SMCs.

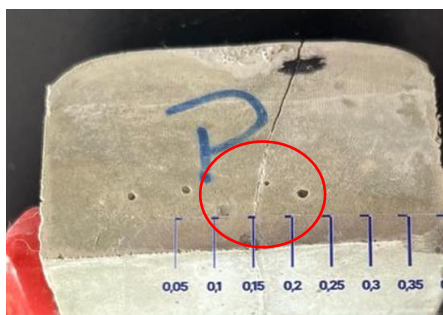
Figura 38 – Formação de produtos de hidratação com grande volume em CAF.



Fonte: Autor (2025).

Uma observação geral foi a irregularidade na recuperação das fissuras, já confirmada por Van Tittelboom e De Belie (2013), pois nenhuma amostra apresentou completo selamento, como observado na Figura 39. Sugere-se uma análise por um maior período de tempo para verificar a continuidade do crescimento dos produtos de hidratação.

Figura 39 – Amostra de CP com selamento da fissura em parte de sua linearidade.



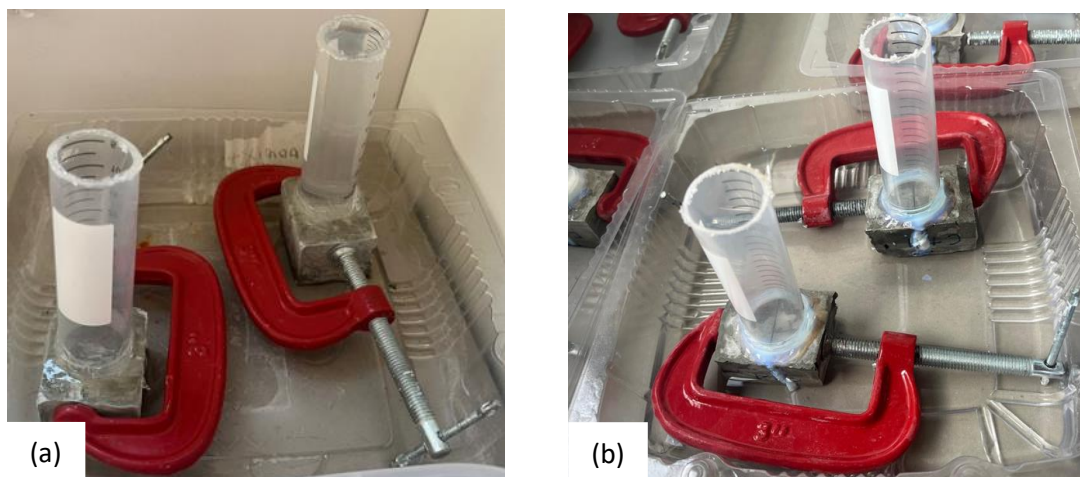
Fonte: Autor (2025).

#### 5.4.2 Autocicatrização: análise por permeabilidade a baixa pressão

Nas Figuras 40 a 44 abaixo são ilustrados os resultados do ensaio complementar de autocicatrização pela análise de permeabilidade a baixa pressão, nas amostras após a carga com água no tubete por 24 h.

As amostras de CA da Figura 40 (b) esvaziaram completamente, conforme é possível verificar pelo nível de água no tubete e o acúmulo de água no recipiente, ilustrando a passagem de água pela fissura, portanto, o não selamento desta. Uma das amostras teve esvaziamento lento, sem recarga de água por 24 h, ilustrando um selamento parcial da fissura. A outra, apresentou esvaziamentos completos do tubete em 24 s após o início da carga, sendo assim, necessitou de várias recargas no período.

Figura 40 – Imagens das amostras de C (a) e CA (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.



Fonte: Autor (2025).

Isso pode ser justificado pela falta de controle interno da fissura e pela quebra apresentada na face inferior (de saída d'água) nas amostras, conforme Figura 41.

Figura 41 – Imagens mostrando em detalhe a fissura com quebra nas bordas na face inferior das amostras de CA.

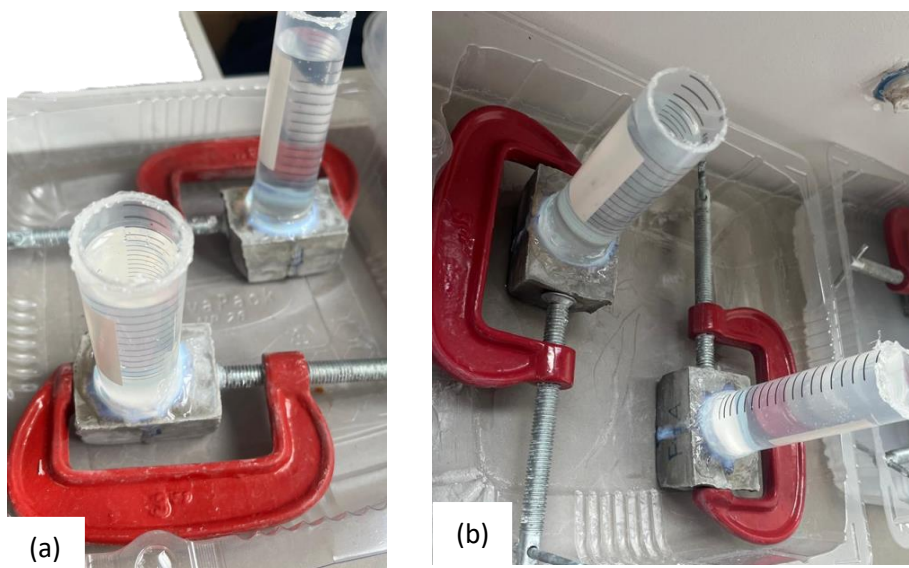


Fonte: Autor (2025).

As amostras de CF da Figura 42 (a) apresentaram uma pequena passagem de água pela fissura após o período de carga, em ambas as amostras, com menos de 10 % do volume do tubete, ilustrando um selamento parcial superior das fissuras.

O mesmo comportamento foi observado nas amostras de CAF da Figura 42 (b).

Figura 42 – Imagens das amostras de CF (a) e CAF (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.

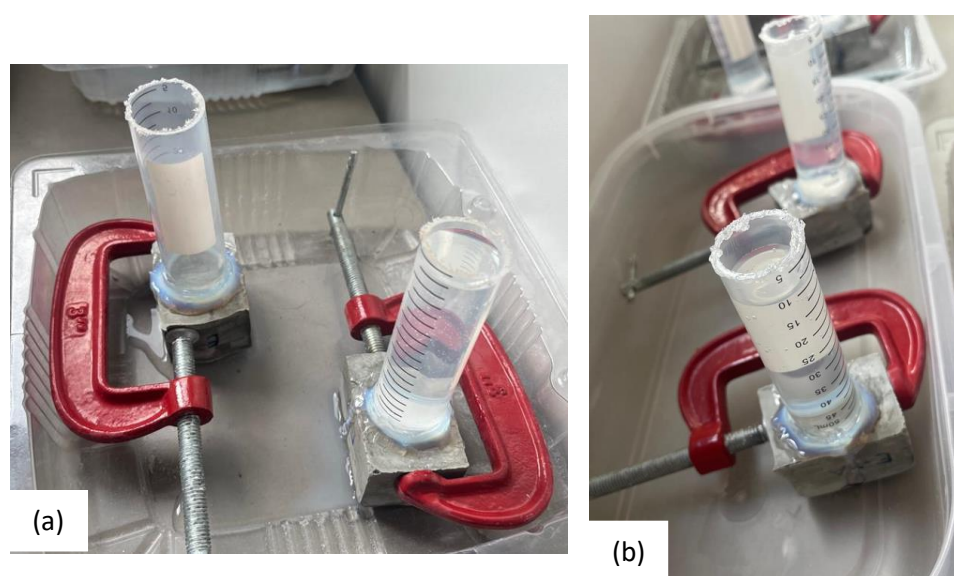


Fonte: Autor (2025).

Nas amostras com CE da Figura 43 (a) o comportamento foi de total impermeabilidade em uma das amostras e pouca passagem de água pela fissura na outra, com 90 % de esvaziamento do tubete após as 24 h de carga (sem recarga), ilustrando um selamento parcial da fissura.

Já as amostras de CAE (Figura 43-b) apresentaram um desempenho superior, sem nenhuma passagem de água pela fissura em ambas as amostras após o período de carga, ilustrando o completo selamento das fissuras.

Figura 43 - Imagens das amostras de CE (a) e CAE (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.



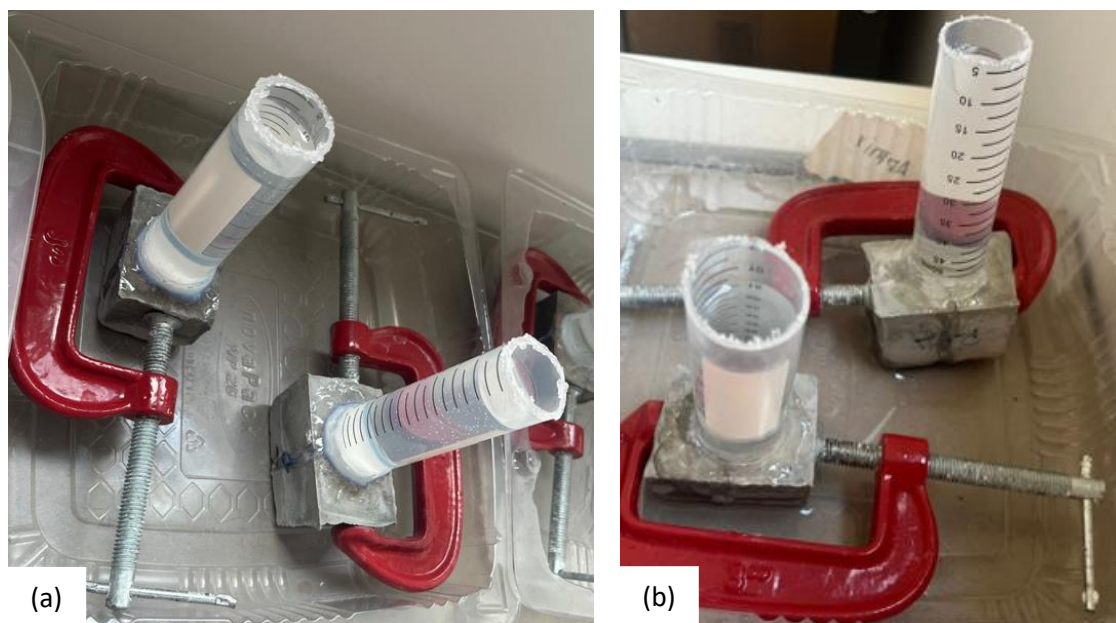
Fonte: Autor (2025).

Nas amostras de CP e CAP da Figura 44 (a, b), houve mínima perda d'água, o que ilustra o selamento da fissura em ambas as amostras, sem ilustrar diferença pelo uso do aditivo.

Isso pode estar vinculado à baixa pressão aplicada, pois Pacheco (2020) informou que os produtos de hidratação na superfície da fissura das amostras com uso de pozolana, não apresentam resistência e adesão suficientes para suportar pressão (Pacheco, 2020).

Qureshi, Kanellououlos e Al-Tabbaa (2019) mostraram em seu estudo o selamento de fissuras de até 0,5 mm com uso de pozolana e 0,1 mm com uso de cimento.

Figura 44 - Imagens das amostras de CP (a) e CAP (b) ao final do ensaio de permeabilidade por 24 h.



Fonte: Autor (2025).

De forma geral, também foi observado selamento da abertura em todas as variáveis (F, E e P), mesmo sem o uso do aditivo autocicatrizante, assim como verificado na análise visual da autocicatrização.

Por se tratar de uma nova metodologia de controle de fissuração, é possível que a abertura da fissura na parte interna da amostra tenha sido menor, dada a pressão causada pela presilha e, neste caso, isso pode ter influenciado o resultado positivo também nas amostras sem o aditivo.

## 6. CONCLUSÃO

Neste estudo foi verificada a compatibilidade do uso do aditivo autocicatrizante, em misturas cimentícias com substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, ilustrado pela similaridade e desempenho satisfatório nos resultados das amostras de SCMs + aditivo + CP I em relação às amostras de CP I + aditivo. Também foram encontrados melhores resultados nas amostras com uso do aditivo em relação as amostras sem ele:

- Pelas análises de FRX, DRX e ATD/TG dos materiais anidros, foi verificado o potencial reativo de cada componente, como hidratação e carbonatação;
- Pela avaliação das propriedades de superfície dos materiais, foi possível definir sua reatividade equivalente e, portanto, o percentual de substituição do cimento pelos SCMs. Isso foi comprovado, dada a similaridade dos resultados nos ensaios posteriores, comparando-se entre SCMs;
- Na análise de FRX, DRX e ATD/TG dos materiais hidratados não foram observadas diferenças acentuadas entre as amostras sem e com o aditivo autocicatrizante, o mais notório foi a obtenção de maiores picos nas amostras com aditivo, pelo ensaio de DRX, ilustrando o aumento da cristalinidade dos produtos formados pelo seu uso;
- Na leitura dos resultados de microscopia foi encontrado melhor autocicatrização nas amostras com uso do aditivo autocicatrizante, com ordem de eficiência  $F > E > P > A$ . Também foi verificada a reação de autocicatrização em menor potencial pelos SCMs (amostras sem o aditivo autocicatrizante);
- No ensaio de permeabilidade todas as amostras válidas, com e sem aditivo autocicatrizante apresentaram desempenho satisfatório, porém a falta de controle da abertura da fissura interna pode ter prejudicado a análise.

Em conclusão, nas condições e formulações avaliadas neste estudo, a substituição de parte do cimento por SCMs é eficiente e o uso do aditivo autocicatrizante é benéfico à mistura, sendo assim, é possível desenvolver misturas cimentícias com menor emissão de carbono e com maior durabilidade. Porém faz-se necessário avaliar todas as variáveis que podem alterar as reações destes materiais,

principalmente em relação ao aditivo autocicatrizante, como a formulação da mistura e as condições de exposição, dadas as condições específicas da aplicação final.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Preparação de maior quantidade de corpos de prova para melhorar a análise dos resultados encontrados;
- Aumento da pressão de água no ensaio de permeabilidade, possibilitando ilustrar a aderência dos produtos formados na fissura, mesmo em condições hidrostáticas mais severas, que ilustram situações reais de obras;
- Melhor controle da abertura de fissura, pois a abertura interna pode ter sido menor, dada a colocação da haste metálica somente na superfície de uma das faces;
- Aumento do teor de substituição do cimento por SCMs, a fim de verificar a funcionalidade do aditivo autocatrizante com materiais alternativos ao cimento, sendo esta uma tendência mundial;
- Complementar o estudo com outros ensaios como MEV/EDS e ultrassom para possibilitar uma melhor análise geral dos resultados.

## REFERÊNCIAS

ACTION and Progress. **Associação Global de Cimento e Concreto – GCCA**, 2021. Disponível em: <<https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2023/01/GCCA-Roadmap-One-Year-On-Action-and-Progress.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

AFIFUDIN, H. *et al.* *Microbial participation in the formation of calcium silicate hydrated (CSH) from Bacillus Subtilis.* **Precedia Engineering**, v. 20, p. 159-165, 2011.

American Concrete Institute Committee 212, “Report on Chemical Admixtures for concrete (ACI 212.3R-10),” 2010.

ANTON-PAAR. Disponível em: <<https://www.anton-paar.com>>. Acesso em: 25 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2023.

American Society for Testing and Materials - ASTM. Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. **ASTM D7348-07**. USA, 2021.

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

AZZI, S. S. **Influência da pozolanicidade e do efeito fíler na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Acordo de Paris**. Disponível em: <[https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo\\_paris.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf)>

Acesso em: 11 dez. 2022.

BREUGEL K. Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure; Proceedings of the 37th **Conference on Our World in Concrete & Structures**; Singapore, p. 89–103, 2012.

CÂNDIDO, T. G. *et al.* **Caracterização de concretos com baixo consumo de cimento Portland**. Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción. 2021.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 2018. 295 p. Tese de *Doutorado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CAPPELLESSO, V. G. *et al.* A review of the efficiency of self-healing concrete Technologies for durable and sustainable concrete under realistic conditions. **Internacional Materials Reviews**, v. 68, n. 5, p. 556-603. 2023.

CARBICRETE Technology. **Carbicrete.com**, 2022. Disponível em: <<https://carbicrete.com/technology/>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

CASTRO, A. L; LIBORIO, J. B. L; PANDOLFELLI, V. C. **A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do**

**método de dosagem computacional.** Associação Brasileira de Cerâmica, v. 57, 2011.

CIRINO, M. A. G. et al. **Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do Pecém, Ceará, Brasil.** Matéria, v. 26, Rio de Janeiro. 2021.

Concrete sem cimento: o que é e como funciona? **Concrete Show** [online], São Paulo, 07 de junho, 2021. Disponível em: <<https://digital.concreteshow.com.br/artigos/concreto-sem-cimento-o-que-e-como-funciona/>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

COSTA, E. B. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

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

DE BELIE, N. et al. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures.** Advanced Materials Interfaces, v. 1800074, p. 1–28, 2018.

DING, X. et al. Designing self-healing hydrogels for biomedical applications. **Materials Horizons**, 2023.

DOOSTKAMI, H. et al. Effects of healing start time and duration on conventional and high-performance concretes incorporating SAP, crystalline admixture, and sepiolite: A comparative study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024.

Edvardsen, C. **Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete.** Materials Journal, 1999.

EL-NEWIHY, A; AZARSA, P; GUPTA, R; BIPARVA, A. Effect of Polypropylene fibers on self-healing and dynamic modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete. **Fibers**, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 15978**: Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. Brussels: BSI, 2011.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. **On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. Smart Materials and Structures**, v. 25, p. 1–17, 2016.

FONSECA, M. J. M; MAINTINGUER, S. I. **Aplicação da logística reversa na construção civil como mecanismo ambiental sustentável em políticas públicas. Brazilian Journal of Development. Curitiba**, v. 5, n. 1, p. 140-149, jan. 2018.

GuoBiao Standards. **GB 18445**: Cementitious capillary crystalline waterproofing materials. China, 2012.

GERALDO, R.H; GUADAGNINI, A. M; CAMARINI, G. Self-healing concrete with crystalline admixture made with different cement content. **Cerâmica**, vol. 67, p. 370-377, 2021.

GRANGER, S. et al. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: mechanical tests and acoustic emission analysis. **Cement and Concrete Research**, 2007.

GUAN, X. et al. Effect of exposure conditions on self-healing behavior of engineered cementitious composite incorporating limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, 2020.

HELENE, P; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo. 2010.

HOPPE, J. F. *et al.* **Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado.** Revista Matéria, v. 22, n. 3, 2017.

HOPPE, J. F. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto.** 2008. 318 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil e Urbana – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HUANG, H; YE, G; DAMIDOT, D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 60, p. 68-82, 2014.

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

JIANG, Y. *et al.* Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete – A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.136, p. 187-197, 2018.

JOHN, V. M. *et al.* Fillers in cementitious materials – Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78. 2018.

KRELANI, V. **Self-healing capacity of cementitious composites.** Tese de Doutorado em Engenharia Estrutural, Terrestre e Geotécnica – Politecnico di Milano, Milão, 2015.

LI, H. *et al.* Effect of types of curing environments on the self-healing capacity of mortars incorporating crystalline admixture. **Construction materials**, v. 18, 2023.

LIN, X. *et al.* A comprehensive review on self-healing cementitious composites with crystalline admixtures: Design, performance and application. **Construction and Building Materials**, v. 409, 2023.

LINS, D. N. **Análise da resistência à compressão do cimento LC<sup>3</sup> e a influência das adições minerais em seu desempenho**. 2017. 163 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

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

NOBRE, T. R. S. *et al.* Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de <sup>29</sup>Si no estado sólido. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, v.6, n.19, mai., 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRA, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 782 p.

MUHAMMAD, N. *et al.* Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: a review. **Construction and building materials**, v. 112, p. 1123-1132, 2016.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* **Crystalline admixture effects on crystal formation phenomena during cement pastes' hydration**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 139, p. 3361–3375, 2020.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* **An overview of a twofold effect of crystalline admixtures in cement-based materials: from permeability-reducers to self-healing stimulators**. *Journal of Building Engineering*, v. 41, 2021.

OLIVEIRA, A. S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. 2019. 325 p. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

OLIVEIRA, A. M. W.; LEITE, A. G. F.; LUCIO, D. S.; FERREIRA, G. S.; **Verificação da resistência à compressão em concreto com adição de fíler calcário**. Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Recife. 2017.

OLIVEIRA, F. **Concreto sem cimento**. Construção Latina Americana.com, 2018. Disponível em: <<https://www.construcaolatinoamericana.com/news/concreto-sem-cimento-/3132976.article>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 2020. 350 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, 2020.

PALACIOS, M. *et al.* **Fuerzas de repulsión de aditivos superplastificantes en sistemas de escoria granulada de horno alto en medios alcalinos, desde medidas de AFM a propiedades reológicas**. Mater. Construcc., v. 62, n. 308, p. 489-513, oct-dic. 2012.

**PENETRON BRASIL LTDA**. FISPQ004 – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos do Penetron Admix, rev. 12. São Paulo, 2021.

**PENETRON BRASIL LTDA**. Rumo ao concreto de carbono zero. São Paulo, vol 1. 2022.

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

RAHHAL, V. *et al.* Role of the filler on Portland cement hydration at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 82-90, 2012.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 211 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.

REDUZIR a “pegada” de carbono é prioridade para a indústria do cimento. **Concrete Show** [online], São Paulo, 17 mai. 2021. Disponível em: <<https://digital.concreteshow.com.br/inovao/reduzir-%E2%80%9Cpegada%E2%80%9D-de-carbono-prioridade-para-industria-do-cimento>>. Acesso em: 11 dez. 2022.

REDDY, T. C. S; RAVITHEJA, A. Macho mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 10, p. 23-32, 2019.

RILEM. Self-healing phenomena in cement-based materials. Heidelberg: Springer Netherlands, v.11, 2013.

ROCHA, P.; CARDEIRA, A. **Transição Energética e Descarbonização: eficiência, competitividade, inovação na Indústria de Cimento Nacional e Políticas Públicas de apoio à sua transformação**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 117-126.

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

SAHAMARAN, E; YILDIRIM, G; ERDEM, T. K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, p. 89-101, 2013.

SILVA, G. V; BORGES, S. P. T; BARAÑANO, A. G. **Propriedades físicas, químicas e mecânicas dos cimentos tipo CPI e CPV obtidos com diferentes proporções com fíler de calcário**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 13. 2021.

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

SOARES, G. A. **Influência das propriedades físico-químicas de diferentes escórias como material cimentício suplementar**. 2020. 165 p. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 2013. 130 p. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

TAKAGI, E. M. *et al.* Concreto autocicatrizante ‘engenheirado’ com cimento de escória de alto forno ativado por aditivo cristalino (PRAH 4G). **Revista Estrutura – ABECE**, v 5, p. 39-45, abr. 2018.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; COFRE, D. L. Concreto projetado para impermeabilização por cristalização de túneis. **Revista Concreto & Construções – IBRACON**, v 97, p. 70-77, jan-mar. 2020.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; HELENE, P. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. **Revista Concreto & Construções – IBRACON**, v 73, p. 75-79, jan-mar. 2014.

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

VAN TITTELBOOM, K. et al. Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 125-137, 2016.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349-359, 2012.

VAN TITTELBOOM, K. et al. Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack sealing efficiency in cementitious materials. **Materials and structures**, v. 45, p. 105-121. 2012.

XUE, C. et al. Self-healing efficiency and crack closure of smart cementitious composite with crystalline admixture and structural polyurethane. **Construction and Building Materials**, v. 260, 2020.

ZANCHETTA, L. M. **Efeito do teor de filler calcário na microestrutura de materiais cimentícios – uma análise multiescala**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

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

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

ZIEGLER, F. et al. Evaluation of internal and superficial self-healing of cracks in concrete with crystalline admixtures. **Materials (Basel)**. 2020.

Wang, X. et al. Effect of super absorbent polymer and mineral additives on mechanical, shrinkage and healing properties of self-healing lightweight aggregate concrete under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 357, 2022.

## ANEXO A

Neste anexo é ilustrada a memória de cálculo referente à quantificação das proporções de substituição de 15% do cimento por SMCs em área de superfície específica equivalente, conforme descrito em 4.2.2.

Encontramos inicialmente a área de superfície total da amostra, considerando-a somente cimento, com massa total de 30 g:

$$A_{amos} = A_{cim} \times m_t$$

$$A_{amos} = 1,43 \text{ m}^2/\text{g} \times 30 \text{ g} = \mathbf{42,90 \text{ m}^2}$$

$A_{amos}$  = área total da amostra

$A_{cim}$  = área de cimento verificada por BET

$m_t$  = massa total de amostra necessária para moldagem

Posteriormente calculou-se a área de superfície equivalente a 85 % de cimento, sendo esta a quantidade fixa de cimento para todas as amostras:

$$A_{eqcim} = A_{cim} \times m_t \times \%cim$$

$$A_{eqcim} = 1,43 \frac{\text{m}^2}{\text{g}} \times 30 \text{ g} \times 85\% = \mathbf{36,47 \text{ m}^2}$$

$A_{eqcim}$  = área equivalente de cimento (85%)

$A_{cim}$  = área de cimento verificada por BET

$m_t$  = massa total de amostra necessária para moldagem

$\%cim$  = % de cimento a ser mantido na mistura (85%)

Então verificou-se esta quantidade em massa, considerando-a somente cimento, ou seja, calculando com base na área de superfície deste:

$$M_{eqcim} = \frac{A_{eqcim}}{A_{cim}}$$

$$M_{eqcim} = \frac{36,47 \text{ m}^2}{1,43 \text{ m}^2/\text{g}} = \mathbf{25,50 \text{ g}}$$

$M_{eqcim}$  = massa equivalente de cimento (85%)

$A_{eqcim}$  = área equivalente de cimento (85%)

$A_{cim}$  = área de cimento verificada por BET

Por fim, definiu-se a área equivalente e posterior massa dos SCMs individualmente, com o teor de 85 % de substituição:

$$A_{eqsub} = A_{amos} \times \%sub$$

$$A_{eqsub} = 42,90 \text{ m}^2 \times 15\% = \mathbf{6,44 \text{ m}^2}$$

$A_{eqsub}$  = área equivalente de substituição (15%)

$A_{amos}$  = área total da amostra

$\%sub$  = % a ser substituído (15%)

$$M_{eqF,E,P} = \frac{A_{eqsub}}{A_{F,E,P}}$$

$$M_{eqF} = \frac{6,44 \text{ m}^2}{1,70 \text{ m}^2/g} = \mathbf{3,79 \text{ g}}$$

$$M_{eqE} = \frac{6,44 \text{ m}^2}{0,75 \text{ m}^2/g} = \mathbf{8,59 \text{ g}}$$

$$M_{eqP} = \frac{6,44 \text{ m}^2}{0,93 \text{ m}^2/g} = \mathbf{6,92 \text{ g}}$$

$M_{eqF}$  = massa equivalente de filler, escória, pozolana (15%)

$A_{eqsub}$  = área equivalente de substituição (15%)

$A_F$  = área de *filler*, escória, pozolana verificada por BET