

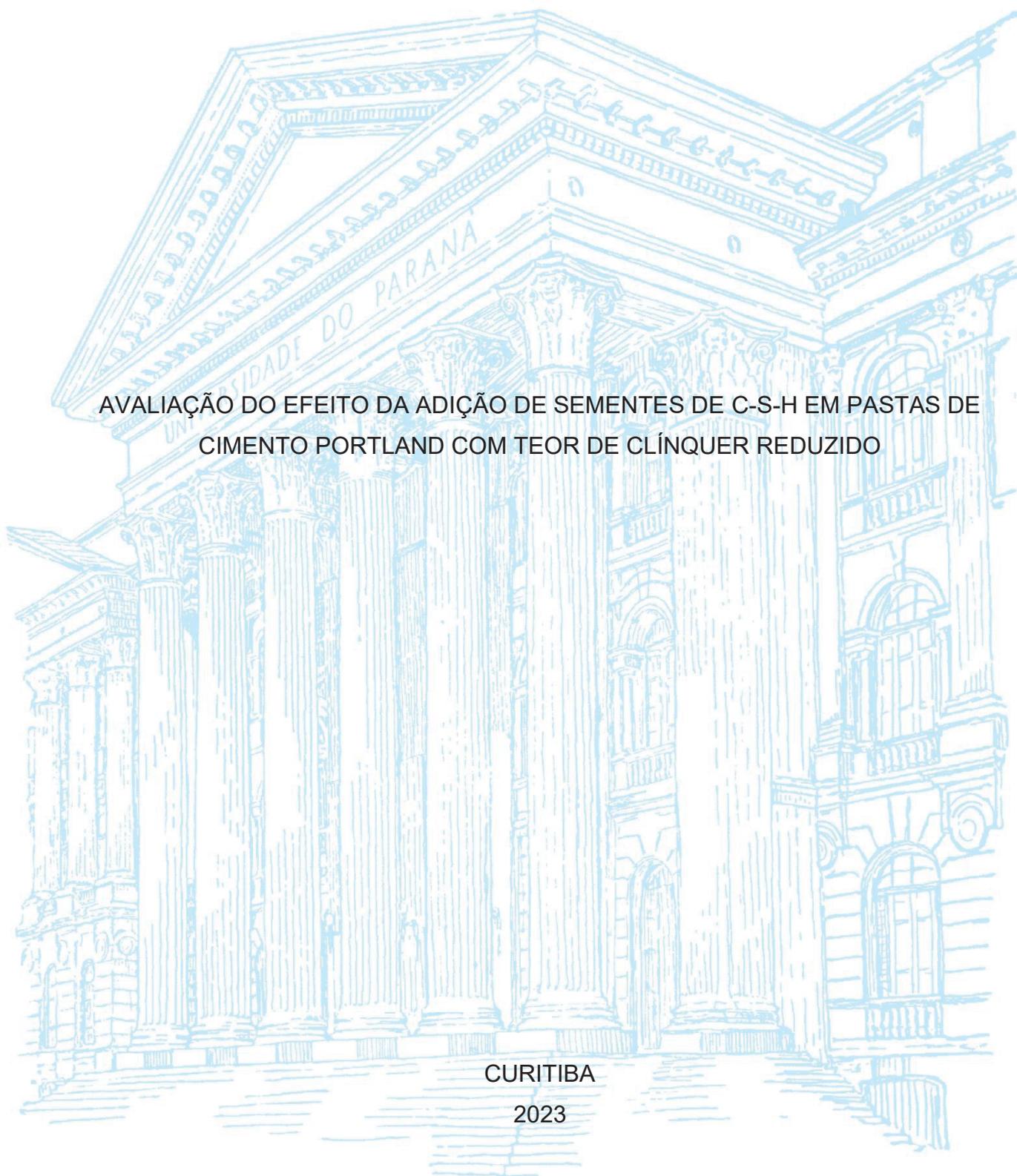
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULA AGUILAR GUIMARÃES

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE SEMENTES DE C-S-H EM PASTAS DE
CIMENTO PORTLAND COM TEOR DE CLÍNQUER REDUZIDO

CURITIBA

2023



PAULA AGUILAR GUIMARÃES

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE SEMENTES DE C-S-H EM PASTAS DE
CIMENTO PORTLAND COM TEOR DE CLÍNQUER REDUZIDO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a Doutora Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Guimarães, Paula Aguilar

Avaliação do efeito da adição de sementes de C-S-H em pastas de cimento Portland com teor de clínquer reduzido / Paula Aguilar Guimarães. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

1. Cimento Portland. 2. Cimento – Aditivos. 3. Silicato de cálcio hidratado. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PAULA AGUILAR GUIMARÃES** intitulada: **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE SEMENTES DE C-S-H EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND COM TEOR DE CLÍNQUER REDUZIDO**, sob orientação da Profa. Dra. MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Agosto de 2023.

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 19:37:33.0

MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
24/08/2023 10:36:36.0

THIAGO MELANDA MENDES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 21:14:07.0

SARAH HONORATO LOPES DA SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
22/08/2023 17:58:20.0

JOSÉ MARQUES FILHO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: poscivil@ufpr.br
Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 308863
Para autenticar este documento/assinatura, acesse
<https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 308863

AGRADECIMENTOS

Não é possível fazer um bom trabalho sozinha. Tive a sorte e honra de ter ao meu lado uma equipe de apoio técnico e emocional de valor inestimável, a quem serei eternamente grata.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha eterna orientadora, Professora Doutora Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa, que me acompanhou desde a minha entrada no mundo acadêmico. Durante a Iniciação Científica, Trabalho de Conclusão de Curso, aulas da pós-graduação e ao longo de todo o Mestrado, sempre representou para mim um exemplo, uma mentora e uma amiga. Muito obrigada pela orientação ao longo de todos estes anos, por todo seu apoio e paciência em todas as situações, por seus inestimáveis ensinamentos, por acreditar e apoiar meus maiores sonhos e por ir sempre muito além do papel de uma orientadora. Profe, sem você este trabalho e tudo que ainda está por vir não seria possível. É uma honra ser sua aluna! Muito obrigada!

Não poderia deixar de agradecer à Professora Doutora Sarah Tamura, que também acompanha minha jornada acadêmica desde seu início e a quem devo grande parte desta paixão pelo laboratório, de onde não pretendo sair tão cedo. Sem dúvidas, você é uma das razões de eu ter seguido a carreira acadêmica. Obrigada por todo apoio sempre, por toda paciência com a aluna de IC, por todas as instruções de como realizar um ensaio da forma mais perfeita possível e por todo apoio que você sempre me deu, dentro e fora da Universidade.

Faltam palavras para agradecer à minha família, que sempre apoiou cada passo que me levou até aqui. Obrigada Rodrigo e Bruno, que carregaram materiais, deram caronas, ouviram reclamações quando algo não dava certo e me apoiaram em absolutamente cada momento deste Mestrado. Vocês são a minha maior inspiração e o meu maior suporte para ultrapassar qualquer obstáculo que se apresente. A epígrafe é uma homenagem que faço para vocês. Obrigada mãe, pai e vó pelo apoio incondicional, por escutar minhas explicações sobre pastas cimentícias, mover montanhas para ajudar com processos burocráticos e por sempre estarem do meu lado, não importando a situação.

Ainda em se tratando de família, obrigada Lucas, por se fazer presente e me apoiar em cada decisão e etapa deste trabalho, mesmo a um oceano de distância. Obrigada por ser esse parceiro em absolutamente todos os momentos, por me ajudar

a treinar apresentações, analisar dados e passar pelos dias mais difíceis. Obrigada por todo amor, apoio e por toda sua dedicação incansável e fundamental para finalizar mais esta etapa.

Gostaria de agradecer a todos meus amigos, de dentro e fora da Universidade, por todo apoio, saídas e cafés durante todo este período.

Agradeço a toda equipe das empresas Imcd (São Paulo, Brasil) e BASF (Alemanha) pelo fornecimento de materiais e suporte técnico ao longo de toda a pesquisa. Em especial, gostaria de agradecer ao Engenheiro Odair Teixeira, que não mediu esforços para possibilitar o que fosse preciso para dar andamento à pesquisa, bem como aos Dr. Xuerun Li, Dr. Christoph Hesse, e Thomas Giel, que por meio de videochamadas e emails contribuíram a aumentar a profundidade das análises realizadas. Agradeço por toda paciência, atenção e orientação. *Vielen Dank.*

À Votorantim Cimentos, pela doação de materiais usados ao longo de toda a pesquisa e à Doutora Suellen Alves e Valdeci de Souza Almeida, do Laboratório de Físico-Química do Departamento de Química da UEPG, pela doação de reagentes;

À técnica Viviane do Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) da UFPR, pela dedicação, paciência e auxílio nos ensaios;

Aos laboratórios parceiros Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR; Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR; Laboratório de Processos e Projetos Ambientais (LABPPAM); Marcelo Borba e equipe da Wacker Química do Brasil Ltda. (Jandira), que possibilitaram a complementação de resultados da pesquisa;

Aos professores da UFPR, que contribuíram para a minha formação e passaram conhecimentos fundamentais;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro que possibilitou a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPR, pela disponibilização de espaço físico para a condução da pesquisa e pelo suporte durante este processo;

Por fim, agradeço enormemente a todos que participaram, direta ou indiretamente, deste processo. Sem vocês, esta dissertação não seria possível.

Muito obrigada!

“A grandeza da vitória está na dificuldade para obtê-la.”

Do Atlântico ao Pacífico.

RESUMO

A produção de cimento Portland representa cerca de 7% de toda emissão de CO₂ antropogênica, sendo 63% dessa parcela resultante do processo de calcinação, responsável pela obtenção de clínquer, principal componente desse ligante. Para diminuir o impacto ambiental causado por esse composto, tem-se buscado reduzir o teor de clínquer no cimento Portland. Essa tendência pode ser observada em cimentos comercializados mundialmente, que podem apresentar índices elevados de substituição de clínquer por adições minerais, como escórias granuladas de alto forno, cinzas volantes e argilas calcinadas. Apesar da vantagem ambiental, a redução desse componente pode gerar alterações nas propriedades do cimento, como atraso das reações de hidratação e redução das resistências mecânicas nas primeiras idades. Diante disso, a adição de sementes de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) vem sendo estudada como solução para amenizar os efeitos causados pela redução do clínquer na composição dos cimentos. O aditivo consiste em nanopartículas artificiais que promovem a nucleação e dispersão dos grãos de clínquer, levando à aceleração do tempo de pega e ao aumento das resistências mecânicas nas primeiras idades dos materiais cimentícios. Dentro desse contexto, propôs-se estudar o efeito da adição de diferentes teores do aditivo de sementes de C-S-H no desempenho de pastas compostas por cimentos com quantidade reduzida de clínquer. Para isso, foram realizados ensaios para avaliação de tempo de pega, viscosidade, calorimetria, resistências mecânicas (compressão e tração na flexão), módulo de elasticidade estático e retração por secagem. No trabalho, foram avaliadas as propriedades nos estados fresco e endurecido de amostras formadas com os cimentos tipo CP III e CP IV com 0; 1,0; 1,5; 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H em relação à massa de aglomerante, além do teor de 3,0%, que extrapola o ponto de saturação desse aditivo. Devido à presença de dispersante na composição do aditivo comercial de sementes de C-S-H, o uso conjunto de aditivos complementares (antiespumante e estabilizador) é recomendado pelo fabricante bem como por trabalhos da literatura. Diante disso, neste trabalho foram avaliadas, de forma adicional, composições com o maior teor de aditivo de sementes de C-S-H, dentro da faixa de recomendação do fabricante, de 2,0%, na presença de aditivos complementares. Para aprofundar o entendimento da formação dos compostos gerados a partir da presença do aditivo, imagens de microscopia eletrônica de varredura das pastas cimentícias foram analisadas. Ainda, realizou-se ensaio por ataque ácido, para verificar possíveis interações entre o aditivo e as adições minerais contidas nos cimentos. Através do programa experimental conduzido, verificou-se a efetividade da presença de aditivo de sementes de C-S-H em pastas cimentícias com teor de clínquer reduzido. Notou-se aceleração do tempo de pega, antecipação do pico de temperatura durante a hidratação e aumento de resistências mecânicas iniciais das amostras. Na pesquisa também foi evidenciada a interação do aditivo com as adições minerais de escórias de alto forno, gerando um aumento de resistências mecânicas em todas as idades avaliadas. Finalmente, foi possível verificar a potencialização da ação do aditivo de sementes de C-S-H na presença dos aditivos complementares. O ganho de resistência mecânica à tração na flexão e redução de retração por secagem de tais composições foi atribuído à redução da formação adicional de poros e à separação de fases das pastas cimentícias.

Palavras-chave: cimento baixo em carbono; redução de clínquer; materiais cimentícios complementares; aditivo acelerador.

ABSTRACT

Portland cement production represents about 7% of all CO₂ human emissions, where 63% of this amount results from the calcination, process required for the obtention of clinker, the binder's main component. To reduce the environmental impact caused by this compound, efforts have been made to decrease the clinker content in Portland cement. This trend can be observed in commercial cements worldwide, which may present high rates of clinker replacement by mineral additions, such as granulated blast furnace slag, fly ash and calcined clays. Despite the environmental advantage, this component's reduction can modify cement properties delaying the hydration reactions and decreasing early age strength. Therefore, the addition of calcium silicate hydrate (C-S-H) seeds has been studied as a solution to mitigate the effects caused by the reduction of clinker in the composition of cements. The additive consists of artificial nanoparticles that promote the nucleation and dispersion of clinker grains, leading to an acceleration of the setting time and an increase in mechanical strength in the early ages of cementitious materials. Within this context, it was proposed to study the effect of the addition of different levels of C-S-H seeds additive on the performance of cement pastes composed of cements with a reduced amount of clinker. For this, tests were carried out to assess setting time, viscosity, calorimetry, mechanical strength (compression and flexural tensile), static modulus of elasticity and drying shrinkage. In this work, it was evaluated the properties in the fresh and hardened states of pastes composed of CP III and CP IV cements with 0; 1.0; 1.5; 2.0% of C-S-H seeds in relation to the binder mass, in addition to the content of 3.0%, which exceeds the saturation point of this additive. Due to the presence of a dispersant in the composition of the commercial C-S-H seed additive, the joint use of complementary additives (defoamer and stabiliser) is recommended by the manufacturer as well as by studies in the literature. Therefore, compositions with the highest content of C-S-H seed additive, within the manufacturer's recommended range of 2.0%, in the presence of complementary additives, were further evaluated in this study. To better understand the formation of chemical compounds formed by presence of the additive, Scanning Electron Microscope (SEM) images of cement pastes were evaluated. In addition, an evaluation of the acid attack (EDTA) response was carried out in order to verify possible interactions between the additive and the mineral additions contained in the cements. Through the experimental programme conducted, the effectiveness of the presence of C-S-H seed additives in cement pastes with reduced clinker content was verified. The acceleration of the setting time, the anticipation of the temperature peak during hydration and the increase in initial mechanical strength of the samples were observed. In the research, the interaction of the additive with the mineral additions of blast furnace slag was also evidenced, generating an increase in the mechanical strength at all ages evaluated. Finally, it was possible to verify the increase of the C-S-H seed additive's action in the presence of complementary additives. The gain in flexural tensile strength and reduction in drying shrinkage for these compositions was attributed to the reduction in additional pore formation and phase separation of the cement pastes.

Key-words: low carbon cement; clinker reduction; supplementary cementitious materials; accelerator additive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – AVANÇOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	27
FIGURA 2 – COMPOSIÇÃO E TIPO DE REAÇÃO QUÍMICA DOS MCS MAIS COMUNS..	36
FIGURA 3 – LIMITES DE COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (PORCENTAGEM DE MASSA) CONFORME A NBR 16697	38
FIGURA 4 – REDUÇÃO GRADUAL DO FATOR CLÍNQUER/CIMENTO	38
FIGURA 5 – HIDRATAÇÃO INICIAL EM CIMENTO COMUM, COM NANO SÍLICA E COM C-S-H.....	42
FIGURA 6 – MEV PASTA CIMENTÍCIA COM 0,75% DE SEMENTES DE C-S-H	43
FIGURA 7 – FORMAÇÃO DE HIDRATOS ENTRE OS GRÃOS DE CIMENTO	43
FIGURA 8 – MECANISMO DE ATUAÇÃO DAS SEMENTES DE C-S-H.....	44
FIGURA 9 – REDUÇÃO DA CAMADA DE INIBIÇÃO AO REDOR DOS GRÃOS DE CLÍNQUER.....	44
FIGURA 10 – CALOR DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE C-S-H....	48
FIGURA 11 – CALOR DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO DE C-S-H.....	48
FIGURA 12 – RESISTÊNCIAS MECÂNICAS EM ARGAMASSAS COM ESCÓRIA E ADITIVO C-S-H	52
FIGURA 13 – PERFIL DA CURVA CARACTERÍSTICA DE CALORIMETRIA	57
FIGURA 14 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA PASTAS APENAS COM ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H.	70
FIGURA 15 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	70
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS.....	72
FIGURA 17 – ENSAIO DE TEMPOS DE PEGA.....	79
FIGURA 18 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE CALORIMETRIA	79
FIGURA 19 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE VISCOSIDADE.....	81
FIGURA 20 – PRENSA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	82
FIGURA 21 – CURVAS RESULTANTES DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	83
FIGURA 22 - TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	89
FIGURA 23 - TEMPO DE FIM DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS.....	89
FIGURA 24 – CURVAS DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III.....	92
FIGURA 25 – CURVAS DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV	92

FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE TEMPERATURA DOS CIMENTOS CP III E CP IV	94
FIGURA 27 – VISCOSIDADE DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	97
FIGURA 28 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	100
FIGURA 29 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	103
FIGURA 30 – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS ...	106
FIGURA 31 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS.....	107
FIGURA 32 – QUANTIDADE DE ESCÓRIA REAGIDA NAS PASTAS DE CIMENTO CP III	110
FIGURA 33 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III DE REFERÊNCIA E COM 2,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE.....	111
FIGURA 34 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III COM 2,0 E 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE.....	112
FIGURA 35 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV COM 2,0 E 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE.....	112
FIGURA 36 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV DE REFERÊNCIA E COM 2,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 91 DIAS DE IDADE.....	113
FIGURA 37 – MICROSCOPIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS COM 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE	114
FIGURA 38 – TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	115
FIGURA 39 – TEMPO DE FIM DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	116
FIGURA 40 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	118
FIGURA 41 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	120
FIGURA 42 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DOSAGENS DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM SEMENTES DE C-S-H UTILIZADAS NA LITERATURA.....	49
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES QUÍMICAS DOS CIMENTOS.....	71
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS	71
TABELA 4 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H	72
TABELA 5 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO ANTIESPUMANTE.....	73
TABELA 6 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO ESTABILIZADOR	73
TABELA 7 – COMPOSIÇÕES DAS PASTAS CIMENTÍCIAS ESTUDADAS	75
TABELA 8 – COMPOSIÇÕES DAS PASTAS CIMENTÍCIAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	76
TABELA 9 – LABORATÓRIOS PARA REALIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL ..	77
TABELA 10 – RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	77
TABELA 11 – ENSAIOS REPETIDOS PARA AS PASTAS ADICIONAIS	78
TABELA 12 – TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS.....	86
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DE TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	87
TABELA 14 – TEMPERATURAS ATINGIDAS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO	90
TABELA 15 – VISCOSIDADE MÉDIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	95
TABELA 16 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	98
TABELA 17 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	100
TABELA 18 – RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	102
TABELA 19 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	104
TABELA 20 – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO MÉDIO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS.....	105
TABELA 21 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	106
TABELA 22 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS	107
TABELA 23 – QUANTIDADE DE ESCÓRIA REAGIDA	109
TABELA 24 – TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	115

TABELA 25 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	117
TABELA 26 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	117
TABELA 27 – RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	119
TABELA 28 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	119
TABELA 29 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	121

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Resultados de tempo de pega obtidos por trabalhos anteriores.....	56
QUADRO 2 – Resultados de resistência à compressão obtidos por trabalhos anteriores	63
QUADRO 3 – Potencial do uso de aditivo de sementes de C-S-H com teores dentro da faixa de recomendação (até 2,0%).....	124
QUADRO 4 – Influência do teor de extrapolação de aditivo de sementes de C-S-H (3,0%)	125
QUADRO 5 - Resultados referentes às pastas com aditivos complementares	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ASE – Área Superficial Específica

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CCA – Cinzas de Casca de Arroz

CCUS – Captura e Uso ou Estocagem de Carbono

CEM – Centro de Microscopia Eletrônica

CP – Cimento Portland

CPC – Cimento Portland Comum

C/S – Relação Entre Cálcio (Ca) e Silício (Si)

CV – Cinzas Volantes

CV-C – Cinzas Volantes tipo C

CV-F – Cinzas Volantes tipo F

CVOP – Cinzas Volantes de Óleo de Palma

DCC – Departamento de Construção Civil

EDTA – Ácido Etilenodiamino Tetra-Acético

EGAF – Escórias Granuladas de Alto Forno

GCCA – Associação Global de Cimento e Concreto

IEA – *International Energy Agency*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

KIT – *Karlsruhe Institute of Technology*

LABPPAM – Laboratório de Processos e Projetos Ambientais

LaME – Laboratório de Materiais e Estruturas

LAMP – Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira

MC – Metacaulim

MCS – Materiais Cimentícios Suplementares

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma do Mercosul

ONU – Organização das Nações Unidas

SA – Sílica Ativa

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2 JUSTIFICATIVAS	22
1.2.1 Justificativa ambiental	22
1.2.2 Justificativa tecnológica	23
1.2.3 Justificativa socioeconômica	24
1.3 OBJETIVO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 PANORAMA AMBIENTAL ATUAL DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	26
2.1.1 Ações de redução do impacto ambiental no setor	29
2.2 A REDUÇÃO DO TEOR DE CLÍNQUER NA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E SUA CONSEQUÊNCIA NO DESEMPENHO DO MATERIAL	32
2.2.1 Influência da composição do cimento em suas propriedades no estado fresco e endurecido	33
2.2.2 Consequências da redução do teor de clínquer no desempenho do cimento Portland	34
2.2.3 O uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) na redução do teor de clínquer	35
2.3 TECNOLOGIA DE SEMENTES DE C-S-H (<i>C-S-H SEEDS</i>)	39
2.3.1 Mecanismo de atuação	41
2.3.2 Fatores de influência na efetividade do aditivo	46
2.3.3 Efeitos no desempenho de pastas cimentícias no estado fresco	54
2.3.4 Efeitos no desempenho de pastas cimentícias no estado endurecido	60
2.4 CONCLUSÕES SOBRE A ABORDAGEM BIBLIOGRÁFICA	67
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1 MATERIAIS	71
3.1.1 Cimentos	71
3.1.2 Aditivo de sementes de C-S-H	72
3.1.3 Aditivo complementares	73
3.2 MÉTODO	73
3.2.1 Formulações avaliadas	73
3.2.2 Procedimento de mistura das pastas cimentícias	76
3.2.3. Resumo do Programa Experimental	76

3.2.4 Desempenho da pasta cimentícia no estado fresco.....	78
3.2.5 Desempenho da pasta cimentícia no estado endurecido.....	81
3.2.6. Análise química da pasta em estado endurecido	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
4.1 TEMPO DE PEGA.....	86
4.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO	90
4.3 VISCOSIDADE.....	95
4.4 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	97
4.4.1 Resistência à Compressão	97
4.4.2 Resistência à Tração na Flexão	102
4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	105
4.6 RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	106
4.7 QUANTIFICAÇÃO DE ESCÓRIA REAGIDA.....	109
4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	110
4.9 COMPOSIÇÕES ADICIONAIS.....	114
4.9.1 Tempo de pega	115
4.9.2 Resistências mecânicas.....	116
4.9.3 Retração por secagem	121
4.10 VANTAGENS TRAZIDAS PELO USO DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H	123
5 CONCLUSÕES.....	129
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS	134
APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA	145
APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE FIM DE PEGA....	146
APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VISCOSIDADES	147
APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO	148
APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	150
APÊNDICE F – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA DAS PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES	152
APÊNDICE G – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES.....	153

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA

O impacto ambiental causado pela geração de gases poluentes pela indústria cimenteira, principalmente durante a etapa de calcinação, representa uma parcela significativa do total mundial. De acordo com o banco de dados do GNR Project (WBCSD, 2016), a produção mundial de cimento foi responsável por cerca de 7% da emissão total desse gás produzida pelo homem.

A otimização de processos fabris e a redução de clínquer na composição do cimento já vêm sendo empregadas dentro da indústria, o que contribui para uma redução do impacto causado pelo material. Conforme levantado pela Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA, na sigla em inglês), a indústria de cimento apresentou uma redução de quase 23% nas emissões de CO₂ por tonelada de cimento no intervalo dos anos de 1990 a 2021 (GCCA, 2023).

Os esforços para a redução da geração desse gás ainda precisam ser mais intensos, conforme concordado no Pacto Climático de Glasgow, formulado em 2021 (ONU, 2022). Os países participantes do acordo, entre eles o Brasil, se comprometeram em estabelecer limites de emissão de gases poluentes até 2030 e atingir a marca de neutralidade de carbono até 2050, condição em que há um equilíbrio entre as emissões de CO₂ e a sua remoção da atmosfera. Para possibilitar esse cenário, torna-se necessário a tomada de medidas mais incisivas para, dentre outros, a redução da contribuição nesse aspecto representada pela indústria cimenteira.

Segundo o relatório *Roadmap Tecnológico do Cimento* (VISED & PECCHIO, 2019), o uso de adições minerais em substituição ao clínquer faz com que o Brasil tenha menores índices de emissão de CO₂ quando comparado ao resto do mundo, mesmo mantendo uma produção elevada de cimento. Isso ocorre por conta da grande parcela nas emissões representada pelo processo necessário para a obtenção de clínquer. Apenas a calcinação, onde há a transformação de carbonato de cálcio em óxido de carbono, representa cerca de dois terços de toda geração de CO₂ durante a produção do cimento. Durante tal etapa, grandes quantidades de dióxido de carbono são emitidas devido às altas temperaturas utilizadas e ao

processo químico de descarbonatação do calcário (MEHTA & MONTEIRO, 2014; BENHELAL, 2021).

Ainda assim, a NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece teores máximos de adições em substituição ao clínquer na composição do aglomerante, diante das possíveis alterações causadas pelo menor teor do insumo na composição. Conforme observado por trabalhos como Lothenbach *et al.* (2011), Snellings (2016), Rashad (2018), Juenger *et al.* (2019) e Benhelal *et al.* (2021), o uso de adições em substituição ao clínquer pode reduzir a velocidade da reação de hidratação do cimento, implicando em atraso do tempo de pega e baixas resistências iniciais.

Essa perda de reatividade é motivada pela redução do clínquer e inserção de materiais com reduzida reação inicial, caso das adições minerais. De acordo com a literatura, esses efeitos são motivados pela composição química, tamanho das partículas e a ocorrência de possíveis reações secundárias. Além disso, a reatividade também pode ser influenciada pela menor dissolução apresentada pelas adições minerais em soluções alcalinas. Tal reação pode ser até 4 vezes menor do que a apresentada pelo silicato tricálcico (C_3S), também chamado de Alita, e pelo silicato dicálcico (C_2S), Belita, principais componentes do clínquer (JUILLAND *et al.*, 2010; NICOLEAU *et al.*, 2013; SNELLINGS, 2013; JUENGER *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2021).

Diante dessa problemática, busca-se possibilitar a redução do teor de clínquer a partir do emprego de materiais que compensem as alterações no desempenho inicial apresentado pelas pastas, ocasionadas por essa redução. Nesse contexto, surge a tecnologia de adição de sementes externas em pastas cimentícias (*seeding*), que consiste na inserção de núcleos externos, de dimensões nanométricas, que aceleram os processos químicos do cimento (SZOSTAK & GOLEWSKI, 2020; PEDROSA *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021). Dessa forma, é possível acelerar as reações de hidratação do ligante, promovendo diminuição do tempo de pega e maiores resistências iniciais, mesmo com redução no teor de clínquer.

Assim como levantado por Szostak e Golewski (2020) e Wang *et al.* (2021), as sementes de C-S-H, que consistem em núcleos sintéticos de silicato de cálcio hidratado, são apontadas como materiais promissores utilizados por essa tecnologia. Sua efetividade deve-se à composição química dessas partículas, que gera maior estímulo à precipitação de hidratos durante a reação do cimento (NICOLEAU, 2011;

OUYANG *et al.*, 2017; e JOHN *et al.*, 2018). O principal mecanismo de atuação desse material é a nucleação, regida por sua alta área superficial específica (ASE), que estimula a formação precoce de produtos de hidratação do cimento. Esse fenômeno, de nucleação, atua através da separação tanto dos grãos de clínquer quanto das adições, otimizando o contato da superfície dos materiais com a água, acelerando sua reação como visto por Land e Stephan (2012) John *et al.* (2019), Li *et al.* (2020) e outros autores.

Ainda, o aumento da dispersão das partículas gerado pela nucleação proporciona uma maior área para a precipitação dos hidratos, tendo em vista a maior área superficial específica disponível, contribuindo dessa forma com a redução da espessura da camada de produtos formada ao redor dos grãos de clínquer, chamada por alguns autores de camada de inibição. Essa película dificulta o contato da água com o núcleo do grão de clínquer, portanto, quanto maior sua espessura, maior é o atraso gerado na hidratação do cimento (LAND & STEPHAN, 2015; HE & LIAO, 2021; WANG *et al.*, 2021; JOHN, 2022). Assim, a adição desse material contribuirá para a aceleração da hidratação do cimento, levando à redução dos tempos de pega e aumento das resistências iniciais, conforme Wang *et al.* (2020) e Pizon *et al.* (2022). Por isso, a solução torna-se interessante para a compensação dos efeitos causados pela redução do clínquer e sua substituição por adições minerais.

De forma a otimizar o efeito gerado pela adição das sementes de C-S-H em compostos cimentícios, alguns trabalhos e fabricantes do produto indicam a combinação de tal material com o emprego de outros aditivos, como antiespumantes e estabilizadores. O uso de tais produtos pode ser observado em pesquisas como Kanchanason e Plank (2019), Pedrosa *et al.* (2020) e Li *et al.* (2022). Entretanto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito do aditivo comercial de sementes de C-S-H isoladamente, sem adição de outros produtos químicos, o que poderia mascarar ou gerar sobreposição de efeitos com relação ao material de interesse desta pesquisa.

Diante disso, avaliou-se no presente trabalho o efeito da adição de aditivo de sementes de C-S-H no desempenho de pastas cimentícias, nos estados fresco e endurecido, compostas por cimentos comerciais tipo CPIII e CPIV, que apresentam reduzido teor de clínquer.

1.2 JUSTIFICATIVAS

1.2.1 Justificativa ambiental

As mudanças climáticas já sentidas globalmente pressionam a sociedade a tomar medidas mais rápidas e incisivas, como é apresentado e discutido regularmente pela Organização das Nações Unidas (ONU). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) aponta em seu último relatório “*Sixth Assessment Report (AR6)*”, publicado em 2022, o setor da construção civil como uma das áreas-chave para a mitigação das mudanças climáticas. Apesar de avanços ambientais causados pela indústria do cimento, a sua contribuição no total de emissão de gases poluentes ainda é expressiva. Relatórios, como o elaborado Visedo e Pecchio (2019), e trabalhos científicos, como Benhelal *et al.* (2021) apresentam como solução a redução gradual do teor de clínquer na composição do cimento, através de sua substituição por materiais que representem menor impacto ambiental. O clínquer, responsável por aproximadamente 63% das emissões geradas durante a produção do ligante, pode ser substituído por resíduos industriais, como materiais pozolânicos e escórias.

O uso de rejeitos em substituição ao clínquer torna essa solução ainda mais interessante do ponto de vista ambiental, sendo necessário apenas uma compensação do atraso de reação gerado. Para isso, emprega-se as sementes de C-S-H, materiais não tóxicos e produzidos artificialmente que proporcionam a aceleração da reação do cimento, mesmo adicionadas em quantidades reduzidas (LAND & STEPHAN, 2015; JOHN *et al.*, 2019). Como comprovado por Li *et al.* (2020), o impacto ambiental gerado por esse aditivo é considerado irrelevante, quando comparado ao do cimento Portland, por conta do seu baixo teor de adição aliado ao seu efeito no desempenho das pastas cimentícias.

No trabalho de Li *et al.* (2020), os autores desenvolveram uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da produção à utilização em pastas cimentícias de ambos os produtos, o cimento comum e o C₃S, precursor do aditivo de sementes de C-S-H. Para tanto, considerou-se o consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa gerados no ciclo de vida analisado de cada produto. De acordo com o estudo, os valores referentes a esses parâmetros gerados pelo C₃S são similares aos do cimento na fase de aplicação para obtenção de pastas cimentícias. Observou-se ainda que as

emissões ligadas ao C_3S são até superiores às do aglomerante tradicional ao comparar-se o valor gerado por quilo produzido de cada um desses materiais.

Entretanto, a vantagem ambiental do uso do aditivo é salientada ao comparar-se a ecoeficiência de pastas com e sem as sementes de C-S-H em função de sua resistência mecânica alcançada ao longo do tempo. Utilizando esse método de análise, os autores encontraram redução de até 30% na intensidade de CO_2 -eq (CO_2 equivalente) por MPa alcançado para os compostos aditivados ao final de 28 dias. Justifica-se essa melhora no desempenho ambiental através da baixa quantidade de aditivo necessária para melhorar as resistências do material cimentício. Assim, os autores concluem que, apesar de apresentar valores de emissão comparáveis aos do cimento no processo produtivo, o baixo teor e o beneficiamento do desempenho proporcionada à composição, tornam o impacto causado pelo aditivo irrisório, fazendo com que seu uso seja ambientalmente interessante.

1.2.2 Justificativa tecnológica

Ainda que o cimento atenda aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), se tem notado alterações no seu comportamento, motivadas pela redução do teor de clínquer em sua composição (LOTHENBACH *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2021). A substituição desse componente por adições minerais pode gerar uma redução da reatividade do cimento, observada através dos tempos de início e fim de pega e calor de hidratação, e de suas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e aderência, assim como ressaltado em Szostak e Golewski (2020), Z. Zhou *et al.* (2021) e Pizon *et al.* (2022).

Conforme retomado por Wang *et al.* (2021), a redução do teor de clínquer conduz à formação de uma menor quantidade de hidratos durante a reação de hidratação do cimento, responsáveis pelas propriedades desejadas ao material. O menor teor de clínquer na composição do cimento pode gerar materiais menos reativos, comprometendo suas propriedades nas idades iniciais (DE LA VARGA *et al.*, 2018; KANCHANASON & PLANK, 2019). Em contrapartida, de acordo com Das *et al.* (2020) e F. Zhou *et al.* (2021), a demanda por materiais cimentícios de alta resistência inicial tem aumentado progressivamente, enquanto cresce a pressão por redução do teor de clínquer. Diante disso, torna-se necessária a utilização de meios para

possibilitar a mitigação do efeito da redução de clínquer no desempenho em idades iniciais de compostos cimentícios.

Uma solução estudada é a incorporação de partículas externas no material, utilizadas com a intenção de acelerar a reação de hidratação do cimento. Para tanto, a efetividade da ação de diferentes compostos, como cloreto de cálcio, nitrato de cálcio, nitrato de sódio, formiato de cálcio e formiato de sódio, foi avaliada. Dentre as alternativas estudadas, as chamadas sementes de C-S-H se apresentam como material efetivo para gerar tal aceleração. De acordo com Szostak e Golewski (2020) e Wang *et al.* (2021) sua ação é mais efetiva e rápida do que outras soluções estudadas anteriormente. Assim, a adição de sementes de C-S-H, fabricadas a partir de insumos disponíveis na natureza, apresenta-se como a alternativa com maior potencial para acelerar a hidratação de cimentos compostos com baixo teor de clínquer e com adição mineral.

1.2.3 Justificativa socioeconômica

Apesar de representar um custo adicional ao composto cimentício e ter um preço relativamente elevado, o aditivo de sementes de C-S-H é utilizado em baixas quantidades (valores de até 2,0% com relação à massa de cimento utilizados na grande parte das pesquisas), o que ameniza o acréscimo de custo gerado por seu emprego. Além disso, a inserção de tal aditivo contribui para a utilização de adições minerais na composição cimentícia. Tais materiais provêm de resíduos industriais e apresentam menor valor agregado quando comparados ao clínquer, o que leva a uma redução do custo final da composição, assim como salientado por Benhelal *et al.* (2021).

Além de mais eficazes, Land e Stephan (2015) e John *et al.* (2019) ainda ressaltam que as sementes de C-S-H podem ser fabricadas a partir de precursores de baixo custo e não tóxicos. O aditivo apresenta, dessa forma, vantagens econômicas e sociais.

O custo do material também pode ser justificado ao analisar o contexto ambiental já explicado. O fato de existir a necessidade imediata de amenizar os impactos gerados pelo cimento por si só já compensaria um possível aumento do preço do ligante. Há aliado a isso, entretanto, a possibilidade cada vez mais evidente da precificação das emissões de carbono, como discutido em reuniões da ONU e

levantado pelas entidades Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

1.3 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adição de aditivo de sementes de C-S-H no desempenho de pastas cimentícias, nos estados fresco (tempo de pega, calorimetria e viscosidade) e endurecido (resistências mecânicas, módulo de elasticidade estático, quantificação de escória reagida e imagens por microscopia eletrônica de varredura), compostas por cimentos comerciais tipo CPIII e CPIV, que apresentam reduzido teor de clínquer.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreensão do contexto em que a presente pesquisa está inserida, a revisão bibliográfica contempla os principais pontos do panorama ambiental atual da indústria cimenteira, soluções e alternativas para redução do impacto por ela gerado e introdução à tecnologia de sementes de C-S-H, principal interesse de estudo deste trabalho.

2.1 PANORAMA AMBIENTAL ATUAL DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

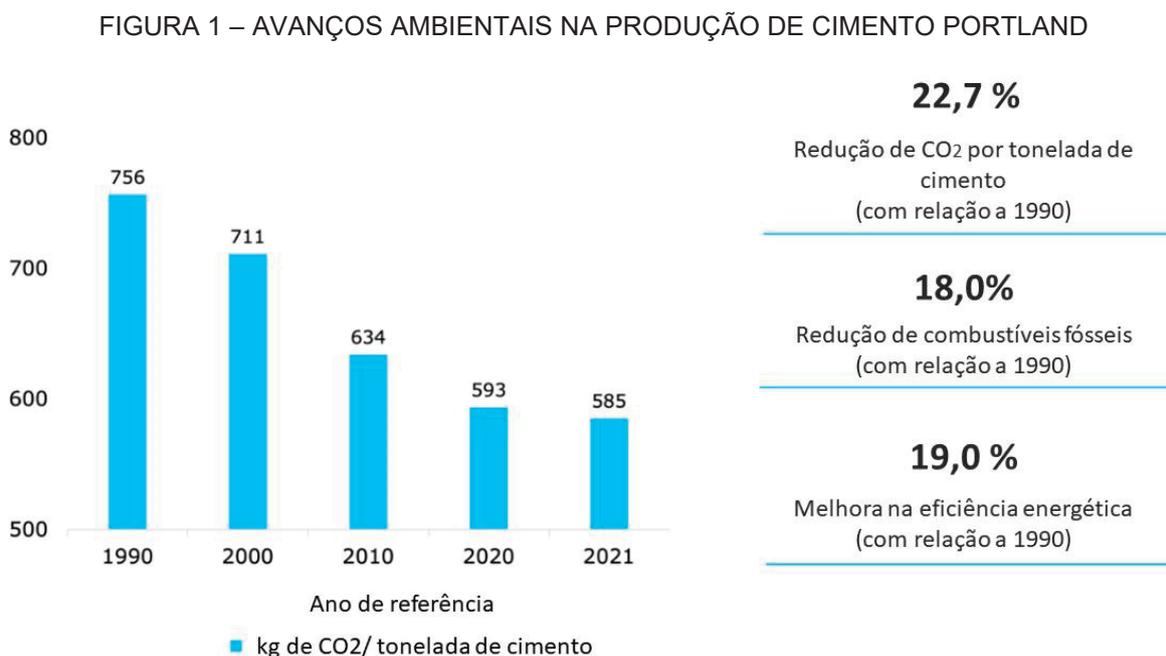
As atividades da construção civil são responsáveis pela geração de volume expressivo de gases poluentes. Em um dos documentos que fazem parte do relatório “*Sixth Assessment Report (AR6)*”, o IPCC apresenta em “*Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*” (IPCC, 2022) o potencial de mitigação de emissão de gases poluentes dentro do setor da construção civil. De acordo com órgão, uma das ações-chave para possibilitar tal realização seria a descarbonização de estruturas. De acordo com o relatório “*2021 Global Status Report for Buildings and Construction*” (United Nations Environment Programme, 2021), a parcela de atividades destinada à construção de edificações foi responsável por 37% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia no ano de 2020.

Mais especificamente, registrou-se em 2018 uma produção de 4083 milhões de toneladas do ligante, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês). Tal valor representou 7% de toda emissão global de CO₂ nesse período (WBCSD, 2016; IEA, 2023). Já no ano de 2021, foram produzidas 4374 milhões de toneladas do ligante, com índice de geração de 585 quilogramas de dióxido de carbono por tonelada de cimento (IEA, 2023; GCCA, 2023).

Como alternativa para reduzir o impacto causado pelo ligante, possíveis alterações na produção e composição do cimento Portland foram levantadas. O relatório *Roadmap Tecnológico do Cimento* (VISED & PECCHIO, 2019) apresenta o potencial de redução de 33% das emissões de gás carbônico da indústria cimenteira brasileira até 2050. A proposta do documento é evitar o cenário de incremento de 6 °C na temperatura média global, que ocorreria caso os números atuais fossem mantidos. Em vez disso, propõem-se limitar esse valor em 2 °C até 2050. Para isso, quatro soluções principais são enumeradas: redução do teor de clínquer no cimento

através do uso de adições minerais; substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis; otimização da energia utilizada ao longo do processo produtivo do cimento; e investimento em pesquisas e novas tecnologias, como a Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS).

De acordo com Benhelal *et al.* (2021), a indústria cimenteira tem tomado as atitudes econômica e tecnicamente viáveis. Essa postura é notada nos números mostrados em “*GNR 2.0 – GCCA in Numbers*” (GCCA, 2023), relatório elaborado pela Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA) referente ao ano de 2021. O grupo expõe o avanço conquistado pelo setor desde o ano de 1990, mostrando melhoras na cadeia produtiva das indústrias cimenteiras. Ressalta-se a redução de quase 23% na emissão de CO₂ por tonelada de cimento, além da redução de 18,0% do uso de combustíveis fósseis, substituídos por alternativas renováveis, e a melhora de 19,0% na eficiência energética ao longo do processo de produção do ligante. Essas informações são mostradas na Figura 1:



FONTE: Adaptada de GCCA (2023).

Apesar dos avanços alcançados pelo setor, constatou-se na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2021 (ONU, 2022), ocorrida na cidade de Glasgow, que as medidas tomadas mundialmente ainda não são suficientes. Esse evento teve como objetivo principal reafirmar e endurecer os

compromissos assumidos no Acordo de Paris (ONU, 2015). De acordo com as discussões nele levantadas, a queda nas emissões de gases de efeito estufa ainda estão longe do necessário para preservar um clima adequado para a manutenção da vida no planeta (ONU, 2022).

Dessa forma, os países que participaram do acordo assinado ao fim do evento, o Pacto Climático de Glasgow, reiteraram seu compromisso de manter o teto de aumento da temperatura média mundial em 2 °C. Ainda assim, com a rapidez que as consequências das mudanças climáticas vêm sendo sentidas nos últimos anos, os integrantes do documento concordaram em buscar alternativas para reduzir esse valor para apenas 1,5 °C. Para isso, acordou-se ser necessário, dentre outras ações, gerar medidas que proporcionem uma redução de 45% nas emissões de CO₂ até o ano de 2030. Além disso, os integrantes se comprometem a, até 2050, atingir a marca denominada de carbono zero, em que a emissão é a mínima possível e seus valores são compensados através de medidas especificadas no documento (ONU, 2022).

A posição mundial assumida em 2021 foi reforçada em 2022, durante a 27ª sessão da Conferência das Partes (COP27), organizada pelo Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês). No evento, ocorrido em Sharm El Sheikh (Egito) entre os dias 6 e 20 de novembro de 2022, retomou-se a necessidade de ações mais ambiciosas para controle das mudanças climáticas, com maior controle das emissões de gases poluentes. Estabeleceu-se novos objetivos para manter o cenário 1,5 °C, em que se demonstrou necessário reduzir em 43% as emissões atuais de gases de efeito estufa até o ano de 2030 (UNFCCC, 2023).

O Brasil foi um dos países a assinar o Pacto Climático de Glasgow e, conseqüentemente, se comprometer a seguir as medidas nele determinadas. Tais comprometimentos foram reiterados através da participação ativa do país na COP27. Em concordância, entidades diretamente relacionadas à indústria cimenteira no Brasil, como o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), reiteraram a sua participação no cumprimento das medidas assumidas pelo país (SNIC, 2022; ABCP, 2022).

2.1.1 Ações de redução do impacto ambiental no setor

Devido ao elevado impacto ambiental representado pelo setor, se tem buscado soluções que melhorem os processos dentro da indústria cimenteira. Autores levantam alternativas para o setor relacionadas à melhora do processo produtivo, otimização do uso e tipo de combustíveis e energia, alterações da composição do cimento, alterações físicas e químicas do clínquer, investimento em novas tecnologias e incentivo às pesquisas relacionadas com o tema (BENHELAL *et al.*, 2012; SALAS *et al.*, 2016; UN ENVIRONMENT *et al.*, 2018; NASR *et al.*, 2020; BENHELAL *et al.*, 2021).

Percebe-se que dentro das medidas propostas encontram-se soluções que tangem a composição dos cimentos através da redução do teor de clínquer, foco de estudo do presente trabalho. Tais estratégias se tornaram foco das pesquisas atuais, visando a produção de ligantes, alternativos ao cimento Portland, que gerem menor emissão de CO₂, chamados de cimentos verdes (UN ENVIRONMENT *et al.*, 2018; NAQI & JANG, 2019; DANISH *et al.*, 2019).

Dentre os diferentes métodos para obtenção desses materiais, o ligante desenvolvido pelo instituto alemão *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT) é um exemplo de cimento verde, conforme ressaltado por Naqi e Jang (2019). Nesse caso, a propriedade cimentante é alcançada através da ativação de hidrosilicatos de cálcio, usando calcário, cinzas volantes e escórias como materiais base. Tal composição conta com menor teor de carbonatos, o que demanda menor energia para sua calcinação, contribuindo assim para menor emissão de gases poluentes durante sua produção (STEMMERMANN *et al.*, 2010; HABERT, 2014).

Outras soluções referentes a alterações na composição do ligante foram levantadas por Naqi e Jang (2019) e Danish *et al.* (2019), como: cimentos álcali ativados (PROVIS, 2014; PARK *et al.*, 2018); e cimentos ricos em belita, sulfoaluminato de cálcio e magnésio (GLASSER & ZHANG, 2001; LISKA *et al.*, 2008; JANG & LEE, 2016). Entretanto, apesar da existência e disponibilidade de ligantes alternativos ao cimento Portland, a redução de impacto gerado pelo setor ainda depende do emprego desse material. Conforme ressaltado por UN Environment *et al.* (2018), alterações na composição desse ligante conhecido apresentam maior nível de aceitação pelo mercado atual.

Nasr *et al.* (2020) focaram na alteração da composição dos materiais cimentícios para a promoção da ecoeficiência do setor. Os autores avaliaram o desempenho de argamassas compostas com resíduos, como mármore, porcelana e alvenaria, e apontaram a viabilidade do uso desses materiais, que podem até melhorar o desempenho das argamassas. Um exemplo de melhoria de propriedade gerada pelos resíduos foi obtido para o uso de mármore e porcelana aumentaram 4% a resistência à compressão das argamassas ensaiadas.

Já UN Environment *et al.* (2018) sugeriram o uso de alternativas ao cimento Portland comum, citando soluções como: cimentos compostos por clínquer de diferentes composições; substituição do clínquer por adições minerais; materiais álcali ativados; e compostos solo-cimento. Ao final do trabalho, os autores elencaram dois campos de alternativas para amplificar a redução de emissões de CO₂ na indústria do cimento: o uso mais eficiente do cimento Portland comum, ainda dominante no mercado; e o gradual aumento da substituição do clínquer por adições minerais de baixa emissão de CO₂. Essa conclusão vai de encontro ao que foi salientado por trabalhos como Salas *et al.* (2016), Visedo e Pecchio (2019) e Benhelal *et al.* (2021), que apontaram a substituição do clínquer como a alternativa mais econômica e tecnicamente viável.

Além da alteração na composição dos ligantes, Visedo e Pecchio (2019) apresentaram alguns avanços já realizados pela indústria brasileira, como a quase completa erradicação de fornos via úmida na indústria de cimento. De acordo com os autores, essa medida permitiu que o setor obtivesse uma redução térmica de 17% entre os anos de 1990 e 2014. Com relação à eficiência energética, os autores salientaram que apenas surgirão mudanças substanciais no parque industrial brasileiro a partir de 2030, prazo para a troca gradual de máquinas e equipamentos do processo produtivo. Essa alteração pode representar um acúmulo de 38Mt de CO₂ não emitidos até 2050.

Visando a otimização da quantidade de energia e combustível necessárias no processo de calcinação dos precursores do cimento, Benhelal *et al.* (2012) propuseram uma alteração nessa etapa. No trabalho, sugeriu-se uma nova configuração do calcinador, em que parte do CO₂ gerado ao longo do processo produtivo seria reciclado e utilizado para indiretamente gerar a calcinação dos insumos. Para tanto, a temperatura de 890 °C do calcinador seria mantida através de uma corrente de CO₂ aquecido pelo exaustor do forno utilizado no processo. Dessa

forma, os autores garantiram que até 90% de CaCO_3 e MgCO_3 seriam decompostos sem uso de combustível. Assim, comprovou-se a efetividade do emprego dessa nova configuração para proporcionar redução de energia e combustíveis necessários durante o processo de produção do aglomerante, assim como as emissões de CO_2 , NO_2 e SO_2 por ele geradas.

A substituição do uso de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como: resíduos oleosos; solventes; graxas; resíduos têxteis; resíduos plásticos; serragem; e resíduos de fábricas de papel, também é apontada como uma solução promissora em trabalhos como Salas *et al.* (2016), Visedo e Pecchio (2019) e Benhelal *et al.* (2021). Salas *et al.* (2016) ressaltaram que o uso de rejeitos como combustível alternativo aos combustíveis fósseis, utilizados durante o processo produtivo do cimento, reduz o impacto ambiental relacionado à indústria cimenteira, como também aos aterros sanitários.

Para o emprego seguro e efetivo de tais materiais, porém, Benhelal *et al.* (2021) citaram algumas barreiras a serem ultrapassadas, como: maior controle operacional requerido; possibilidade de alteração das propriedades do clínquer, gerada pela diferença de queima dos materiais utilizados como combustível; e o possível aumento de demanda energética nas indústrias de cimento, já que grande parte dos combustíveis alternativos apresentam menor calor liberado que a solução tradicional.

A Captura e Uso ou Estocagem de Carbono (CCUS) foi apresentada por Salas *et al.* (2016), IEA (2018) e Benhelal *et al.* (2021) como outra solução para redução do impacto ambiental causado pela indústria do cimento. Essa alternativa considera três etapas básicas: captura e separação de CO_2 na fonte emissora; transporte; e utilização em outros processos de produção. Apesar de apresentar grande potencial ambiental, os trabalhos citados apontam barreiras técnicas e econômicas que acabam por desincentivar sua implementação.

Outra ação para redução do impacto ambiental causado pelo cimento foi estudada em trabalhos como Lee e Kurtis (2010), Oltulu e Sahin (2011), Kong *et al.* (2012) e Adesina (2020). Os autores propuseram uma alteração na composição do cimento, com a redução do teor de clínquer sendo compensada através da inserção de nanopartículas. Conforme observado nas pesquisas citadas, tal medida resultou na otimização da hidratação do cimento, o que beneficiaria seu desempenho final, apesar do menor teor de clínquer em sua composição. Entretanto, alguns estudos

mostraram que tal inserção poderia levar a reações secundárias, como consumo de hidróxido de cálcio, o que afetaria o desempenho do material, como ressaltado por Adesina (2020).

Nesse contexto, inicia-se o estudo das chamadas sementes de C-S-H, que atuam na otimização da hidratação do cimento sem gerar produtos de reação secundários (THOMAS *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020; JOHN, 2022). De maneira similar, tais materiais seriam empregados em cimentos com teor de clínquer reduzido, com a finalidade de compensar os efeitos dessa ação, que será explorada a seguir.

2.2 A REDUÇÃO DO TEOR DE CLÍNQUER NA COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND E SUA CONSEQUÊNCIA NO DESEMPENHO DO MATERIAL

Considerando a emissão gerada em todo processo de produção, concluiu-se que a maneira mais efetiva de tornar o cimento mais sustentável seria a redução de clínquer em sua composição (SALAS *et al.*, 2016; IEA, 2023; BENHELAL *et al.*, 2021).

No relatório sobre o ligante, Visedo e Pecchio (2019) ressaltaram que, no Brasil, 63% de toda emissão de gases CO₂ ao longo da produção de cimento é gerada na calcinação, processo fundamental para obtenção do clínquer. A maior parcela de emissão do gás durante tal etapa deve-se à alta temperatura intrínseca ao processo (de até 1.450 °C) e à reação química por ele gerada, em que o calcário (CaCO₃) é decomposto em CaO, gerando cal através da liberação de grandes quantidades de CO₂ (MEHTA & MONTEIRO, 2014; BENHELAL *et al.*, 2021). Por isso, os autores apontaram como fundamental a alteração do fator clínquer/cimento para alcançar os objetivos propostos até 2050. Assim, recomendou-se a redução progressiva desse valor, passando de 68%, registrado em 2014, para 59% e 52% nos anos 2030 e 2050, respectivamente.

A solução da alteração da composição do cimento através da redução do teor de clínquer também foi defendida por trabalhos internacionais como John *et al.* (2018); Li *et al.* (2020); Onaizi *et al.* (2021); Pizon *et al.* (2022); dentre outros. Benhelal *et al.* (2021) ressaltaram que, além de contribuir para a diminuição da emissão de gases poluentes, essa medida ainda é sustentável e economicamente interessante para o caso do emprego de resíduos industriais em substituição ao clínquer.

2.2.1 Influência da composição do cimento em suas propriedades no estado fresco e endurecido

O cimento Portland comum tem como principal componente o clínquer, que pode representar mais de 95% de sua composição e é responsável por grande parte das propriedades do ligante. Além desse composto, o cimento pode apresentar entre 3 e 5% de gesso em sua constituição, adicionado com a intenção de retardar tempo de pega do material (BYE, 1999; MEHTA & MONTEIRO, 2014; VISEDO & PECCHIO, 2019).

A composição química do clínquer pode sofrer alterações em função da região, métodos de produção e procedência de seus constituintes. De maneira geral, esse material é composto por uma faixa de 45 a 70% de silicato tricálcico (C_3S), também chamado de Alita; 10 a 30% de silicato dicálcico (C_2S), Belita, 5 a 10% de aluminato tricálcico (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Desses materiais, a reação de hidratação mais rápida é sofrida pelos aluminatos, ou seja, pelo C_3A , que libera grande quantidade de calor (aproximadamente 870J/g), seguido pelo C_4AF , que apresenta um calor de hidratação na faixa de 420 J/g. Como resultado, será formada a etringita, produto de hidratação do cimento responsável pelo início de pega do cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015).

De forma a reduzir a velocidade de reação sofrida pelos aluminatos presentes no clínquer, o gesso é adicionado à composição do cimento. Esse efeito de retardamento é devido à velocidade de hidratação dos sulfatos componentes do gesso, que é ainda maior que a apresentada pelos aluminatos do clínquer (POTGIETER *et al.*, 2004; CAILLAHUA & MOURA, 2018). Desta forma, o primeiro composto a hidratar será o gesso, não mais o aluminato C_3A , levando a um retardamento no tempo de início de pega da pasta cimentícia. Neville (2015) reforçou que sem a presença do gesso, o contato do C_3A com a água geraria endurecimento imediato da pasta cimentícia. A efetividade desse efeito está ligada à composição e teor de adição do gesso, podendo ser avaliada através da quantidade de cristais de etringita formados nos primeiros momentos após contato da mistura com a água (BENSTED, 1980; ALTUN & SERT, 2004; CHANDARA *et al.*, 2009).

O próximo composto a hidratar será a Alita (C_3S) e por último a Belita (C_2S), silicatos presentes no clínquer que dão início ao desenvolvimento de resistências mecânicas do cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015). Ao hidratar, a

Alita libera uma quantidade de calor aproximada de 500 J/g, maior do que a liberada pela Belita, de 260 J/g, mas menor que a quantidade referente ao C₃A, conforme apontado por Neville (2015). Por isso, afirma-se que a Alita apresenta taxa de hidratação mediana, o que influencia a resistência inicial do material. Já a reação sofrida pela Belita é mais longa, podendo levar até 2 anos para atingir os valores alcançados pelo C₃S. Esses elementos formarão as estruturas de hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pelas resistências do cimento (NEWMAN & CHOO, 2003; MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Dessa forma, percebe-se que diferentes composições de clínquer podem influenciar o comportamento do material cimentício. Cimentos compostos por clínquer com maior teor de C₃A tendem a apresentar alto calor de hidratação e tempo de pega reduzido, da mesma forma que altos teores de C₃S proporcionam maiores resistências iniciais (TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2015; PIZON *et al.*, 2022).

2.2.2 Consequências da redução do teor de clínquer no desempenho do cimento Portland

Apesar de apresentar desvantagens ambientais, o uso de cimentos com elevados teores de clínquer, é frequente por conta de sua rápida reação após contato com a água, o que proporciona menor tempo de pega e alta resistência inicial (MEHTA & MONTEIRO, 2014; DAS *et al.*, 2020; F. ZHOU *et al.*, 2021). Essas características são almejadas por facilitar a produtividade da obra e possibilitar a fabricação de produtos especiais, como concretos para peças pré-moldadas, argamassas colantes e argamassas autonivelantes, conforme recomendado por fabricantes.

Por isso, a demanda por cimentos mais reativos tem aumentado, o que motiva pesquisadores a estudar alternativas que apresentem comportamento semelhante, conforme ressaltado por Yun *et al.* (2020) e Pizon *et al.* (2022). Nesses trabalhos buscou-se alcançar o desempenho de tais materiais para compostos cimentícios com reduzido teor de clínquer e adição de escória granulada de alto forno, estudada em uma faixa de adição de 20 a 65%, referente à massa de cimento. Para tanto, autores utilizaram-se de diferentes soluções, como por exemplo pela temperatura de cura dos materiais, como avaliado por Yun *et al.* (2020), ou pela adição de aditivos aceleradores, conforme estudado por Pizon *et al.* (2022).

Como os compostos do clínquer são diretamente ligados à formação de hidratos responsáveis pelo desenvolvimento de propriedades do cimento, a redução desse material causa alterações no desempenho desse aglomerante. Essas consequências podem afetar as resistências mecânicas, tempo de pega, porosidade, resistência à carbonatação e outras propriedades dos compostos cimentícios (TAYLOR, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2015). A adição de alguns materiais, porém, pode compensar algumas das alterações geradas pela redução das reações do clínquer. Estudos como Lothenbach *et al.* (2011), IEA (2023) e Benhelal *et al.* (2021) mencionam que materiais como cinzas volantes e escórias de alto forno podem melhorar o desempenho dos materiais cimentícios pelo aumento de resistências ao longo do tempo e aperfeiçoamento de parâmetros de durabilidade, como porosidade.

Por outro lado, os cimentos com substituição do teor de clínquer por adições como cinzas volantes e escórias tendem a apresentar um retardo na reação de hidratação, o que leva a um atraso no tempo de pega e necessidade de idades mais avançadas para atingir maiores resistências (LOTHENBACH *et al.*, 2011; SNELLINGS, 2016; BENHELAL *et al.*, 2021). Benhelal *et al.* (2021) realizaram um levantamento sobre o efeito do uso dos principais Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) em substituição ao clínquer na composição de cimentos citando cinzas volantes, escórias de alto forno e materiais carbonáticos. Os autores apresentam como principal desvantagem dos materiais indicados sua influência na reação de hidratação do cimento e a consequente redução da resistência inicial dos compostos cimentícios.

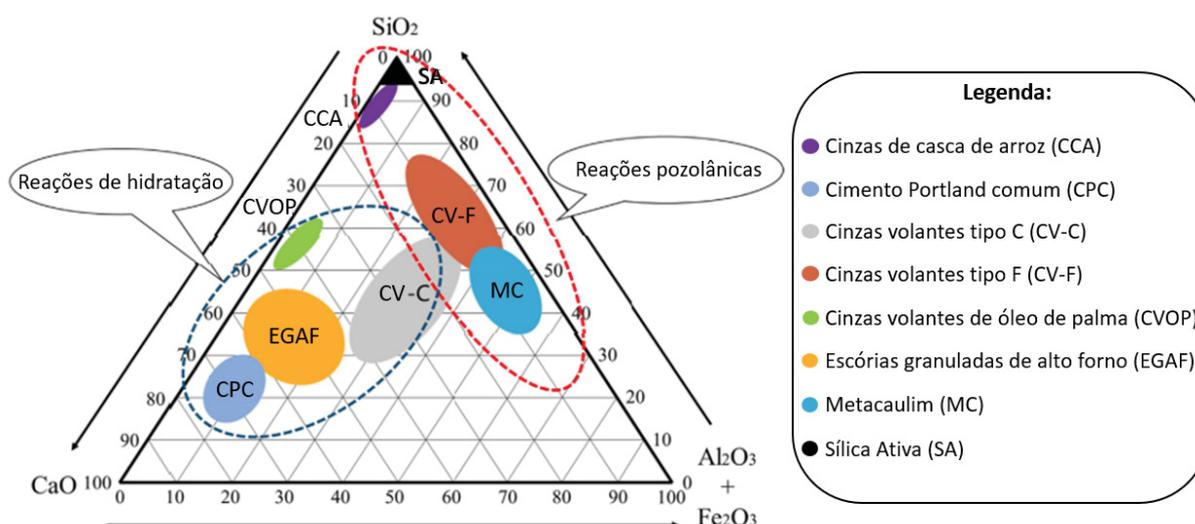
2.2.3 O uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) na redução do teor de clínquer

Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) são pós solúveis compostos por silicatos, aluminossilicatos e aluminossilicatos de cálcio que podem ser utilizados para substituição parcial do clínquer na composição de cimentos, conforme revisado por Juenger *et al.* (2019). No trabalho, levanta-se os principais materiais empregados para tal fim, como as cinzas volantes (CV) e escórias, como as escórias granuladas de alto forno (EGAF), por exemplo.

As cinzas volantes são resíduos de termelétricas, que podem ter sua composição química rica em sílica e alumínio (Si-Al), CV tipo F de acordo com a norma estadunidense C618 (ASTM, 2019), ou em cálcio (Si-Ca-Al, CV tipo C). Já as EGAF são compostas por sílica, cálcio e alumínio (Ca-Si-Al) e são rejeitos resultantes do processo de fabricação de ferro gusa, em siderúrgicas (SNELLINGS, 2016). Esses materiais podem ser utilizados na composição do cimento Portland, o que permite a redução do teor de clínquer, por conta de sua composição química e características físicas, como finura para o caso de cinzas volantes e escórias após processo de moagem (SNELLINGS, 2016; VISEDO & PECCHIO, 2019; JUENGER *et al.*, 2019; ONAIZI *et al.*, 2021). Dessa forma, os MCS vêm sendo utilizados cada vez com mais intensidade para esse fim, como visto no relatório IEA (2018).

Como já salientado por Lothenbach *et al.* (2011), a adição desses materiais no cimento resultará na simultaneidade da hidratação do clínquer e da reação hidráulica de adições. Os autores retomam ainda a possibilidade de interação entre as reações, assim como suas diferenças temporais, sendo o processo químico sofrido pelas adições minerais mais lento do que a hidratação do clínquer. Além disso, a diferente dinâmica das reações sofridas pelos materiais de substituição e pelo clínquer é devida à composição química desses insumos. Na Figura 2 é apresentado um esquema das características químicas e mecanismo de reação de alguns materiais utilizados em substituição ao clínquer em cimentos:

FIGURA 2 – COMPOSIÇÃO E TIPO DE REAÇÃO QUÍMICA DOS MCS MAIS COMUNS



FONTE: Adaptada de CHEN *et al.* (2021).

Observa-se que as adições minerais mais utilizadas apresentam menor teor de cálcio do que o cimento Portland comum. Como mostrado por Chen *et al.* (2021), materiais como metacaulim (MC); cinzas volantes tipo F (CV-F); cinzas de casca de arroz (CCA); e sílica ativa (SA) apresentam menores teores desse elemento, levando a um diferente tipo de processo, a reação pozolânica. Esse processo se diferencia do processo de hidratação sofrido pelos materiais com maior teor de cálcio por seu mecanismo e cinética de reação.

Após a hidratação do material cimentício, os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio formado durante o processo de hidratação do cimento, gerando novas estruturas de C-S-H (GLASSER *et al.*, 1999; SNELLINGS, 2016; SAMUI *et al.*, 2020). Tais hidratos serão diferentes dos formados em pastas de cimento Portland sem tais adições, assim como retomado por Lothenbach *et al.* (2011). Os autores estabelecem que o hidrato formado após a reação pozolânica apresenta uma menor relação Ca/Si, o que influenciará nas características e propriedades do hidrato. Como a reação pozolânica se dá a partir de produtos da hidratação do cimento, a velocidade do processo ocorre de forma mais lenta quando comparada ao processo de hidratação do cimento (DYER & DHIR, 2004; LOTHENBACH *et al.*, 2011; MEHTA & MONTEIRO, 2014; CHEN *et al.*, 2021).

Enquanto isso, mesmo apresentando menor quantidade cálcio quando comparadas ao cimento, as adições de escórias granuladas de alto forno (EGAF); cinzas volantes tipo C (CV-C) e de óleo de palma (CVOP) se aproximam mais da reação de hidratação sofrida pelo cimento Portland comum (CPC). Richardson (1999) destacou a importância dos teores de cálcio e sílica na composição dos insumos para a geração de gel C-S-H. Dessa forma, a diferença química dos MCS será responsável por alterar a dinâmica da hidratação do cimento, gerando atraso da reação, como citado por De La Varga *et al.* (2018), Kanchanason e Plank (2019), Szostak e Golewski (2020) e outros.

A inserção desses materiais em cimentos brasileiros já é regulamentada pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), que estipula limites de substituição parcial do clínquer por: escória granulada de alto forno; cinzas volantes; e materiais carbonáticos. De acordo com as especificações, os limites das adições minerais são os valores apresentados pela Figura 3:

FIGURA 3 – LIMITES DE COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (PORCENTAGEM DE MASSA) CONFORME A NBR 16697

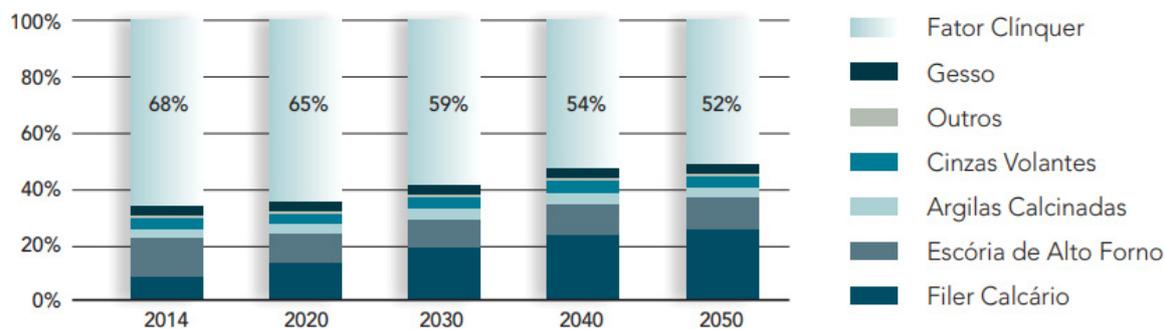
Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada 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 ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB		75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural			–	–	–	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

FONTE: ABNT (2018).

Visedo e Pecchio (2019) apontaram o aumento do uso de materiais carbonáticos, como o fíler de calcário, como ação ideal dada a possível diminuição da disponibilidade de outras adições minerais, conforme mostrado na Figura 4:

FIGURA 4 – REDUÇÃO GRADUAL DO FATOR CLÍNQUER/CIMENTO



FONTE: VISEDO & PECCHIO (2019).

Apesar disso, nota-se que os materiais mais utilizados para a substituição de clínquer ainda são as cinzas volantes e escórias de alto forno. É possível observar que os cimentos com maior teor de substituição de clínquer são os cimentos CP III e

CP IV, podendo alcançar valores de até 75 e 55%, respectivamente. Em contrapartida, o tipo de cimento brasileiro com o maior teor de clínquer é o cimento CP V, com até 100% de sua composição formada por clínquer.

2.3 TECNOLOGIA DE SEMENTES DE C-S-H (C-S-H SEEDS)

Com o intuito de amenizar as consequências nas propriedades do cimento Portland causadas pela redução de clínquer, tornou-se frequente o emprego de aditivos que atuam no desempenho inicial do material. De acordo com Szostak e Golewski (2020), o principal objetivo do uso desses insumos é a aceleração do tempo de pega e aumento das resistências mecânicas nas primeiras idades do cimento. Essas alterações podem ser alcançadas através da adição de materiais que geram condições propícias para maior formação inicial de gel C-S-H, sendo esse a principal fonte de resistência da matriz cimentícia, conforme já determinado anteriormente por autores como Mehta e Monteiro (2014) e ainda retomado em trabalhos recentes como em Wang *et al.* (2021).

Wang *et al.* (2020) citaram trabalhos como Lee e Kurtis (2010), Oltulu e Sahin (2011) e Kong *et al.* (2012) para elencar os principais compostos anteriormente empregados para otimizar o processo de hidratação do cimento. Alguns destes materiais são: SiO_2 ; TiO_2 ; Al_2O_3 ; Fe_2O_3 ; e CaCO_3 . Outros compostos como cloreto de cálcio, nitrato de cálcio, nitrato de sódio, formiato de cálcio e formiato de sódio são levantados por Szostak e Golewski (2020). De maneira semelhante, resultados promissores foram obtidos em estudos como Morsy *et al.* (2011), Jalal *et al.* (2012) e Adesina (2020) através da aplicação de nanomateriais, ou seja, materiais na faixa entre 1 e 100 nanômetros (SOBOLEV, 2015), em pastas cimentícias.

Como visto nas pesquisas citadas, pequenas quantidades desse tipo de material são suficientes para proporcionar uma melhora no desempenho do cimento. Adesina (2020) explicou a efetividade desses insumos através de seu mecanismo de atuação, destacando a reação entre os nanomateriais com o hidróxido de cálcio, presente no cimento. Essa interação leva a associação do efeito de preenchimento de poros com a formação de uma quantidade adicional de gel C-S-H nos primeiros momentos após contato com a água.

Nesse contexto, foi introduzida tecnologia de adição de sementes externas em pastas cimentícias (*seeding*) que, de acordo com Wang *et al.* (2020), consiste na

inserção de núcleos externos no sistema de hidratação do cimento. Uma das alternativas de material para esse fim, são as chamadas sementes de C-S-H, nanopartículas de cristais de silicato de cálcio hidratado, obtidas de forma sintética (SZOSTAK & GOLEWSKI, 2020; PEDROSA *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021).

Conforme estudado por Szostak e Golewski (2020), as sementes de C-S-H consistem em cristais de diâmetros nanométricos de formato coloidal. Atribui-se à alta área superficial específica (ASE) desses materiais sua capacidade de acelerar o processo de hidratação do cimento, proporcionando aceleração da pega e ganho de resistência mecânica inicial (BRÄU *et al.*, 2012; PEDROSA *et al.*, 2020; JOHN, 2022). Assim como levantado por Wang *et al.* (2021), esse tipo de material pode ser obtido a partir de métodos sintéticos como: reações pozolânicas (JOHN *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2021); coprecipitação de silicatos alcalinos e sais cálcicos (KANCHANASON & PLANK, 2019; XU *et al.*, 2020; Z. ZHOU *et al.*, 2021); e hidratação dos compostos C_2S ou C_3S (LI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020). Além dessas, encontra-se na literatura processos mecanicoquímicos, através da mistura de silicatos e soluções alcalinas e sua posterior moagem (LAND & STEPHAN, 2018; WANG *et al.*, 2019) e métodos de síntese do gel C-S-H através de precursores metalorgânicos, como o etóxido de cálcio (LAND & STEPHAN, 2018; WANG *et al.*, 2020).

Existem trabalhos que também aliam as sementes de C-S-H com éter policarboxilato (PCE) de forma a contribuir com a dispersão de partículas e facilitar o manuseio das misturas (KANCHANASON & PLANK, 2015; PIZON *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2017; KANCHANASON & PLANK, 2018; LI *et al.*, 2022). Conforme retomado por Kanchanason e Plank (2019), a obtenção deste tipo de aditivo pode se dar através da precipitação de $Ca(NO_3)_2$ e Na_2SiO_3 em solução aquosa de PCE. Assim como utilizado nas pesquisas citadas, a presença do PCE também é usual na composição de aditivos comerciais de sementes de C-S-H, como é o caso do produto utilizado no presente estudo. Nesses casos, indica-se o uso conjunto de aditivos complementares, ou seja, aditivos antiespumante e estabilizador. O uso de tais produtos é indicado com o fim de compensar a formação de vazios gerada pelo aditivo comercial de sementes de C-S-H e de tornar a pasta cimentícia mais estável, evitando o fenômeno de exsudação no material (NICOLEAU, 2011; LI *et al.*, 2020; PEDROSA *et al.*, 2020). Para além da recomendação do fabricante, também é possível observar o uso desses aditivos em pesquisas como Kanchanason e Plank (2019), Pedrosa *et al.* (2020), Li *et al.* (2022).

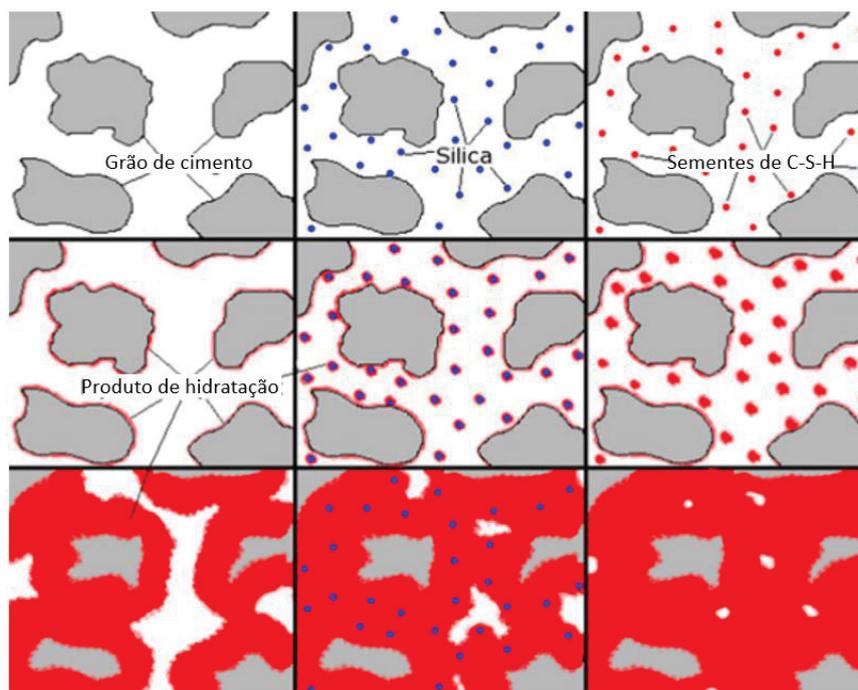
2.3.1 Mecanismo de atuação

As sementes de C-S-H atuam através do processo de nucleação, que induz a precipitação precoce dos produtos de hidratação do cimento em sua superfície (ZHANG *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020; JOHN, 2022). Assim, os pontos de nucleação estimulam a formação dos hidratos, que por sua vez, também atuarão como núcleos de precipitação, acelerando dessa forma todo o processo de hidratação do cimento (THOMAS *et al.*, 2009; LAND & STEPHAN, 2012; XU *et al.*, 2017). Como já mencionado, esse fenômeno se deve principalmente à elevada área superficial específica (ASE) das partículas, pois quanto maior esse valor, maior será a quantidade de pontos de nucleação para o mesmo teor de sementes adicionado (THOMAS *et al.*, 2009; LAND & STEPHAN, 2012; KONG *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2020).

Conforme visto por Nicoleau (2011) e Ouyang *et al.* (2017), as sementes de C-S-H se mostram como um substrato quimicamente mais compatível para a formação do gel resultante da hidratação do cimento. Segundo o levantamento feito por John *et al.* (2018), essa característica diferencia esse tipo de aditivo frente a outras soluções de adição de nanopartículas. O comportamento descrito pelos autores foi explicado por Thomas *et al.* (2009). No trabalho, a aceleração de hidratação gerada por outros nanomateriais foi comparada ao efeito gerado pelas sementes de C-S-H em particular. Verificou-se diferentes taxas de hidratação para o mesmo teor de adição de sílica ativa e sementes de C-S-H em pastas de C_3S . Ao adicionar 2,0% de cada um dos materiais, percebeu-se uma liberação de calor em 24 horas de 67,3 kJ/mol para as pastas com sementes de C-S-H, enquanto os materiais com sílica ativa apresentaram apenas 42,3 kJ/mol para a mesma idade. Nas conclusões, os autores propõem que, antes de atuarem como pontos de nucleação para hidratos, os materiais compostos por sílica reagem com os íons de cálcio liberados pela hidratação dos grãos de cimento. Dessa forma, o efeito de nucleação é proporcionado apenas após a reação da sílica, formando pontos de gel C-S-H, capazes de comportar a precipitação dos produtos da hidratação do cimento.

A composição das sementes de C-S-H, por outro lado, permite a geração imediata do efeito de nucleação, não necessitando passar por nenhuma reação após ser adicionada à pasta de cimento. Land e Stephan (2012) expuseram a comparação da velocidade de hidratação inicial entre cimentos sem adição (a), com a adição de nano sílica (b) e com sementes de C-S-H (c), conforme apresentado na Figura 5:

FIGURA 5 – HIDRATAÇÃO INICIAL EM CIMENTO COMUM, COM NANO SÍLICA E COM C-S-H



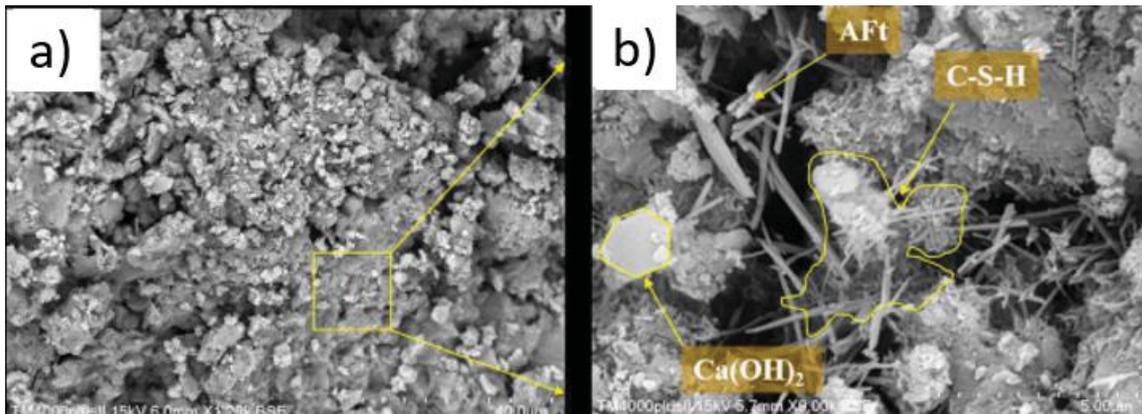
LEGENDA: Pastas de cimento Portland: (a) sem adição; (b) com nano sílica; e (c) com sementes de C-S-H.

FONTE: Adaptada de LAND & STEPHAN (2012).

Wang *et al.* (2020) verificaram, através do ensaio de DRX, a formação de gel C-S-H na superfície das sementes, confirmando sua atuação como agentes de nucleação durante o processo de hidratação do cimento Portland. Além disso, nanomateriais podem atuar como “super fillers” e contribuir para a densificação de empacotamento na pasta cimentícia (ONAIZI *et al.*, 2021). Aliado ao efeito fíler, ocorre ainda a formação de gel C-S-H nos poros restantes da matriz cimentícia, reduzindo a porosidade e densificando a microestrutura do material (THOMAS *et al.*, 2009; NICOLEAU, 2011). Apesar da determinação da porosidade apresentada por materiais cimentícios ser frequentemente realizada através da porosimetria por intrusão de mercúrio, como realizado por Li *et al.* (2020), Wang *et al.* (2020), F. Zhou *et al.* (2021), He e Liao (2021) e Gu *et al.* (2022), alguns estudos utilizam imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a identificação visual da formação de novos hidratos nos poros da matriz cimentícia.

He e Liao (2021) observaram a redução de macroporos em pastas cimentícias com sementes de C-S-H através de imagens MEV. Na Figura 6, é possível perceber esse comportamento através das imagens de MEV de pastas com adição de 0,75% do aditivo ampliadas (a) 1200 e (b) 9000 vezes:

FIGURA 6 – MEV PASTA CIMENTÍCIA COM 0,75% DE SEMENTES DE C-S-H

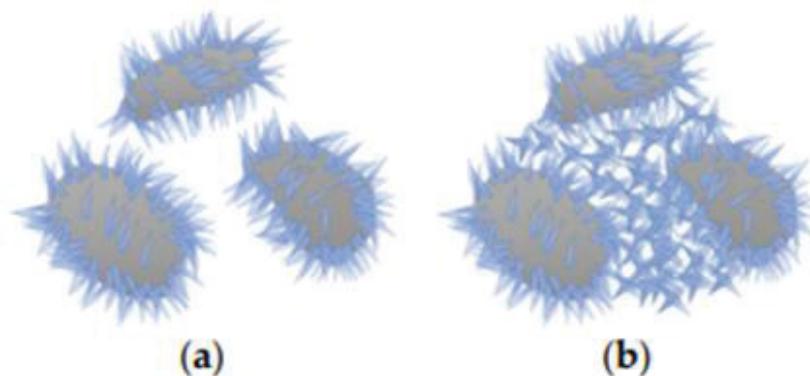


LEGENDA: Imagens ampliadas: (a) 1200 e (b) 9000 vezes.

FONTE: Adaptada de HE & LIAO (2021).

Szostak e Golewski (2020) esquematizaram esse fenômeno conforme mostrado na Figura 7, apresentando a o gel C-S-H formado na superfície e no espaço entre os grãos de cimento com (a) e sem (b) adição de sementes de C-S-H:

FIGURA 7 – FORMAÇÃO DE HIDRATOS ENTRE OS GRÃOS DE CIMENTO

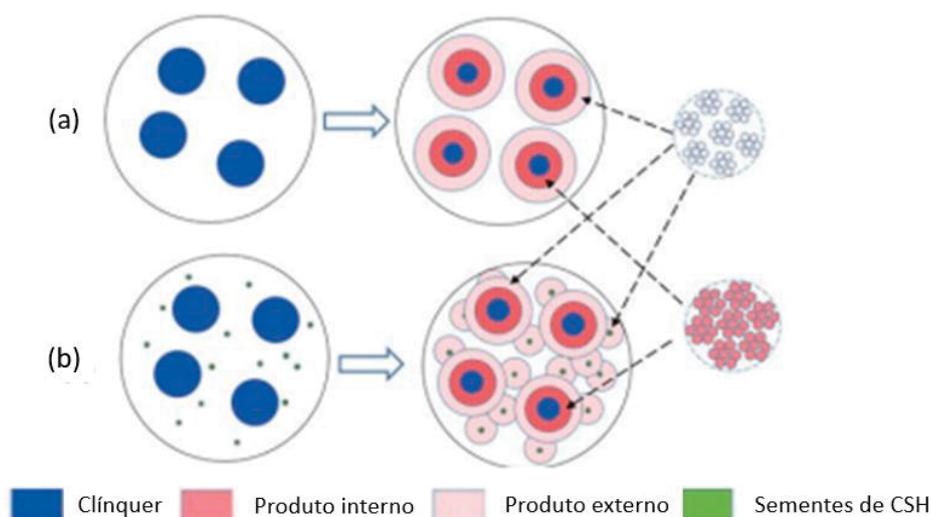


LEGENDA: Hidratação de grãos de cimento: (a) sem aditivo; (b) com sementes de C-S-H.

FONTE: SZOSTAK & GOLEWSKI (2020).

A combinação desses efeitos resulta no mecanismo de atuação das sementes de C-S-H. Tal fenômeno foi representado por Wang *et al.* (2021) pela imagem reproduzida através da Figura 8 que compara uma amostra de pasta cimentícia de controle (a) e com adição do aditivo (b).

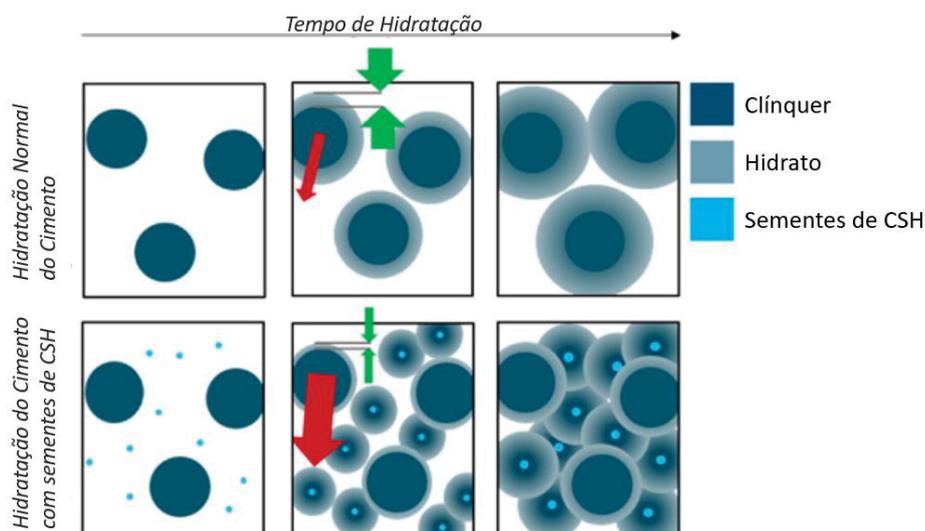
FIGURA 8 – MECANISMO DE ATUAÇÃO DAS SEMENTES DE C-S-H



LEGENDA: Formação de hidratos em cimento: (a) sem aditivo; (b) com sementes de C-S-H.
 FONTE: Adaptada de WANG *et al.* (2021).

Conforme demonstrado por Wang *et al.* (2021), as sementes de C-S-H atuam como núcleos de precipitação para hidratos, diminuindo a camada de inibição formada ao redor dos grãos de clínquer, assim como mostrado em John *et al.* (2018), conforme representação reproduzida pela Figura 9:

FIGURA 9 – REDUÇÃO DA CAMADA DE INIBIÇÃO AO REDOR DOS GRÃOS DE CLÍNQUER



FONTE: Adaptada de JOHN *et al.* (2018)

Os autores também ressaltaram que o espaço preenchido pelas sementes e a formação precoce de mais C-S-H nos poros, levará a uma densificação da estrutura

da matriz cimentícia. Esse fenômeno também foi observado por imagens de MEV por Szostak e Golewski (2020). No trabalho, os autores concluem que a adição de sementes de C-S-H proporciona, em conjunto com os hidratos formados, a densificação da nanoestrutura da pasta cimentícia, dando origem a um compósito mais compacto.

Além do mecanismo físico, as sementes de C-S-H também atuam quimicamente nos compostos cimentícios, como levantado por Nicoleau (2011), John *et al.* (2018) e Wang *et al.* (2021). A natureza química do aditivo conta com menor teor de cálcio do que o C_3S contido no clínquer, modificando a concentração de íons na solução contida nos poros do material, assim como visto por Garrault-Gauffinet e Nonat (1999) e Wang *et al.* (2020). O mecanismo de formação de produtos de hidratação nos poros da matriz cimentícia também resulta em uma alteração química do material. De acordo com Alizadeh *et al.* (2009), a precipitação de hidratos nessa região tende a reduzir o teor de cálcio e hidróxidos da solução dos poros, criando um gradiente em sua concentração. Dessa forma, a dissolução de C_3S é aumentada, levando a uma aceleração da hidratação do cimento (BULLARD *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2021).

Juntamente com a concentração de cálcio, Wang *et al.* (2020) também salientaram a importância da alteração do teor de enxofre na solução contida nos poros da matriz. Ao estudar a aplicação de 2,0% de sementes de C-S-H em pastas cimentícias, os autores observaram que a formação precoce de hidratos nos poros da pasta leva ao pico e subsequente redução da concentração de cálcio na solução dos poros de forma mais rápida, antecipando o período de indução e acelerando o processo de hidratação do material. Para as pastas com 2,0% de sementes de C-S-H, percebeu-se um pico de cálcio em até 30 minutos e 5,69 mmol/L maior do que o apresentado pela pasta de referência, que foi alcançado apenas 2 horas após a mistura. Em contrapartida, a concentração de enxofre na solução tende a aumentar com a redução de teor de íons de cálcios, já que este gradiente é favorável à dissolução do gesso contido no cimento. Resultados similares foram observados pelos trabalhos Alizadeh *et al.* (2009), John *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2021).

2.3.2 Fatores de influência na efetividade do aditivo

O resultado trazido por essa tecnologia é influenciado por fatores ligados à composição química dos insumos e do aditivo, quantidade de água na mistura, teor de adição e geometria das partículas de C-S-H e métodos de mistura dos materiais utilizados.

2.3.2.1 Composição, tamanho e geometria das partículas de C-S-H

As características apresentadas pelas sementes de C-S-H, assim como seu desempenho ao serem aplicadas ao cimento, estão diretamente relacionadas à sua composição química e características físicas. Um dos fatores de maior influência para esses materiais é a relação entre os elementos cálcio (Ca) e silício (Si), chamada de relação C/S, conforme observado por John *et al.* (2019), Li *et al.* (2020) e outros autores.

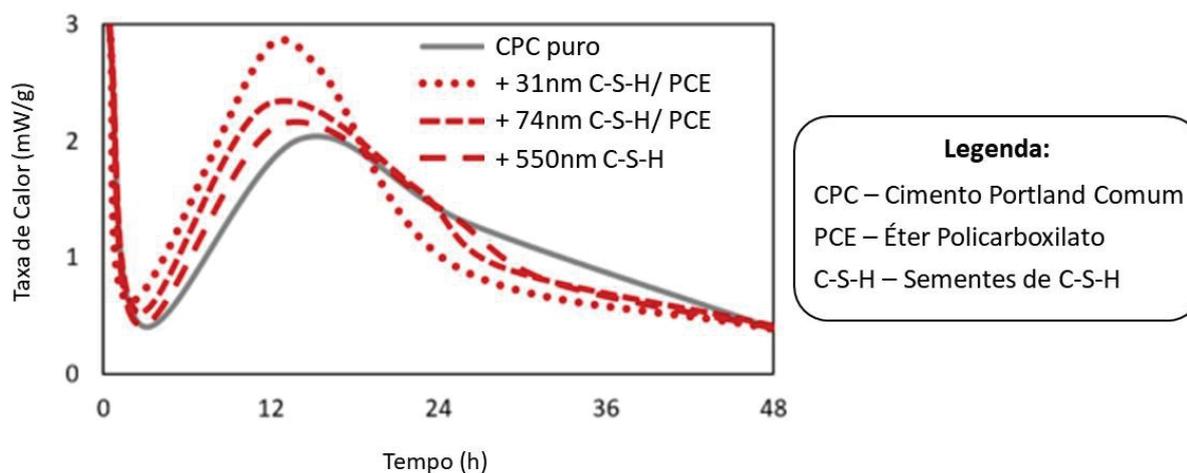
John *et al.* (2019) avaliaram a influência de uma faixa de variação da relação C/S, de 0,7 a 1,2, no desempenho de sementes de C-S-H e concluíram que a estequiometria inicial do aditivo gera alterações físicas e químicas nas partículas adicionadas. Através de ensaios como calorimetria, tempos de pega, resistência à compressão, ondas de ultrassom e outros, os autores concluíram a melhor eficiência dos aditivos de relação C/S de 0,8, ou seja, de aditivos com menor teor de cálcio. Para tal condição, alcançou-se aumento aproximado de 15 MPa (de 12 para 27 MPa) na resistência em 24 horas com relação à pasta de referência. De acordo com o trabalho, maiores teores de Si geram maior polimerização, com cadeias mais longas que para materiais com maior teor de Ca, reafirmando o fenômeno descrito por Richardson (1999).

Apesar de trabalhos da literatura reiterarem a influência da composição do aditivo em sua atuação na matriz cimentícia, não há concordância entre os pesquisadores sobre o teor de cálcio mais efetivo. Ao mesmo tempo que John *et al.* (2019) obtiveram resultados mais satisfatórios para baixos teores de cálcio, Li *et al.* (2020) concluíram o oposto. Para esses pesquisadores, teores mais altos do elemento resultam em maior aceleração da hidratação, conduzindo a maiores resistências mecânicas alcançadas em menos tempo.

Além da relação C/S, o tamanho e formato das sementes de C-S-H também alteram o desempenho do insumo. Conforme salientado por Land e Stephan (2015) e Wang et al. (2021), o tipo de insumo utilizado para obtenção das partículas, bem como seu processo de produção, pode influenciar diretamente nas dimensões e geometria das sementes de C-S-H. Tais características são avaliadas através de ensaios como imagens MEV, granulometria a laser e espalhamento dinâmico de luz e são influenciadas pela composição e forma de obtenção das partículas (LAND & STEPHAN, 2018; JOHN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021). Dentre os estudos que demonstram a influência da geometria das sementes de C-S-H em sua efetividade, Li *et al.* (2020) reforçaram a importância dessa propriedade ao relacioná-la com a disponibilidade de substrato para precipitação dos hidratos formados, relacionado com a área superficial específica do aditivo.

Essa característica também é diretamente ligada ao tamanho das partículas adicionadas, assim como salientado por Kanchanason e Plank (2015). Nessa pesquisa, os autores avaliaram a influência das sementes de C-S-H no calor de hidratação de pastas cimentícias, propriedade que será melhor explorada no item 2.3.3.2 deste trabalho. Kanchanason e Plank (2015) obtiveram aceleração da hidratação de pastas, com mesmo teor de aditivo, ao variar a dimensão das partículas de C-S-H adicionadas, dimensionadas através de ensaio de espalhamento dinâmico de luz. A Figura 10 reproduz a adaptação de John *et al.* (2018) do estudo Kanchanason e Plank (2015). Nela, é possível observar a comparação entre a quantidade de calor liberado por pastas cimentícias não aditivadas; com sementes de C-S-H, com 550 nm; e com sementes de C-S-H aliadas a aditivo éter policarboxilato (PCE), com 74 e 31 nm. Analisando-se a imagem, fica clara a influência do tamanho das partículas na efetividade do seu efeito de aceleração da hidratação do cimento. Em concordância com as conclusões obtidas nesses trabalhos, Land e Stephan (2018) reforçaram que partículas de C-S-H de maiores dimensões, apresentam menor eficiência de atuação.

FIGURA 10 – CALOR DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES DIMENSÕES DE C-S-H

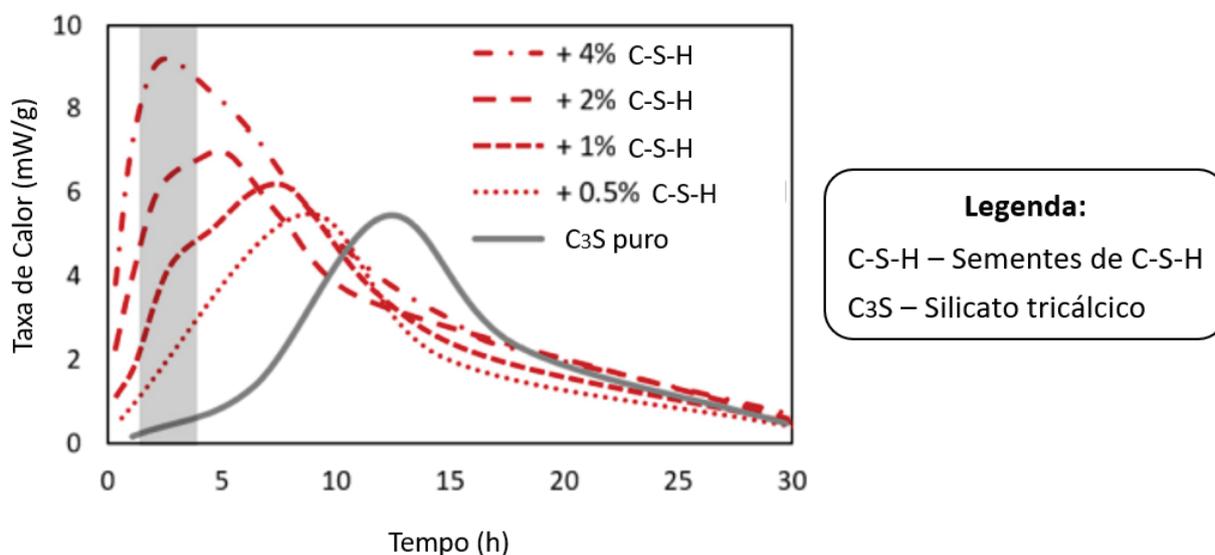


FONTE: Adaptada de JOHN *et al.* (2018).

2.3.2.2 Dosagem da Mistura

Aliado à geometria e ao tamanho das partículas de C-S-H adicionadas, a quantidade também influencia na área total disponível para a precipitação de hidratos (JOHN *et al.*, 2018). De maneira semelhante ao que foi feito por Kanchanason e Plank (2015), Thomas *et al.* (2009) investigaram, através da curva de calor de hidratação de pastas cimentícias, o efeito da adição de sementes de C-S-H de 0 a 4,0%. A Figura 11 reproduz a adaptação do trabalho de 2009 feita por John *et al.* (2018):

FIGURA 11 – CALOR DE HIDRATAÇÃO PARA DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO DE C-S-H



FONTE: Adaptada de JOHN *et al.* (2018).

É evidente a progressão de aceleração causada nas pastas pelo aumento do teor de C-S-H adicionado. Thomas *et al.* (2009) explicaram o comportamento observado com base na ocorrência de dois processos de hidratação simultâneos: na superfície dos grãos e entre os poros. Dessa forma, a curva de calor liberado é deformada para a esquerda, como notado na imagem. Em trabalhos mais recentes, como Pedrosa *et al.* (2020) e He e Liao (2021), denifiu-se o aumento da eficiência das sementes de C-S-H conforme o acréscimo do teor adicionado. Esse efeito foi relacionado à maior quantidade de núcleos e superfície para precipitação de hidratos.

De forma geral, os estudos acerca dessa tecnologia têm adotado teores entre 1,0 e 2,0%, com relação à massa do ligante, como Wang *et al.* (2019), John *et al.* (2019), Wang *et al.* (2020), Wang *et al.* (2021), Gu *et al.* (2022). Há trabalhos que utilizaram valores mais elevados, com adições de 4,0% ou valores superiores, como Thomas *et al.* (2009); Land e Stephan (2012); Szostak e Golewski (2020); Pedrosa *et al.* (2020). A quantidade de água também exerce influência no desempenho do aditivo e das misturas resultantes. A faixa de água/cimento (a/c) utilizada por autores que estudaram a adição de sementes de C-S-H em pastas cimentícias é de 0,25 a 0,50. A seguir, a Tabela 1 apresenta um resumo dos teores de adição de aditivo de C-S-H, assim como relação a/c utilizados por trabalhos revisados:

TABELA 1 – DOSAGENS DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM SEMENTES DE C-S-H UTILIZADAS NA LITERATURA

Teor de aditivo	Relação a/c	Referência
0,5 – 4,0%	0,50	Thomas <i>et al.</i> (2009)
0,5 – 10,0%	0,50	Land e Stephan (2012)
0,5 – 10,0%	0,50	Land e Stephan (2015)
2,0%	0,50	Kong <i>et al.</i> (2018)
0,1 – 0,2%	0,50	Land e Stephan (2018)
1,0%	0,35 – 0,50	John <i>et al.</i> (2019)
2,0%	0,45	Kanchanason e Plank (2019)
0,5 – 2,0%	0,50	Wang <i>et al.</i> (2019)
0,5%	0,50	Li <i>et al.</i> (2020)
0,5 – 5,0%	0,44	Pedrosa <i>et al.</i> (2020)
4,0%	0,30	Szostak e Golewski (2020)
2,0%	0,35 – 0,40	Wang <i>et al.</i> (2020)
0,25 – 0,75%	0,36	He e Liao (2021)
4,0%	0,30	Szostak e Golewski (2021)
1,0%	0,35 – 0,50	Wang <i>et al.</i> (2021)
0,5%	0,40	F. Zhou <i>et al.</i> (2021)
0,5 – 1,5%	0,25	Z. Zhou <i>et al.</i> (2021)
0,5 – 4,0%	0,50	Gu <i>et al.</i> (2022)
4,0%	0,50	Pizon <i>et al.</i> (2022)
1,5 – 3,0%	0,40 – 0,50	Li <i>et al.</i> (2022)

FONTE: A autora (2023).

A proporção mais efetiva ainda gera discussão entre os trabalhos encontrados na literatura. Em trabalhos como em Thomas *et al.* (2009); Land e Stephan (2012); Kong *et al.* (2018); Szostak e Golewski (2020); Pedrosa *et al.* (2020); e Gu *et al.* (2022); a relação a/c empregada é de 0,5. John *et al.* (2019) justificaram esse valor ao encontrar queda nas resistências mecânicas em idades mais avançadas para menores quantidades de água. Os autores levantaram a hipótese de que, para relações a/c mais baixas, há deficiência da quantidade de água, assim como a restrição de seu transporte ao longo da matriz densificada pelo aditivo, limitando a dispersão das partículas e a formação de produtos de hidratação.

Por outro lado, Szostak e Golewski (2020) trabalharam com uma baixa relação a/c, de 0,3, em pastas cimentícias com adições minerais e alto teor de aditivo (4,0%) e consideraram a quantidade de água ideal para a potencialização dos materiais. Valores semelhantes foram utilizados por Wang *et al.* (2020), Szostak e Golewski (2020), Wang *et al.* (2021), Szostak e Golewski (2021), He e Liao (2021) e Z. Zhou *et al.* (2021). Percebe-se que há variação entre teores de adição e relações a/c entre as pesquisas sobre o tema.

2.3.2.3 Composição do cimento

A influência da composição do cimento nos mecanismos de atuação das sementes de C-S-H, assim como outros parâmetros relacionados à essa tecnologia, ainda precisa ser melhor compreendida. Têm-se avançado de forma significativa no conhecimento sobre o aditivo e seu desempenho, através de levantamentos sobre diferentes métodos de obtenção; composição química; características físicas e outros, conforme já revisado no presente trabalho. Apesar disso, a parcela de atuação do cimento nos efeitos gerados pela adição das partículas de C-S-H ainda precisa ser explorada.

Grande parte dos estudos utilizou a aplicação do aditivo em cimento Portland comum, sem adições minerais. Entretanto, a discussão sobre o ligante e sua influência encontra-se em ascensão em trabalhos que utilizam sementes de C-S-H. Há alguns autores que relacionaram fenômenos observados à interação desses materiais. John *et al.* (2019) analisaram a participação da finura do cimento no comportamento das amostras estudadas durante o ensaio de calorimetria e concluíram que não há influência dessa propriedade do ligante nesse caso.

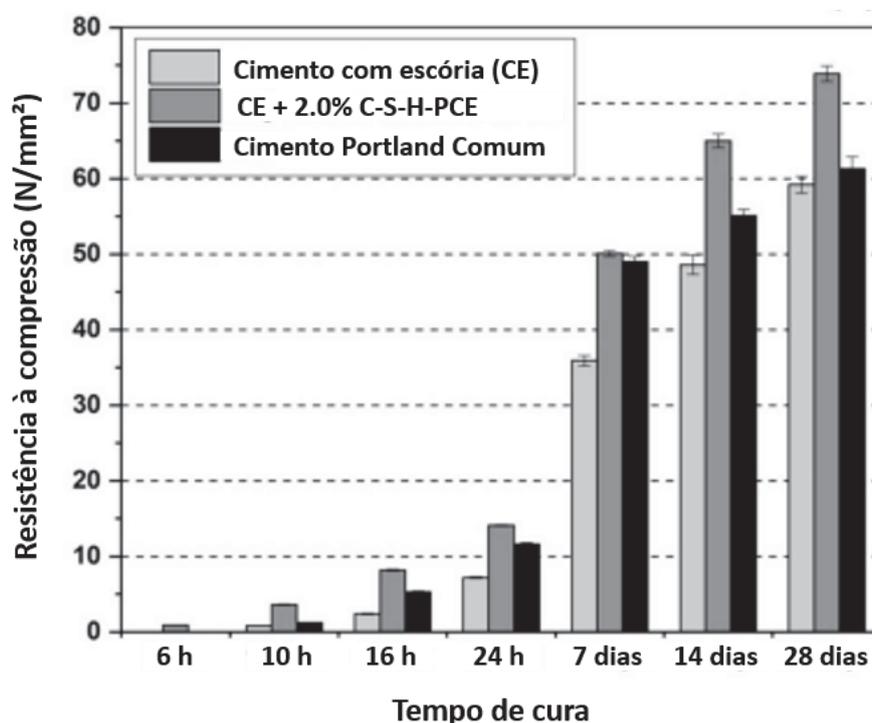
Apesar de menos frequentes, trabalhos como Kanchanason e Plank (2019), Szostak e Golewski (2020), Xu *et al.* (2020) e Pizon *et al.* (2022) estudaram a inserção do aditivo em composições de cimento com adições minerais como cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno. Szostak e Golewski (2020) avaliaram pastas com 20% de CV e concluíram a boa interação entre as sementes de C-S-H e a adição, sem aparente interação negativa entre os materiais.

Com relação às escórias, os trabalhos de Kanchanason e Plank (2019), em pastas com 35% de escória, Xu *et al.* (2020), em pastas com 50% da adição, e Pizon *et al.* (2022), em pastas com 65%, apresentaram influência do material no desempenho das sementes de C-S-H adicionadas. Através da análise de calor de hidratação e resistências mecânicas, Pizon *et al.* (2022) apontaram que a adição das nanopartículas é mais efetiva para baixos teores de escória. Dessa forma, concluiu-se que, ao menos para as primeiras idades, o C-S-H adicionado atua de forma mais pronunciada no clínquer do cimento.

Em contrapartida, Kanchanason e Plank (2019) acompanharam o desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento Portland comum, com escória e com a adição de 2,0% de sementes de C-S-H aliadas um superplastificante à base de éter policarboxilato (PCE), de forma a facilitar o manuseio do material. No trabalho, em que a relação a/c de 0,45 foi mantida para todas as pastas, os autores notaram aumento significativo para a composição com escórias na presença dos aditivos. Este efeito é mostrado na Figura 12.

É possível notar que a amostra com aditivo ultrapassou os valores de resistência de ambas as pastas: tanto com, quanto sem adições. Para amostras de 10 horas de idade, a resistência alcançada pelas argamassas com aditivo (3,6 N/mm²) alcançou um valor 4,5 vezes maior do que o valor apresentado pelas amostras feitas a partir de cimento com escória sem aditivo (0,8 N/mm²). Um comportamento semelhante se manteve para todas as idades analisadas, de 6 horas a 28 dias: com 16 horas, a diferença entre as amostras chega a ser de 240% e, para idades mais avançadas, as resistências alcançadas pelos compostos com sementes de C-S-H ainda superaram as amostras de referência em uma faixa de 25 a 95%.

FIGURA 12 – RESISTÊNCIAS MECÂNICAS EM ARGAMASSAS COM ESCÓRIA E ADITIVO C-S-H



FONTE: Adaptada de KANCHANASON & PLANK (2019).

Além da análise referente ao comportamento mecânico em argamassas, Kanchanason e Plank também realizaram testes de calorimetria e análise DRX para investigação do mecanismo de atuação do aditivo nas pastas cimentícias. A partir desses ensaios os autores observaram antecipação de quase 4 horas do pico da curva obtida na calorimetria das pastas com 2,0% de aditivo, assim como o aumento da quantidade de calor liberado durante essa fase, em comparação às pastas de referência. Diante do forte aumento de reação observado nas amostras com aditivo, os autores concluíram que as sementes de C-S-H aliadas ao PCE não apenas aceleram a hidratação dos compostos cimentícios, como também ativam as adições minerais contidas na mistura. Essa afirmação pôde ser confirmada pelo ensaio de DRX, que apontou grandes picos de portlandita, aproximadamente 2 horas após a mistura das pastas, e a formação expressiva de hemi-carboaluminato nas amostras com aditivo. Dessa forma, os pesquisadores ressaltaram a possibilidade do uso de pastas cimentícias com adições minerais no lugar do cimento Portland comum sem que haja perda de desempenho, demonstrando até uma melhora no seu desempenho, mesmo em idades mais avançadas.

Os resultados obtidos por Xu *et al.* (2020) reforçam o que foi determinado por Kanchanason e Plank (2019). Objetivando verificar a influência do aditivo na reatividade da adição mineral, utilizou-se uma solução de ácido etilenodiamino tetraacético (EDTA) para análise da porcentagem de escória não reagida. Em posse desses resultados, aliados às resistências mecânicas obtidas, os autores concluíram que as partículas adicionadas aumentam a reatividade dos grãos de escória. Os melhores valores foram obtidos para as idades de 7 e 28 dias com teores de adição de 0,6; 1,0 e 2,0% de C-S-H. No trabalho, os autores obtiveram aumento na quantidade de escória reagida em 1, 7 e 28 dias para as amostras com o maior teor de aditivo testado, passando de 3,8; 8,6; e 40,8%, apresentados pela pasta de referência, para 8,9; 25,8; e 59,6% para pastas com 2,0% de sementes de C-S-H.

Esse comportamento foi reiterado em estudo mais recente de Li *et al.* (2022), em que a efetividade de teores de 1,5 e 3,0% de aditivo comercial de sementes de C-S-H foi avaliada em cimentos com substituição de 50 a até 95% de escória. No estudo, o avanço das resistências mecânicas em argamassas foi acompanhado, assim como a curva de calor de hidratação em pastas cimentícias. Para o menor teor de substituição (50%) os autores obtiveram um aumento de resistência à compressão de 159,18% para 24 horas, passando de 9,8 a 25,4 MPa para os cimentos de referência e com 3,0% de aditivo, respectivamente. Aos 28 dias, o aumento de desempenho mecânico, apesar de ser consideravelmente menor, ainda pôde ser observado, com uma diferença de aproximadamente 5% para as argamassas com (57,3 MPa) e sem (60,1 MPa) aditivo. Para o mesmo cimento, os autores também encontraram aumentos de 61,20 e 24,75% no calor de hidratação acumulado para 12 e 24 horas, respectivamente, para as pastas com 3,0% de aditivo (123,8 e 169,3 J/g de cimento) com relação às de referência (76,8 e 136,5 J/g de cimento).

2.3.2.4 Dispersão das partículas na mistura

Autores como Barois *et al.* (1999) e Costa (2006) salientaram a interferência do procedimento de mistura no desempenho de compostos cimentícios e reforçaram a importância da padronização desse procedimento para limitar as variáveis dentro de casa ensaio. De forma similar, estudos referentes a adição de materiais nanométricos salientam a importância de uma boa distribuição desses materiais para otimização de seu efeito na matriz cimentícia. De acordo com Sikora *et al.* (2018) e

Hamed *et al.* (2019), uma dispersão ineficiente dará origem a um compósito heterogêneo, com aglomerados da adição e pontos sem a sua presença, gerando áreas de maior fragilidade no material. Essa distribuição desuniforme pode prejudicar o desempenho do produto final, como mostrado em salientado por Feng *et al.* (2020) e F. Zhou *et al.* (2021). Após apresentar os efeitos positivos da adição de materiais nanométricos em compostos cimentícios, como ganho de resistência mecânica e densificação da microestrutura, Adesina (2020) apontou que a efetividade dessa incorporação dependerá da dispersão das partículas na mistura, citando o uso de outros aditivos como uma possível solução para a potencialização do processo.

Apesar de comumente ser incorporado na forma de solução aquosa, como em John *et al.* (2019), Wang *et al.* (2020) e Szostak e Golewski (2020), o aditivo de sementes de C-S-H é aplicável como pó (HORGNIES *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2022). Ao testar a adição de 1,0% de sementes de C-S-H de diferentes estequiometrias em pastas cimentícias, John *et al.* (2019) observaram aumento no pico da curva de calor de hidratação e resistências iniciais (24 horas) com valores próximos de duas vezes o apresentado pela referência.

Para o mesmo teor de adição (1,0%), Wang *et al.* (2020) também obtiveram uma aceleração da hidratação de pastas cimentícias, observada através de ensaio de calorimetria, e aumento da resistência à compressão em argamassas com 24 horas, passando de 7 para 9 MPa, aproximadamente. Já no trabalho de Szostak e Golewski (2020) um valor superior de adição de sementes de C-S-H foi testado, resultando em um ganho próximo de 70% da resistência à compressão em 24 horas para pastas cimentícias com 4,0% de aditivo em comparação às pastas de referência.

Essa aceleração na hidratação de pastas cimentícias também pode ser obtida através da utilização do aditivo em pó, conforme mostrado por Horgnies *et al.* (2016). Os autores aliaram o aditivo superplastificante na composição das misturas estudadas para garantir a distribuição das nanopartículas incorporadas. Dessa forma, obtiveram aumento de resistências mecânicas de pastas cimentícias com 2,0% de sementes de C-S-H para 24 horas e 28 dias de 35% e 22%, respectivamente.

2.3.3 Efeitos no desempenho de pastas cimentícias no estado fresco

Através do mecanismo de atuação descrito, a adição de sementes de C-S-H tem potencial para influenciar propriedades do estado fresco da pasta cimentícia

(THOMAS *et al.*, 2009; CHARRIER & OUELLET-PLAMONDON, 2022). As alterações podem ser notadas através das propriedades mostradas a seguir.

2.3.3.1 Tempo de pega

A formação precoce de hidratos na pasta cimentícia faz com que o seu tempo de pega seja reduzido, conforme observado por Land e Stephan (2018), Li *et al.* (2020), Z. Zhou *et al.* (2021) e Pizon *et al.* (2022). Land e Stephan (2018) adicionaram 0,1; 0,25; e 0,5% (sobre a massa de cimento) de sementes de C-S-H em pastas de cimento Portland comum e observaram aceleração dos tempos de início e, de forma ainda mais pronunciada, fim de pega entre a referência e as pastas aditivadas. Nesse trabalho, os autores testaram aditivos produzidos por dois métodos diferentes e encontraram uma redução aproximada de tempo de início e fim de pega de até 31% e até 42%, respectivamente. De maneira semelhante, Li *et al.* (2020) verificaram a influência no tempo de pega da adição de 0,5% de sementes de C-S-H com diferentes teores de cálcio, obtendo uma redução de 61% e 56% para início e fim de pega para os aditivos com maior teor de cálcio comparados às pastas cimentícias sem adição de sementes de C-S-H.

Z. Zhou *et al.* (2021) e Pizon *et al.* (2022) analisaram o comportamento do tempo de pega de pastas cimentícias com grandes teores de adições minerais juntamente com a adição de sementes de C-S-H. No primeiro trabalho, os autores testaram diferentes combinações de tipo de cimento e teores de adição e aditivo. Entre as amostras, observou-se uma redução de início (64%) e fim (60%) de pega entre pastas cimentícias, com adição de 60% de cinza volante, com 1% de sementes de C-S-H e sem a adição desse aditivo.

Já no estudo de Pizon *et al.* (2022), investigou-se a influência da variação de tipos de clínquer e aditivos aceleradores, teores de adição e aditivos e condições de exposição no tempo de início de pega de pastas cimentícias com adição de escória granulada de alto forno. Dentre as amostras, notou-se aceleração de 38% nessa propriedade ao adicionar 4,0% de sementes de C-S-H em uma pasta com 65% de escória. Li *et al.* (2022) também obtiveram aceleração do tempo de pega ao adicionar 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H em argamassas compostas por cimentos com 50% de escória. No trabalho, os autores observaram uma redução de 70 e 62% dos tempos de início e fim de pega para as amostras com aditivo em comparação às sem.

A quantidade de gesso presente nos cimentos influencia o resultado de tempo de pega dos materiais devendo, portanto, ser considerada na avaliação de tal parâmetro (NEVILLE, 2015; CAILLAHUA & MOURA, 2018). Entretanto, não foi notada diferença significativa nos valores apresentados pelas pesquisas citadas, que utilizaram cimentos com quantidade de SO₃ de até 3,5%, com relação à massa de aglomerante. Nesses trabalhos, o efeito da adição de sementes de C-S-H foi comprovado já que as pastas de referência apresentaram, em média, uma faixa de aceleração do tempo de pega compreendida entre 20 e 70% para início e 35 e 62% para fim. Além disso, os estudos que utilizaram adições minerais (Z. ZHOU *et al.*, 2021; PIZON *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2022) comprovaram a compensação gerada pelo aditivo do atraso dos tempos de pega causado pelo teor de adição mineral frente à pasta composta por cimento Portland comum.

Essas informações são resumidas no Quadro 1, que apresenta o tipo de cimento (cimento Portland comum ou dosados em laboratório com cinzas volantes ou escórias), relação água/cimento (*a/c*), teor de adição de sementes de C-S-H com relação à massa de ligante, tempos de início e fim de pega, em horas, e a redução desse valor em comparação a pastas de mesmo tipo de cimento sem o aditivo. Ressalta-se que alguns dos valores de tempos de pega apresentados são aproximados, já que foram obtidos através de análise gráfica dos trabalhos citados.

QUADRO 1 – Resultados de tempo de pega obtidos por trabalhos anteriores

Tipo de cimento	a/c	Sementes de C-S-H	Tempo de pega (h)		Redução TP		Referência
			Início	Fim	Início	Fim	
CP comum	0,50	0	7,5	11,5	-	-	Land e Stephan (2018)
		0,5%	6,0	7,5	20%	35%	
		0,5%	5,2	6,7	31%	42%	
CP comum	0,50	0	5,6	9,4	-	-	Li <i>et al.</i> (2020)
		0,5%	2,7	4,3	52%	54%	
		0,5%	2,2	4,1	61%	56%	
CP comum	0,25	0	2,4	6,3	-	-	Z. Zhou <i>et al.</i> (2021)
CP60CV*		0	3,9	6,8	-	-	
		1,0%	1,4	2,7	64%	60%	
CP comum	0,50	0	2,0	-	-	-	Pizon <i>et al.</i> (2022)
CP65E*		0	3,9	-	-	-	
		4,0%	2,4	-	38%	-	
CP50E*	0,50	0	3,7	4,5	-	-	Li <i>et al.</i> (2022)
		3,0%	1,1	1,7	70%	62%	

*Cimentos dosados em laboratório para cada pesquisa referenciada.

LEGENDA: TP – Tempo de Pega.

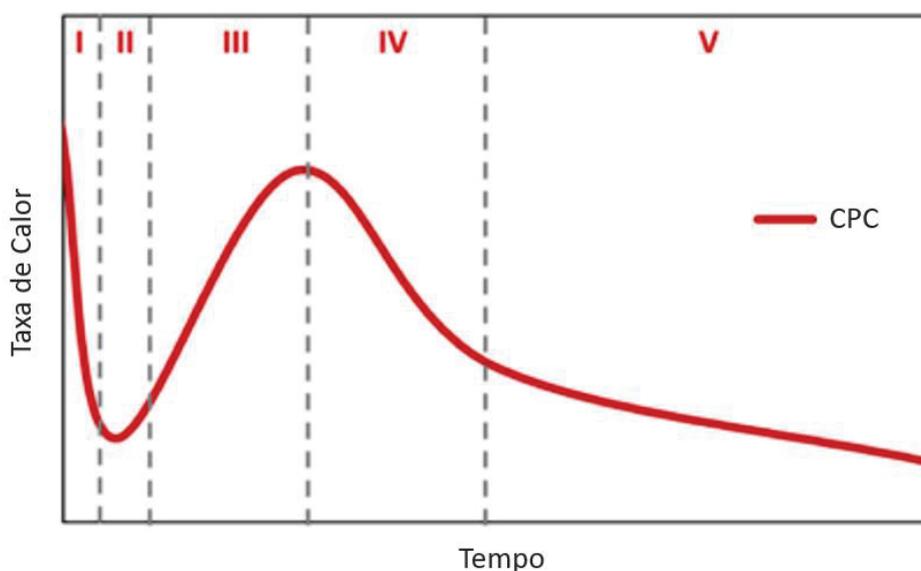
FONTE: A autora (2023).

2.3.3.2 Calor de hidratação

A aceleração da reação de hidratação na matriz cimentícia também é demonstrada através de ensaios de calorimetria, que consiste no acompanhamento da liberação de calor de hidratação do cimento. No trabalho de revisão, John *et al.* (2018) retomaram o perfil característico da curva de calor liberado durante a hidratação do cimento Portland comum, originalmente apresentado por de Gartner *et al.* (2002).

Conforme já adotado em pesquisas com cimento, a curva foi dividida em cinco estágios: o período de indução (I), com alta e rápida liberação de calor, que ocorre imediatamente após o contato do cimento com a água; o período dormente (II), caracterizado por baixas duração e atividade calorífica; o período de aceleração (III), quando há a retomada da liberação de energia até o pico da curva; o período de desaceleração (IV), dado após o valor máximo de calor liberado, seguido por um declínio até a última etapa, o último período de hidratação (V), no qual a taxa de hidratação sofre decréscimo constante e menos acentuado, que pode ter fim meses após a mistura (GARTNER *et al.*, 2002; JOHN *et al.*, 2018). Esse perfil pode ser identificado conforme imagem apresentada em John *et al.* (2018), através de uma adaptação do gráfico retirado de Gartner *et al.* (2002). Tal imagem é reproduzida a seguir através da Figura 13:

FIGURA 13 – PERFIL DA CURVA CARACTERÍSTICA DE CALORIMETRIA



LEGENDA: CPC – Cimento Portland Comum.
FONTE: Adaptada de JOHN *et al.* (2018).

A adição de sementes de C-S-H pode alterar a geometria da curva do cimento, deformando-a para a esquerda, conforme é possível notar na Figura 11 do item 2.3.2.2 deste trabalho. Esse comportamento é influenciado pela diminuição da camada de inibição ao redor dos grãos de clínquer, o que reduz o tempo de duração do período de dormência (LAND & STEPHAN, 2018; JOHN *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2021) também destacaram a redução do período de indução e o aparecimento antecipado do pico de calor liberado. Esse fenômeno também foi citado por Wang *et al.* (2020), Li *et al.* (2020), He e Liao (2021), dentre outros autores.

Os trabalhos retomados no item anterior (item 2.3.3.1) relacionaram os dados obtidos em ambos os ensaios, valores de tempos de pega e calorimetria. Land e Stephan (2018) acompanharam o calor de hidratação liberado pelas amostras durante 3 dias, encontrando picos de grandeza próxima de 2,5 mW/g alcançado 3,5 horas após adição de água nas pastas aditivadas. A diferença entre os métodos de síntese do aditivo coincidiu com os resultados de tempo de pega, evidenciando a influência da forma de obtenção das sementes de C-S-H em seu desempenho na matriz cimentícia. A aceleração da reação foi evidenciada ao comparar o resultado dessas pastas ao comportamento apresentado pelo material sem aditivo, que apresentou menor quantidade de calor liberado (valores próximos de 2,0 mW/g) 14,6 horas após a mistura.

Em Li *et al.* (2020) o fenômeno do calor de hidratação das amostras foi observado ao longo de 2 dias para pastas com relação a/c de 0,50. Os autores também encontraram concordância entre os resultados de tempo de pega e da calorimetria, que resultou em um pico aproximado de 6,0 mW/g em 7 horas para as pastas aditivadas e de 5,5 mW/g em 9 horas para a pasta sem aditivo. A grandeza e tempo dos picos de calor de hidratação evidenciaram a efetividade do aditivo nas amostras ensaiadas.

Além da comprovação da ação de aceleração induzida pelas sementes de C-S-H, Z. Zhou *et al.* (2021) e Pizon *et al.* (2022) também apontaram o atraso na hidratação da pasta cimentícia gerado pela adição de cinzas volantes e escória granulada de alto forno, respectivamente. Z. Zhou *et al.* (2021) acompanharam a curva de calor de pastas com adição de cinzas volantes entre 0 e 60% e com a/c de 0,25 durante 90 horas e observaram o efeito causado por 1,0% de nanopartículas de C-S-H adicionadas à mistura, ao verificar maior pico de calor liberado para as amostras aditivadas, que atingiram até quase 0,004 mW/g em aproximadamente 8

horas. Entretanto, o maior valor apresentado pelas pastas com cinzas volantes não superou o ápice do cimento Portland comum (de quase 0,006 mW/g), o que evidenciou o atraso gerado pela adição mineral, mesmo na presença do aditivo acelerador.

Em concordância, os resultados obtidos em Pizon *et al.* (2022) demonstraram a mesma tendência de aceleração do aditivo em pastas com até 65% de escória granulada de alto forno e relação a/c de 0,50, mas sem ultrapassagem dos valores máximos do cimento Portland comum. Os autores encontraram picos aproximados de 1,4 e 1,8 mW/g em cerca de 9 e 7 horas para as pastas com 65% de escória sem e com aditivo respectivamente. Já o material composto por cimento Portland comum alcançou o pico de 4,0 mW/g em 9 horas.

A alteração da curva de calor de hidratação em pastas cimentícias com adição de sementes de C-S-H também foi observada em outros trabalhos, como em: Kanchanason e Plank (2019), com aumento do considerável do pico de energia liberada e adiantamento do ápice da curva em quase 4 horas para pastas cimentícias com 35% de escória; Szostak e Golewski (2020), em que as pastas de cimento com 20% de cinzas volantes, aditivadas em 4,0%, obtiveram aumento de mais de cinco vezes do pico de calor com relação à referência; Wang *et al.* (2021), com aumento de até 20% e aceleração de até 7 horas do pico de calor liberado de pastas com 1,0% de C-S-H; e outros estudos que também observaram a mesma tendência (WANG *et al.*, 2020; PEDROSA *et al.*, 2020; HE & LIAO, 2021).

Através da análise dos trabalhos citados, é possível observar uma tendência da adição de sementes de C-S-H de adiantar e aumentar o pico de calor de hidratação em comparação à mesma pasta sem aditivo. Quando comparada ao cimento Portland comum, nota-se o deslocamento da curva da pasta aditivada para a esquerda. Esse fenômeno pode ser explicado pela otimização da reação de hidratação e maior dissolução de C₃S causadas pela ação do aditivo, o que leva a uma aceleração da hidratação do cimento e consequente alteração da curva de calor liberado durante tal reação (BULLARD *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2021).

2.3.3.3 Viscosidade

A formação precoce dos produtos de hidratação, aliada à maior demanda de água devida à área superficial específica das nanopartículas adicionadas, faz com

que a utilização de sementes de C-S-H altere a viscosidade da pasta cimentícia (JOHN *et al.*, 2019; F. ZHOU *et al.*, 2021).

Além do ensaio de tempos de pega com o aparelho de Vicat, essa alteração também pode ser notada através da determinação da viscosidade do material, obtida através de: viscosímetros (JOHN *et al.*, 2019); reômetros (BHOJARAJU *et al.*, 2021; CHARRIER & OUELLET-PLAMONDON, 2022); e testes de abatimento e mini abatimento (F. ZHOU *et al.*, 2021; CHARRIER & OUELLET-PLAMONDON, 2022).

A velocidade, apresentada em rotações por minuto (rpm), utilizada em equipamentos como viscosímetros e reômetros apresenta variação entre os trabalhos, podendo ser mantida constante ou variada em incrementos regulares. A variação da taxa de cisalhamento aplicada pelo equipamento foi utilizada em trabalhos como John *et al.* (2019), com uma faixa de 0 a 150 rpm, e Charrier e Ouellet-Plamondon (2022), de 0,1 a 100 rpm. Nas pesquisas citadas, uma faixa de valores maior foi encontrada para pastas com sementes de C-S-H. John *et al.* (2019) alcançaram um aumento de 200% entre pastas sem (aproximadamente 0,5 Pa.s) e com 1,0% de aditivo (aproximadamente 1,5 Pa.s), enquanto Charrier e Ouellet-Plamondon (2022) chegaram a valores de aproximadamente 0,2 Pa.s para pastas com 0,3% de aditivo.

Bhojaraju *et al.* (2021) testaram ambos os métodos, analisando tanto uma taxa de rotação de 0,018 rpm mantida constante, quanto uma faixa de 0,1 a 100 rpm com comportamento parabólico, sendo a velocidade aumentada gradualmente até o máximo (100 rpm) e voltando ao valor inicial (0,1 rpm). No trabalho, os autores consideraram o método de velocidade constante como o procedimento que melhor diferencia as características apresentadas pelas misturas estudadas.

Apesar de utilizar equipamentos, métodos e faixas de velocidade variadas, os trabalhos da literatura apontam um aumento da viscosidade de pastas cimentícias ao incorporar sementes de C-S-H em sua composição.

2.3.4 Efeitos no desempenho de pastas cimentícias no estado endurecido

A incorporação de sementes de C-S-H também pode alterar as propriedades do estado endurecido da pasta cimentícia (JOHN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2020; Z. ZHOU *et al.*, 2021). O fenômeno pode ser observado através das resistências mecânicas e outras propriedades, como apresentado na sequência.

2.3.4.1 Resistências mecânicas

O aumento da resistência mecânica das pastas cimentícias é uma das principais finalidades da adição de sementes de C-S-H. Diversos trabalhos observaram o acréscimo dessa propriedade ao longo das primeiras idades de compostos cimentícios na presença do aditivo.

Wang *et al.* (2020) encontraram aumento de resistência à compressão em argamassas de cimento Portland comum com relação a/c de 0,4 e teores de adição de 1,0 e 2,0% de sementes de C-S-H. No trabalho, foi apresentada a maior influência dos nanomateriais nas amostras com idades até 3 dias, ressaltando-se o efeito mais pronunciado durante as primeiras 24 h após a mistura dos insumos. No trabalho, os autores ainda exploraram a diferença na resistência das amostras testadas com aditivo de sementes de C-S-H na presença de éter policarboxilato (PCE). Dessa forma, o efeito do teor de 2,0% de aditivo acelerador é potencializado, atingindo uma resistência à compressão de aproximadamente 26 MPa, enquanto o teor de 1,0% apresentou um valor próximo de 22 MPa, ambos na presença de 0,2% de PCE.

Os resultados de Wang *et al.* (2021) também indicaram essa tendência para pastas cimentícias com relação a/c de 0,35 e adição de 1,0% de partículas de C-S-H. Para essas misturas, os autores obtiveram aumento significativo da resistência à compressão até 28 dias de idade. Com o mesmo teor de aditivo e um a/c de 0,5 aplicado em argamassas encontrou-se resultados ainda mais pronunciados. 12 horas após a mistura, as argamassas aditivadas apresentaram resistências de tração na flexão e compressão com valores superiores ao dobro do observado para a argamassa de referência, sem aditivo.

Maiores resistências iniciais também foram obtidas em pastas cimentícias com adições minerais. Os autores Szostak e Golewski (2020) observaram o fenômeno em composições com 20% de cinza volante, 4,0% de aditivo de C-S-H e a/c de 0,3. Com relação à amostra sem aditivo, os autores encontraram valores mais de quatro vezes maiores para resistência à compressão e superiores ao dobro do valor de resistência à tração após 8 horas. Com 12 horas, as amostras ainda apresentavam diferença próximas do dobro entre as amostras com e sem adição das nanopartículas. Dessa forma, os autores salientaram a maior influência das sementes de C-S-H nas resistências mecânicas nas primeiras 24 horas de idade dos materiais cimentícios, estando de acordo com os trabalhos anteriormente citados. Para idades

mais avançadas, entre 14 e 28 dias os autores dos três trabalhos constataram que não há influência significativa, seja positiva ou negativa, gerada pelo aditivo nas resistências mecânicas dos materiais testados. Ainda assim, ainda não há um consenso com relação ao efeito do aditivo para esse período.

Ao avaliar a resistência à compressão de pastas cimentícias com adição de 1,0% de sementes de C-S-H com uma variação de a/c de 0,35 a 0,5, John *et al.* (2019) observaram diferentes comportamentos em função da quantidade de água. Para os valores de a/c mais baixos, notou-se queda nos valores de resistência em idades mais avançadas. Ao analisar os resultados obtidos a partir das amostras com a/c de 0,5 e 1,0% de sementes de C-S-H com diferentes estequiometrias, porém, os autores notaram que as composições com aditivo apresentavam resistências até 155 e 20% superiores com 1 e 28 dias às de referência, respectivamente.

Kanchanason e Plank (2019) compararam o desempenho mecânico de seis tipos de argamassas cimentícias: duas de cimento Portland comum; com adição de 35% de escória; com escória e 2,0% de aditivo C-S-H; com adição de 35% de argila calcinada; e com argila calcinada e 2,0% de aditivo C-S-H. Conforme esperado, as partículas adicionadas proporcionaram aumento significativo das resistências nas primeiras idades. Entretanto, diferentemente do que foi encontrado pelos outros trabalhos citados, em 28 dias os valores apresentados pela amostra aditivada de cimento com escórias superaram não apenas a argamassa com escória, mas também a de cimento Portland comum. Para essa idade, a composição com escória e partículas de C-S-H superou em mais de 15% a amostra sem adições nem aditivos.

Parte dos dados referenciados é compilada no Quadro 2, que apresenta o tipo de cimento (cimento Portland comum ou dosados em laboratório com cinzas volantes, escórias ou argila calcinada), relação água/cimento (a/c), teor de adição de sementes de C-S-H com relação à massa de ligante, tipo de material (argamassa ou pasta), idade, em dias, e a resistência à compressão apresentada. Ressalta-se que alguns dos valores de resistência à compressão apresentados são aproximados, já que foram obtidos através de análise gráfica dos trabalhos citados.

QUADRO 2 – Resultados de resistência à compressão obtidos por trabalhos anteriores

Tipo de cimento	a/c	Sementes de C-S-H	Material	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Referência
CP comum	0,45	0	Argamassa	1	9	Kanchanason e Plank (2019)
CP35AC*		0			4	
		2,0%			11	
CP comum		0			12	
CP35E*		0			6	
		2,0%		14		
CP comum		0		57	28	
CP35AC*		0		54		
		2,0%		61		
CP comum	0	62				
CP35E*	0	59		74		
	2,0%	74				
CP comum	0,50	0	Pastas	1	11	John et al. (2019)
		1,0%			28	
		0		28	50	
		1,0%			60	
CP20CV*	0,30	0	Pastas	1	18,87	Szostak e Golewski (2020)
		4,0%			32,41	
		0		28	104,65	
		4,0%			107,28	
CP comum	0,40	0 + 0% PCE	Argamassa	1	15	Wang et al. (2020)
		1,0% + 0,2% PCE			22	
		2,0% + 0,2% PCE			26	

*Cimentos dosados em laboratório para cada pesquisa referenciada.

FONTE: A autora (2023).

2.3.4.2 Porosidade

Alguns trabalhos indicam a possível melhora no desempenho relacionado à durabilidade dos compostos proporcionada pela adição das sementes de C-S-H. Para isso, os autores baseiam-se em indicadores resultantes de ensaios como a porosidade (THOMAS *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2020; HE & LIAO, 2021; WANG *et al.*, 2021). Como já citado, a densificação da estrutura da matriz cimentícia influencia a formação de poros no compósito, assim como visto por He e Liao (2021). Através de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, foi observado uma redução da quantidade de poros nas pastas cimentícias com aditivo de sementes de C-S-H. Para amostras com 7 dias de idade, a quantidade de poros maiores que 200 nm passou de 41,75 para 29,36% para as pastas sem e com 0,75% de aditivo, respectivamente. Tais resultados, aliados a análises de imagens da estrutura dos poros das amostras

estudadas, levaram à conclusão que é possível controlar a dimensão e quantidade desses espaços com o aditivo.

De fato, esse comportamento já havia sido notado por Thomas *et al.* (2009), que correlacionaram a porosidade da pasta cimentícia a ensaios de imagem MEV e a uma simulação computacional do mecanismo de formação dos hidratos na presença do aditivo. Os autores utilizam a ferramenta de simulação para explicar o aparecimento de dois picos de calor liberado na hidratação, observado no ensaio de calorimetria. A partir dos resultados obtidos, comprovou-se a ocorrência de dois processos de formação de hidratos: na superfície e no espaço entre os grãos de clínquer (ou C_3S). Apesar da não utilização de uma técnica consagrada para avaliação da porosidade, como o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, os autores atribuem a tal mecanismo a redução de poros na mistura e salientam que a alteração de seu aparecimento não se restringe apenas à fase inicial do material, mas é mantida até idades mais avançadas.

Wang *et al.* (2020) avaliaram a estrutura de poros formada em pastas cimentícias com adição de 0 a 1,5% de aditivo através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados obtidos permitiram os autores concluir que a inserção das partículas de C-S-H gera diminuição da porosidade total, volume de poros capilares e dimensão máxima dos poros. Assim como Thomas *et al.* (2009), notou-se que a alteração é mantida para idades mais avançadas, sendo que em 28 dias as reduções citadas continuaram sendo observadas.

2.3.4.3 Carbonatação

A redução da porosidade, gerada pela inserção das sementes de C-S-H, pode vir a influenciar no processo de carbonatação dos materiais cimentícios. Apesar de ainda não muito explorada por pesquisadores, a carbonatação acelerada foi citada ao longo de alguns estudos. O tema é brevemente comentado por Morales-Cantero *et al.* (2022) e melhor explorado no trabalho de F. Zhou *et al.* (2021).

Morales-Cantero *et al.* (2022) estudaram o efeito gerado pela adição de 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H em pastas cimentícias com relação à carbonatação dos materiais. Através de um ensaio de termogravimetria, os autores observaram menor perda de massa apresentada pelas pastas aditivadas na faixa de 600 a 800°C, o que atribuem a uma menor ocorrência de carbonatação com relação às

composições de referência. Justificou-se esse fenômeno através do possível efeito de consumo de hidróxido de cálcio, gerado pelas sementes de C-S-H adicionadas à mistura, estimado em porcentagem no mesmo ensaio através do método tangencial.

Já em F. Zhou *et al.* (2021), os autores efetivamente realizaram o ensaio de carbonatação acelerada para avaliar o desempenho de concretos compostos com cinzas volantes e 0,5% de sementes de C-S-H. Observou-se uma redução na frente de carbonatação medida com 1 dia de idade, passando de aproximadamente 4,3 para 3,9 mm para as pastas sem e com aditivo, respectivamente. Dessa forma, concluiu-se que o aditivo atua na redução desse fenômeno, o que foi atribuído pelos pesquisadores à menor porosidade das amostras e à formação de maior quantidade de produtos reagentes com o CO₂, o que leva à diminuição da camada carbonatada.

2.3.4.4 Retração

Outro fenômeno que pode ser influenciado pela alteração da estrutura de poros da matriz é a retração. Xu *et al.* (2020) estudaram a retração química sofrida por pastas cimentícias com 50% de escória com teores de até 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H. Ao realizar o procedimento de ensaio estabelecido pela C1608 (ASTM, 2017), observou-se que, 12 horas após a mistura, as pastas sem aditivo apresentaram retração química equivalente a 0,00266 ml/g, enquanto as pastas com 2,0% chegaram a 0,00433 ml/g. Os autores apontaram que o aumento desse fenômeno indica o efeito de ativação das escórias gerado pelo aditivo.

O aumento da retração química na presença de sementes de C-S-H também foi notado por Li *et al.* (2020), que testaram materiais cimentícios com relação a/c de 0,5 e incorporação de aditivo de sementes de C-S-H de até 2,0%. Os autores observaram maiores valores até 98 horas após a mistura para pastas com maiores teores do aditivo. Além da retração química apresentada pelas pastas cimentícias, a retração por secagem de argamassas também foi explorada no trabalho. Com relação a esse fenômeno, os autores constataram que a incorporação do aditivo de sementes de C-S-H levou à redução dos valores de retração por secagem para todas as idades acompanhadas (3 a 28 dias). Ressalta-se que em casos de menores relações a/c há a tendência de a parcela de retração química ser maior do que a por secagem, já que existe menor quantidade de água livre, ou seja, água não consumida durante a reação de hidratação, assim como observado em F. Zhou *et al.* (2021).

Szostak e Golewski (2020) introduziram o tema de retração por secagem ao relacionar sua possível redução, observada nos corpos de prova aditivados ao longo de 90 dias, com os resultados de calor de hidratação. De acordo com os autores, esse comportamento pode estar ligado ao declínio da quantidade de calor liberada após 16 horas da mistura, em comparação à amostra de referência. Essa hipótese foi confirmada em Szostak e Golewski (2021), em que os autores mediram a variação dimensional de pastas cimentícias com 4,0% de aditivo ao longo de 91 dias. No trabalho, encontrou-se uma redução de até quase 22% na retração por secagem medida ao longo do período analisado entre as pastas com e sem aditivo, que alcançou valores próximos de 1,40 mm/m em 91 dias. Isso também pode ser relacionado à densificação da matriz cimentícia. Tal fenômeno foi observado através de imagens MEV e do aumento de resistência à compressão, passando, em 24 horas, de 18,87 MPa, para as pastas de referência, para 32,41 MPa na presença de 4,0% de aditivo. Assim, foi comprovado o efeito positivo da adição de sementes de C-S-H na retração por secagem sofrida pelas pastas cimentícias estudadas.

F. Zhou *et al.* (2021) também avaliaram a retração por secagem de pastas com esse composto através do acompanhamento das amostras durante 180 dias. Em comparação aos corpos de prova sem aditivo, a retração foi menor ao longo de todo tempo analisado. Os autores atribuíram os resultados aos efeitos gerados pelo aditivo, como o refinamento dos poros da matriz e a aceleração da hidratação inicial dos anidros, que gerou maior consumo de água e, conseqüentemente, menor disponibilidade desse material para perda durante a retração.

Diante dos trabalhos enumerados, é possível perceber que a adição de aditivos de sementes de C-S-H tende a melhorar o desempenho no estado endurecido de compostos cimentícios. De acordo com a literatura, isso é devido aos efeitos de formação de produtos de hidratação nos poros da matriz cimentícia, que leva à redução da porosidade e retração por secagem. Aliado ao fechamento de poros, a alteração da quantidade e estequiometria dos produtos de hidratação também contribui para a redução da carbonatação e retração por secagem dos materiais cimentícios na presença do aditivo. Essa somatória de efeitos gerados pelas sementes de C-S-H pode também contribuir para o aumento da durabilidade dos compostos cimentícios.

2.4 CONCLUSÕES SOBRE A ABORDAGEM BIBLIOGRÁFICA

Diante dos trabalhos revisados é possível perceber que a necessidade da redução das emissões de gases poluentes se tornou não apenas um interesse de estudo, mas uma preocupação em destaque mundial. Com isso, as pressões políticas e econômicas vêm ganhando força, o que altera a comparação simples de preço entre materiais. A precificação sobre as emissões de carbono é cada vez mais presente em discursos internacionais, como em reuniões da ONU, e nacionais, como mais recentemente debatido pelo SNIC. Dessa forma, materiais menos poluentes poderiam se tornar mais interessantes economicamente, mesmo no caso de os insumos de sua composição apresentarem um custo superior quando comparado ao cimento Portland comum.

Nota-se que a indústria do cimento tem progressivamente mostrado mais interesse na busca por soluções ambientalmente menos danosas, tendo alcançado uma redução expressiva nas emissões de CO₂ por tonelada de cimento desde o ano de 1990. Ainda assim, conclui-se que esses avanços não são suficientes para atender os compromissos assumidos por diversos países, entre eles o Brasil, em reuniões sobre as mudanças climáticas. Para tanto, aponta-se medidas mais incisivas, destacando-se a alteração da composição do cimento, através da redução gradual do teor de clínquer no ligante. Essa solução já é aplicada e normatizada no Brasil, apresentando viabilidade técnica e econômica ao incorporar adições minerais em substituição ao clínquer nos cimentos.

Em contrapartida, diversos estudos apontam interferência nas propriedades em idades iniciais dos compostos cimentícios, gerada por essa alteração de composição do ligante. Grande parte dos autores relata atraso do tempo de pega e menores resistências iniciais causadas pela redução do teor de clínquer no cimento. A modificação dessas propriedades é particularmente problemática no cenário atual, em que existe um aumento da demanda por materiais mais reativos, que apresentem justamente essas características nas idades iniciais.

Buscando compensar os efeitos gerados pela redução do teor de clínquer no cimento, pesquisadores utilizaram-se da inserção de nanopartículas para otimizar a hidratação dos grãos de clínquer. Essa medida mostrou-se eficiente para tal finalidade, porém comprovou-se que as reações adicionais geradas na presença de tais materiais poderiam levar à redução da durabilidade das pastas cimentícias.

Nesse contexto, apresenta-se a tecnologia de sementes de C-S-H, um aditivo capaz de otimizar a hidratação do cimento sem a geração de reações secundárias. Dessa forma o aditivo atua na melhora do desempenho inicial dos compostos cimentícios, proporcionando a aceleração do tempo de pega e maior rapidez para o alcance de resistências mecânicas mais elevadas. Assim, essas partículas possibilitam aliar a necessidade de redução do teor de clínquer com a demanda por maior reatividade dos materiais em suas primeiras idades. Os trabalhos revisados indicaram que a efetividade das sementes de C-S-H pode ser ditada por fatores internos e externos ao aditivo. Os primeiros são diretamente ligados ao material adicionado, como: tamanho e geometria das partículas; e sua composição química (teor de cálcio, sílica e água). O desempenho das sementes de C-S-H também dependerá, conforme visto, de fatores que tangem a mistura como um todo, como: teor de aditivo utilizado; quantidade de água adicionada; procedimento de mistura; e composição do cimento.

A alta variação de resultados, gerada pela grande gama de fatores de influência já citados, ao empregar tal aditivo em materiais cimentícios torna difícil a comparação entre valores. Apesar disso, é possível constatar uma tendência de atuação das sementes de C-S-H. Diante da revisão realizada, percebeu-se que grande parte dos trabalhos empregou teores de aditivo na faixa de 1,0 a 4,0% com relação à massa de ligante. Dessa forma, uma aceleração no tempo de pega de 20 a 70% foi notada, assim como uma antecipação do pico de calor de hidratação registrado entre 20 e 80%. Ainda, pôde-se observar uma faixa de aumento nas resistências iniciais (24 horas) entre 20 e 160%. Também se notou que, além dos tempos de pega e resistências iniciais, o aditivo pode influenciar outras propriedades dos compostos cimentícios, como: densificação da microestrutura e redução da porosidade; aumento da viscosidade; redução da retração por secagem e da carbonatação.

Diante disso, é possível concluir a importância da extensão do estudo da incorporação de aditivo de sementes de C-S-H em pastas cimentícias com teores reduzidos de clínquer. De acordo com os trabalhos revisados, essa ação pode possibilitar uma redução do impacto ambiental provocado pela indústria do cimento sem que o desempenho do material seja afetado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

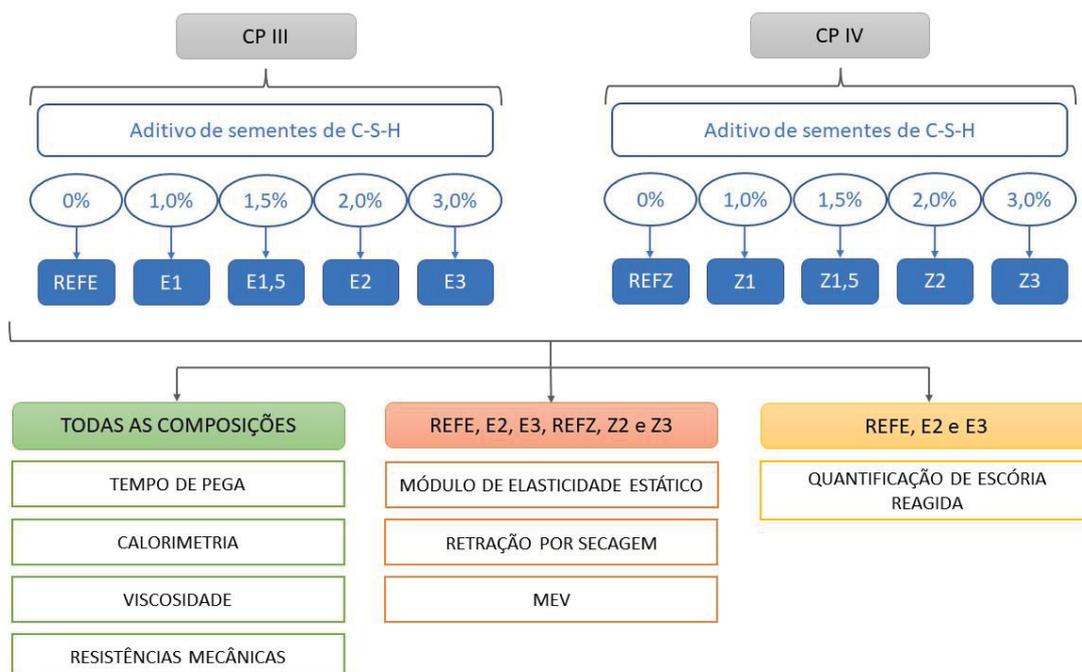
O programa experimental desta pesquisa visou a avaliação do desempenho de pastas cimentícias compostas por dois tipos de cimentos, CP III e CP IV, com cinco teores de adição de aditivo comercial de sementes de C-S-H, de 0,0% a um teor que extrapola o valor recomendado pelo fabricante, de 3,0%.

Para isso, as composições foram submetidas a ensaios no estado fresco e endurecido, além de análises químicas e de imagem. Os ensaios no estado fresco de tempo de pega, calorimetria e viscosidade foram realizados para todas as pastas estudadas, assim como o ensaio de resistências mecânicas (compressão e tração na flexão) no estado endurecido. Por conta de limitação de tempo e material, apenas as pastas de referência (0,0%) e de teores mais elevados (2,0 e 3,0%) foram submetidas a ensaios no estado endurecido, sendo eles: avaliação do módulo de elasticidade estático; e retração por secagem. Adicionalmente, acompanhou-se a hidratação apresentada por essas composições através de ensaios de imagem, com a microscopia de varredura eletrônica (MEV). Além disso, as pastas compostas pelo cimento CP III com 0,0; 2,0 e 3,0% de aditivo acelerador tiveram a quantidade de escória reagida levantada através de ensaio específico por ataque ácido.

Conforme já comentado, o uso de aditivos complementares (antiespumantes e estabilizadores) é recomendado por pesquisadores e pelo fabricante do aditivo de sementes de C-S-H. Essa recomendação visa a redução dos vazios excedentes gerados pelo aditivo de sementes de C-S-H e o aumento da estabilidade da pasta cimentícia, como reforçado em trabalhos como Nicoleau (2011), Li *et al.* (2020) e Pedrosa *et al.* (2020). Diante disso, decidiu-se repetir testes específicos do programa experimental na presença dos aditivos complementares. Assim, tais composições foram submetidas aos ensaios de tempo de pega, resistências mecânicas e retração por secagem. Por conta de limitação de tempo e material, o estudo do comportamento de todas as composições avaliadas na presença dos aditivos complementares não seria viável. Assim, optou-se por aplicar tais insumos nas composições com o maior teor dentro da faixa de recomendação do fabricante do aditivo de sementes de C-S-H (2,0%) para então compará-las às pastas de referência (REFE e REFZ) e de mesmo teor apenas com o aditivo principal (E2 e Z2).

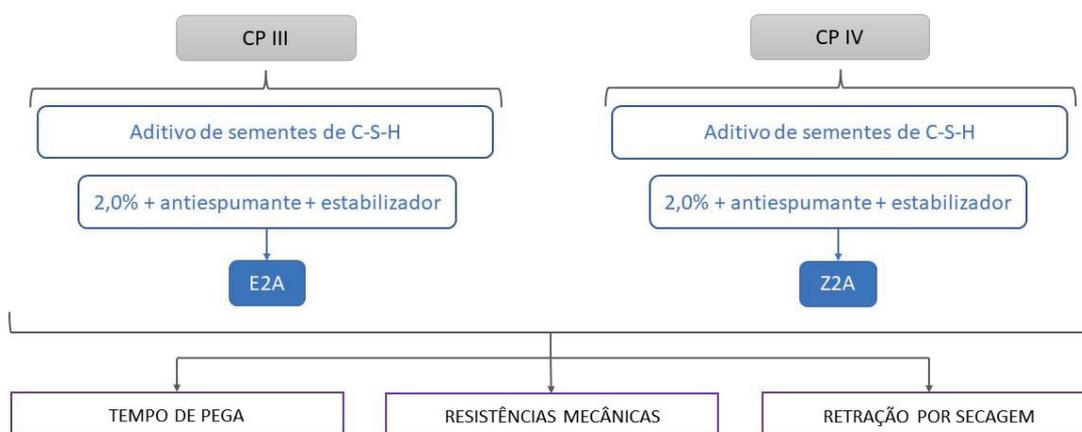
Apresenta-se na Figura 14 e na Figura 15 o esquema ilustrativo dos ensaios realizados para as pastas com apenas aditivo de sementes de C-S-H e para as composições adicionais com os aditivos complementares, respectivamente.

FIGURA 14 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA PASTAS APENAS COM ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H.



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 15 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES



FONTE: A autora (2023).

A seguir, apresenta-se o detalhamento do programa experimental adotado no presente estudo, em que são discriminados os materiais e métodos utilizados para alcançar o objetivo de pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Para realização desta pesquisa, utilizou-se dois tipos de cimentos comercializados no Brasil em conjunto com um aditivo de sementes de C-S-H em pó, também disponível no mercado do setor. Por conta de recomendação feita tanto pelo fabricante do aditivo de sementes de C-S-H quanto por trabalhos revisados, avaliou-se também o emprego conjunto de aditivos complementares (aditivos antiespumante e estabilizador) em algumas composições, como detalhado na sequência. As especificações desses insumos são apresentadas a seguir.

3.1.1 Cimentos

A composição química do cimento gera grande influência na atuação das sementes de C-S-H adicionadas à pasta. Tendo isso em vista, os dois tipos de cimento ensaiados foram adquiridos do mesmo fabricante, para garantir a mesma procedência do clínquer contido no material. Como a proposta deste estudo é avaliar cimentos com baixo teor deste composto, selecionou-se os materiais disponíveis no mercado que melhor atendem esse requisito: o CP III e CP IV. A seguir, são apresentadas as especificações químicas (Tabela 2) e físicas (Tabela 3) dos ligantes estudados:

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES QUÍMICAS DOS CIMENTOS

Cimento	PF	MgO	SO ₃	RI	Adição mineral
CPIII 40 RS	2,70%	4,09%	3,00%	0,78%	52,0% EGAF
CPIV 32 RS	4,89%	5,23%	2,63%	23,30%	23,0% CV

FONTE: O fabricante (2022).

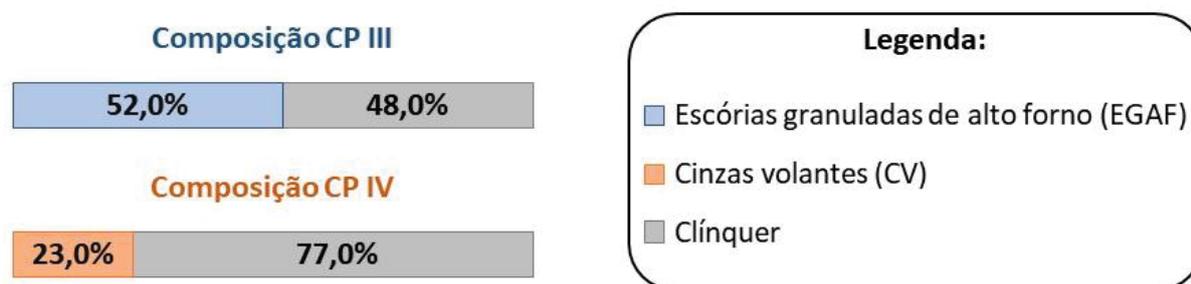
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS

Cimento	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Água de consist. (%)	Tempo de pega (min)		Expansib. a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)		
	#200	#400			Início	Fim		3 d	7 d	28 d
CPIII	0,18	1,29	5113	32,50	201,0	276,0	0,0	24,1	36,6	53,5
CPIV	0,51	3,39	4811	29,86	271,5	337,5	0,0	23,8	29,4	41,2

FONTE: O fabricante (2022).

Os valores de adição presentes em cada tipo de cimento assemelham-se aos observados nas pesquisas da literatura, em que é comum o uso de aproximadamente 50% de escórias granuladas de alto forno e 20% de cinzas volantes. Assim, a partir da Tabela 2 é possível notar que os cimentos utilizados nesta pesquisa apresentam diferentes quantidades de clínquer, sendo o teor desse composto maior no cimento CP IV. Essa relação entre quantidade de clínquer e adições minerais para cada tipo de cimento é demonstrada na Figura 16:

FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS



FONTE: A autora (2023).

3.1.2 Aditivo de sementes de C-S-H

O aditivo acelerador utilizado ao longo do programa experimental deste trabalho é composto por silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Sua comercialização e aplicação é feita na forma de pó, não necessitando o preparo prévio de uma solução aquosa para seu emprego. A seguir, mostra-se na Tabela 4 as especificações e recomendações fornecidas pelo fabricante do produto:

TABELA 4 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H

Geometria das partículas de C-S-H	Dimensões das partículas de C-S-H (nm)		Perda na secagem	Massa específica (kg/m ³)	pH*	Teor de cloreto e nitrato	Dosagem recomendada com relação à massa de cimento (%)
	Comprimento	Altura					
Coloidal	20,0	1,5	< 2,0%	600 a 1000	11,5 a 13,0	0,0%	0,5 a 2,0

*A 20°C, 20% em água

FONTE: O fabricante (2022).

3.1.3 Aditivo complementares

Para ensaios específicos, aditivos complementares (antiespumante e estabilizador) foram empregados juntamente com o aditivo de sementes de C-S-H. Tais materiais foram empregados na forma de pó, tendo sido aplicados diretamente nas misturas, assim como o aditivo de sementes de C-S-H. As especificações técnicas, fornecidas pelo fabricante, de ambos os produtos são apresentadas na Tabela 5 (aditivo antiespumante) e Tabela 6 (aditivo estabilizador):

TABELA 5 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO ANTIESPUMANTE

Forma Física	Perda na secagem	Massa específica (kg/m³)	pH*	Dosagem recomendada com relação à massa de cimento (%)
Em pó	< 4,0%	650 a 850	7,0 a 9,0	0,05 a 0,50

*A 20°C, 10% em água

FONTE: O fabricante (2022).

TABELA 6 – FICHA TÉCNICA DO ADITIVO ESTABILIZADOR

Forma Física	Perda na secagem	Massa específica (kg/m³)	pH*	Dosagem recomendada com relação à massa de cimento (%)
Em pó	< 4,0%	750 a 1050	8,0 a 11,0	0,01 a 0,50

*A 20°C, 2,0% em água

FONTE: O fabricante (2022).

3.2 MÉTODO

Para atender o objetivo proposto neste trabalho, quatro teores de aditivo de sementes de C-S-H foram incorporados em dois tipos de cimentos, comparando-se os resultados aos apresentados pelas pastas de referência de ambos os cimentos, sem aditivos. De forma a compreender os efeitos da adição desse material, análises referentes aos estados fresco e endurecido foram conduzidas. As formulações avaliadas, bem como os ensaios propostos, são elencadas a seguir.

3.2.1 Formulações avaliadas

A quantidade de água utilizada para todas as pastas estudadas foi baseada na relação a/c necessária para a obtenção da pasta de consistência normal, determinada de acordo com o procedimento descrito pela NBR 16606 (ABNT, 2018).

Dessa forma, determinou-se, através de duas repetições para cada tipo de cimento, a massa de água que permita a entrada da sonda de *Tetmajer* até uma distância de 6 mm da placa base. Para todos os ensaios o valor resultou em uma quantidade de 150 g de água para 500 g de cimento, correspondendo a uma relação a/c de 0,3 para ambos os cimentos.

Essa relação foi mantida constante para todas as formulações testadas, buscando-se empregar baixa quantidade de água nas misturas desta pesquisa, tendo em vista a otimização desse recurso natural e a avaliação da atuação dos materiais nesse contexto. A relação a/c estudada, de 0,3, é semelhante à adotada pelos trabalhos de Wang *et al.* (2020), Szostak e Golewski (2020), Wang *et al.* (2021), Szostak e Golewski (2021), He e Liao (2021) e Z. Zhou *et al.* (2021) e condizente ao valor indicado pelo fabricante dos cimentos para obtenção da pasta de consistência normal, determinada de acordo com o procedimento especificado pela NBR 16606 (ABNT, 2018).

Assim, as composições de pastas cimentícias ensaiadas neste trabalho são mostradas na Tabela 7. Como já mencionado, optou-se por estudar quatro teores de adição de aditivo de sementes de C-S-H, sendo eles baseados nos valores mais utilizados na literatura que, conforme apresentado anteriormente, variam de 1,0 a 2,0% de adição com relação à massa do ligante. Além de dados de trabalhos anteriores, levou-se em consideração a faixa de adição recomendada pelo fabricante do aditivo (0,5 a 2,0%).

Assim, os teores estudados no presente trabalho foram de 1,0; 1,5 e 2,0% de aditivo com relação à massa de cimento. Além dos valores inseridos dentro da faixa de recomendação do fabricante, testou-se um teor de extrapolação do valor máximo sugerido de aditivo de sementes de C-S-H. Como os valores mais usuais na literatura situam-se em uma faixa de até 4,0%, teores de 3,0 e 4,0% foram avaliados. O teor de extrapolação foi empregado com intuito de chegar-se a um ponto de saturação em que a quantidade adicionada não gere mais efeitos positivos para as pastas ensaiadas.

TABELA 7 – COMPOSIÇÕES DAS PASTAS CIMENTÍCIAS ESTUDADAS

Código	Tipo de cimento	Quantidade de cimento (g)	a/c	Quantidade de água (g)	Teor de aditivo de sementes de C-S-H (%)	Quantidade de aditivo de sementes de C-S-H (g)
REFE	CP III	100	0,30	30	0,0	0,0
E1		100		30	1,0	1,0
E1,5		100		30	1,5	1,5
E2		100		30	2,0	2,0
E3*		100		30	3,0	3,0
REFZ	CP IV	100	0,30	30	0,0	0,0
Z1		100		30	1,0	1,0
Z1,5		100		30	1,5	1,5
Z2		100		30	2,0	2,0
Z3*		100		30	3,0	3,0

*Teores de extrapolação.

FONTE: A autora (2023).

Apesar de existirem pesquisas como Land e Stephan (2015), Szostak e Golewski (2020), Pedrosa *et al.* (2020) e Gu *et al.* (2022), em que valores iguais ou superiores a 4,0% foram avaliados, o uso de tal quantidade se mostrou inaplicável nas condições avaliadas na presente pesquisa. As pastas cimentícias com teor de 4,0% de aditivo mostraram-se extremamente fluidas, o que tornou a realização dos ensaios impraticável. Atribui-se tal comportamento à presença de éter policarboxilato (PCE), utilizado em aditivos comerciais com o fim de auxiliar a trabalhabilidade, alterada pelas sementes de C-S-H, dos materiais cimentícios com o aditivo, assim retomado em Kanchanason e Plank (2015), Pizon *et al.* (2016), SUN *et al.* (2017), Kanchanason e Plank (2018) e Li *et al.* (2022). Por essa razão, o teor de extrapolação foi estabelecido em 3,0%, que tornou viável a execução dos ensaios viável, apesar de apresentar maior fluidez em comparação com as outras dosagens testadas.

As formulações adicionais, na presença de aditivos complementares, foram determinadas com base nas recomendações do fabricante e de acordo com o utilizado por Li *et al.* (2022). Assim, os ensaios enumerados anteriormente foram repetidos para ambos os cimentos com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H, 0,10% de antiespumante e 0,11% de estabilizador. Tais composições foram denominadas E2A e Z2A para os cimentos CP III e CP IV, respectivamente e são expostas na Tabela 8:

TABELA 8 – COMPOSIÇÕES DAS PASTAS CIMENTÍCIAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Tipo de cimento	a/c	Teor de aditivo de sementes de C-S-H (%)	Teor de aditivo antiespumante (%)	Teor de aditivo estabilizador (%)
E2A	CP III	0,30	2,00	0,10	0,11
Z2A	CP IV	0,30	2,00	0,10	0,11

FONTE: A autora (2023).

3.2.2 Procedimento de mistura das pastas cimentícias

O procedimento de mistura utilizado para obtenção das pastas estudadas foi padronizado para todos os ensaios especificados na sequência, sem exceção. Essa etapa foi baseada na sequência especificada pela NBR 16606 (ABNT, 2018), para obtenção da pasta de consistência normal. Salienta-se que o misturador utilizado segue os padrões especificados pelo documento, com velocidades alta e baixa de acordo com os valores estabelecidos pela norma. Dessa forma, seguiu-se a seguinte sequência:

1. Verte-se toda a quantidade de água cuba;
2. Adiciona-se os materiais secos (cimento e aditivo, quando houver) e deixa-se repousar durante 30 segundos (s);
3. Mistura-se os materiais em velocidade baixa durante 30 s;
4. Desliga-se o misturador durante 60 s e efetua-se a raspagem manual da cuba nos primeiros 30 s; e
5. Mistura-se os materiais na velocidade alta durante 60 s.

3.2.3. Resumo do Programa Experimental

O programa experimental desta pesquisa foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) da UFPR, com exceção dos ensaios de: calorimetria, realizado em um laboratório comercial externo em São Paulo; viscosidade, realizado no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR; microscopia eletrônica (MEV), realizado no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR; e determinação da quantidade de escória reagida, realizado no Laboratório de Processos e Projetos Ambientais (LABPPAM), no departamento de química da UFPR. Estas informações são resumidas na Tabela 9:

TABELA 9 – LABORATÓRIOS PARA REALIZAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ensaio	Laboratório (Universidade)
Tempo de Pega	LaME (UFPR)
Resistências mecânicas	LaME (UFPR)
Módulo de elasticidade estático	LaME (UFPR)
Retração por secagem	LaME (UFPR)
Calorimetria	Laboratório externo
Viscosidade	LAMP (UFPR)
MEV	CME (UFPR)
Escória reagida	LABPPAM (UFPR)

FONTE: A autora (2023).

O programa experimental é resumido na Tabela 10, em que são apresentados os ensaios realizados, composições testadas, idades avaliadas e número de amostras por ensaio. Ensaio como resistências mecânicas (compressão e tração na flexão), módulo de elasticidade estático, retração por secagem, quantidade de escória reagida e imagens MEV foram realizados até a idade de 91 dias. Esse tempo foi estabelecido com base nas pesquisas revisadas e com a intenção de acompanhar o efeito do aditivo de sementes de C-S-H em idades mais avançadas das pastas avaliadas.

TABELA 10 – RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ensaio	Composições	Idades (dias)	Amostras para cada idade
Tempo de pega	REFE; E1; E1,5; E2; E3; REFZ; Z1; Z1,5; Z2; Z3	Após a mistura	3
Calorimetria	REFE; E1; E1,5; E2; E3; REFZ; Z1; Z1,5; Z2; Z3	0 - 2	1
Viscosidade	REFE; E1; E1,5; E2; E3; REFZ; Z1; Z1,5; Z2; Z3	Após a mistura	3
Resist. mec.	REFE; E1; E1,5; E2; E3; REFZ; Z1; Z1,5; Z2; Z3	1; 7; 28; 91	6
Módulo E estático	REFE; E2; E3; REFZ; Z2; Z3	1; 28; 91	2
Retração	REFE; E2; E3; REFZ; Z2; Z3	1; 7; 14; 28; 91	3
Escória reagida	REFE; E2; E3	1; 28; 91	1
MEV	REFE; E2; E3; REFZ; Z2; Z3	28; 91	1

FONTE: A autora (2023).

Adicionalmente, de forma a controlar os possíveis efeitos consequentes do uso do aditivo de sementes de C-S-H, ensaios específicos foram repetidos na presença dos aditivos complementares. Para esses casos, a presença de três aditivos foi testada: aditivo de sementes de C-S-H; aditivo antiespumante; e aditivo estabilizador. Como a possível separação de fases e a formação de vazios excedentes na pasta cimentícia durante a mistura são os principais efeitos a serem controlados pelos aditivos complementares, buscou-se repetir os ensaios que melhor refletissem esses efeitos. Dessa forma, propôs-se realizar os testes de tempo de pega, resistências mecânicas (para as idades de 1, 7 e 28 dias) e de retração por secagem (até 28 dias) na presença dos aditivos antiespumante e estabilizador, conforme resumido na Tabela 11:

TABELA 11 – ENSAIOS REPETIDOS PARA AS PASTAS ADICIONAIS

Ensaio	Composições	Idades (dias)	Amostras para cada idade
Tempo de pega	E2A; Z2A	Após a mistura	3
Resist. mec.	E2A; Z2A	1; 7; 28	3
Retração	E2A; Z2A	1; 7; 14; 28	3

FONTE: A autora (2023).

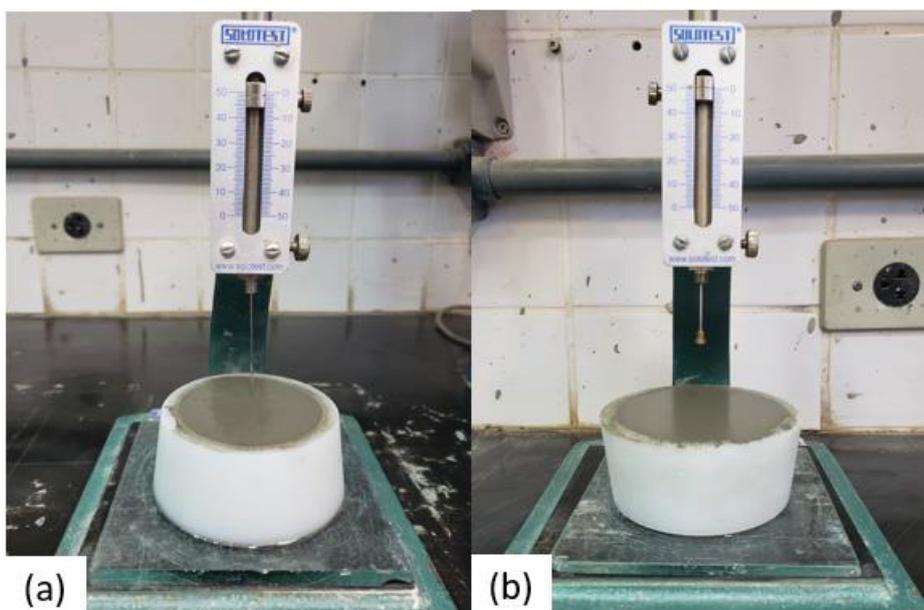
3.2.4 Desempenho da pasta cimentícia no estado fresco

3.2.4.1 Tempo de pega

O ensaio de tempo de pega foi realizado para todas as composições analisadas de acordo com a norma NBR 16607 (ABNT, 2018), com a utilização do aparelho de Vicat. Os tempos de início e fim de pega foram determinados através do uso das agulhas correspondentes, com leituras realizadas a cada 10 e 30 minutos, respectivamente.

Para garantir resultados confiáveis, realizou-se duas leituras para cada amostra, que permaneceram em ambiente controlado de laboratório ao longo de todo o ensaio. Na Figura 17 são apresentadas as amostras no aparelho de Vicat com as agulhas de início (a) e fim de pega (b):

FIGURA 17 – ENSAIO DE TEMPOS DE PEGA

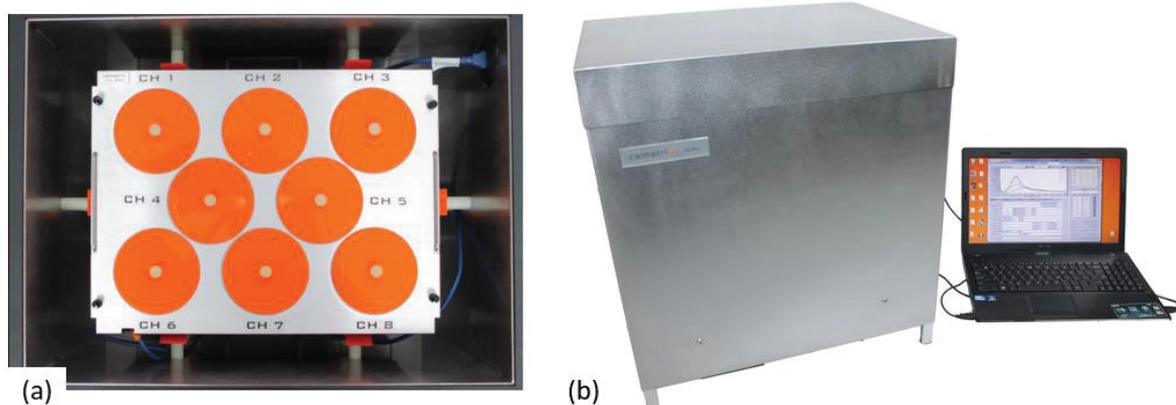


LEGENDA: Aparelho de Vicat com agulhas de: (a) início de pega; (b) fim de pega.
FONTE: A autora (2023).

3.2.4.2 Calor de hidratação

Com intuito de verificar o comportamento calorífico do cimento e relacioná-lo à aceleração de sua hidratação, proporcionada pela inserção do aditivo de C-S-H, ensaios de calorimetria foram realizados para todas as dosagens estudadas. Para isso, utilizou-se o calorímetro isotérmico Calmetrix de modelo ICAL 800 HPC, mostrado na Figura 18:

FIGURA 18 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE CALORIMETRIA



LEGENDA: Calorímetro ICAL 800 HPC: (a) vista interna superior; (b) conectado a aquisitor de dados.
FONTE: CALMETRIX (2022).

Esse equipamento adiabático permite monitorar a liberação de calor durante a hidratação das pastas ensaiadas ao longo do tempo, através do envio dos dados lidos para um aquisitor nele conectado. Dessa forma, o resultado do ensaio é representado na forma de uma curva dada em função da taxa de calor liberada pelo tempo decorrido, como mostrado na Figura 10 (item 2.3.2.1) e na Figura 11 (item 2.3.2.2). Assim, o calor de hidratação liberado pelas pastas estudadas foi monitorado durante 30 horas pelo calorímetro mostrado. A escolha e forma de interpretação do ensaio foram estabelecidos com base na literatura, como observado nos trabalhos Thomas *et al.* (2009), Kanchanason e Plank (2015) e John *et al.* (2019). Os resultados obtidos foram interpretados com o auxílio da curva de calor de hidratação segmentada em cinco períodos sugerida por Gartner *et al.* (2002).

3.2.4.3 Viscosidade

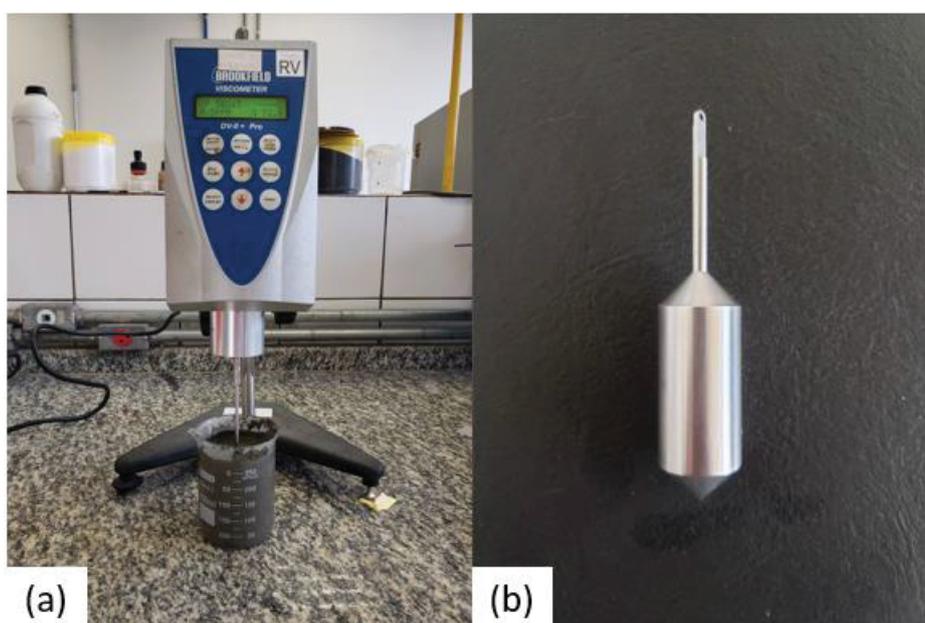
Para verificar a alteração de viscosidade nas pastas, causada pela adição do aditivo, uma adaptação do procedimento recomendado pela norma NBR 15184 (ABNT, 2021) foi seguida. O documento especifica a determinação dessa propriedade para materiais betuminosos em temperaturas elevadas, utilizando um viscosímetro rotacional com velocidade constante. As adaptações feitas neste trabalho foram relacionadas ao material (pastas cimentícias) e à temperatura de ensaio, valor controlado do laboratório, de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, conforme especificado pela norma de ensaio para pasta cimentícia, NBR 16606 (ABNT, 2018).

Para tanto, três amostras de cada teor estudado foram ensaiadas e os respectivos valores de viscosidade, medidos em centipoise (cP) e convertidos para a medida no Sistema Internacional de Unidades (Pa.s), e torque, em %, anotados após 5 minutos de ensaio de cada pasta, como recomendado pela NBR 15184. A velocidade, de 5 rotações por minuto (rpm), foi mantida constante durante todo o ensaio para todas as amostras. O seu valor foi definido experimentalmente, possibilitando que o esforço exercido pelo equipamento permanecesse na faixa entre 10 e 98%, conforme recomendado pela norma e pelo fabricante do dispositivo.

O viscosímetro utilizado durante o programa experimental foi o modelo Brookfield DV-II+PRO, disponibilizado pelo Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A haste utilizada foi a mesma selecionada no trabalho de Costa (2006), de código N021,

dada a proximidade de comportamento entre as argamassas colantes testadas pela autora e as pastas cimentícias da presente pesquisa. A seguir, a Figura 19 apresenta o equipamento (a) e a haste (b) utilizados para determinação da viscosidade dos materiais estudados:

FIGURA 19 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE VISCOSIDADE



LEGENDA: (a) viscosímetro de Brookfield; (b) geometria da haste N021.
FONTE: A autora (2023).

3.2.5 Desempenho da pasta cimentícia no estado endurecido

Na presente pesquisa, também se avaliou o desempenho das pastas cimentícias em seu estado endurecido, como discriminado a seguir:

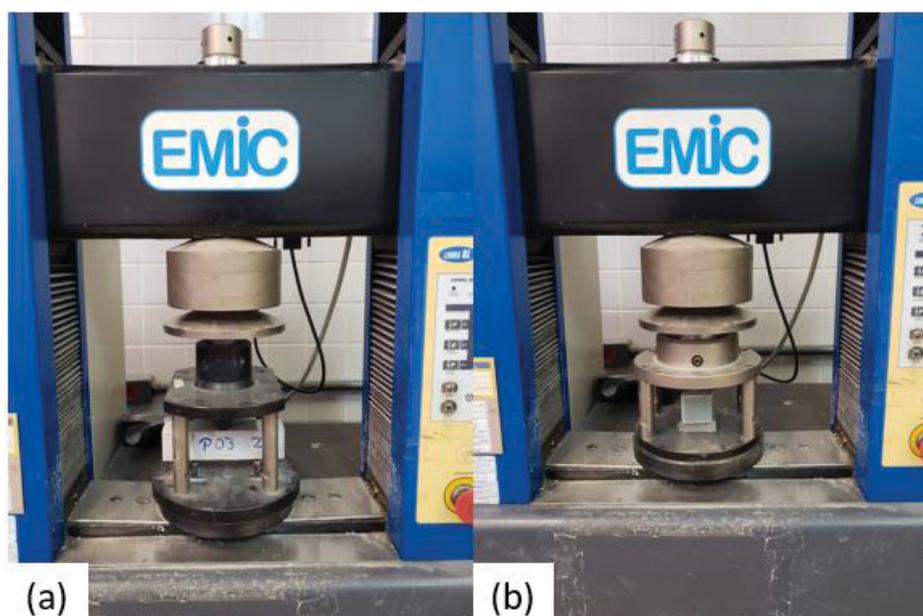
3.2.5.1 Resistências à tração na flexão e compressão

A norma NBR 7215 (ABNT, 2019) refere-se à avaliação do comportamento mecânico de pastas cimentícias, especificando o procedimento de ensaio para verificação da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos. Entretanto, este trabalho objetivou avaliar o desempenho das amostras, visando possíveis aplicações para tais materiais. Por isso, considerou-se necessário avaliar não somente o comportamento referente à resistência à compressão, como também à tração na flexão desses materiais. Tal consideração também foi levantada por

Szostak e Golewski (2020), que verificaram ambas as resistências para as pastas cimentícias estudadas através de corpos de prova prismáticos de (4 x 4 x 16) cm.

Dessa forma, adaptou-se o procedimento indicado para argamassas, descrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005), para as pastas cimentícias desenvolvidas. Assim, tomou-se primeiramente os valores de resistência à tração na flexão e depois de compressão nas metades resultantes do ensaio, conforme determinado pelo documento citado. Os corpos prismáticos de (4 x 4 x 16) cm foram desmoldados com 24 horas e mantidos em ambiente controlado de laboratório até as idades de ruptura. Na Figura 20 são apresentados os posicionamentos das amostras para ensaio de resistência da tração na flexão (a) e compressão (b):

FIGURA 20 – PRENSA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS



LEGENDA: Posição de ruptura do corpo de prova: (a) ensaio de tração na flexão; (b) ensaio de compressão.

FONTE: A autora (2023).

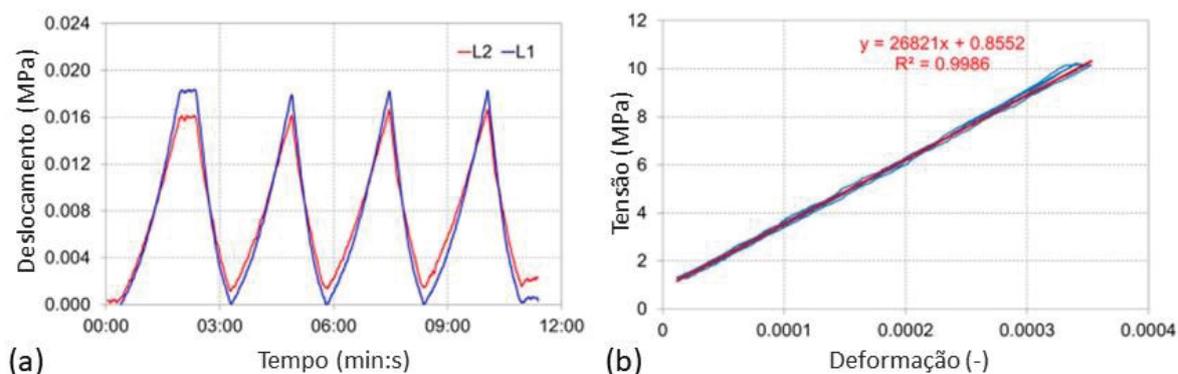
Conforme visto no capítulo 2, o principal efeito da adição de sementes de C-S-H ocorre nas primeiras idades da pasta cimentícia. Alguns estudos, entretanto, encontraram alterações de resistência em idades mais avançadas. Além disso, o fato do uso de cimentos com teores elevados de adições também torna interessante o acompanhamento do comportamento mecânico apresentado pelas composições estudadas ao longo do tempo. Diante dessas considerações, selecionou-se quatro idades para medição das resistências citadas, sendo elas de: 1; 7; 28; e 91 dias. Para

garantir representatividade dos resultados, seis corpos de prova foram moldados para cada composição em cada idade, totalizando 240 amostras referentes a esse ensaio.

3.2.5.2 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade estático das pastas estudadas foi avaliado através do método proposto por Marques *et al* (2020). O ensaio foi realizado com auxílio da mesma prensa utilizada para verificação do comportamento mecânico, em corpos de prova de mesma geometria (prismáticos de 4 x 4 x 16 cm). O procedimento descrito pelos autores consiste na realização de três ciclos de carga de compressão (Figura 21a), aplicada a uma taxa de velocidade de 0,375 mm/min. Após esse procedimento, calcula-se a curva média de carregamento, excluindo-se os dados próximos ao momento de inversão entre cada ciclo. De acordo com os autores, esses valores costumam representar uma variação de 5% da carga aplicada. Por fim, através de uma regressão linear dos dados calculados, obtém-se a reta que representa a curva tensão x deformação (Figura 21b).

FIGURA 21 – CURVAS RESULTANTES DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO



LEGENDA: (a) ciclagem de carga de compressão; (b) curva média tensão x deformação.
 FONTE: MARQUES *et al.* (2020).

Conforme exposto no trabalho, a utilização da Lei de Hooke indica que a inclinação da reta tensão x deformação será o valor do módulo estático. Na presente pesquisa, esse valor foi obtido para duas amostras das composições de referência e maiores teores de aditivo, ou seja, REFZ, Z2, Z3, REFE, E2 e E3 para as idades de 24 horas, 28 e 91 dias.

3.2.5.3 Retração por secagem

A retração por secagem foi verificada para as mesmas composições ensaiadas no ensaio anteriormente descrito (REFZ, Z2, Z3, REFE, E2 e E3). Seguiu-se o procedimento determinado pela NBR 15261 (ABNT, 2005), moldando três corpos de prova de (25 x 25 x 285) mm para cada pasta.

As medidas de variação de comprimento e massa foram tomadas para as idades de 1, 7, 14, 28 e 91 dias após a desmoldagem, feita 48 horas após a mistura dos materiais. Para isso, utilizou-se um aparelho comparador de comprimento acoplado a um relógio comparador com precisão de 1 µm e uma balança com precisão de 0,01 g, conforme especificado pela norma.

3.2.6. Análise química da pasta em estado endurecido

3.2.6.1 Quantificação de escória reagida

A quantidade de escória reagida foi avaliada para as pastas compostas pelo cimento CP III. Ressalta-se que a literatura não apresenta alternativa semelhante para a avaliação da interação do aditivo com as cinzas volantes, presentes no cimento CP IV, por isso essa caracterização química foi realizada apenas para o cimento com escória. Dessa forma, os valores referentes às composições REFE, E2 e E3 foram tomados para as idades de 24 horas, 28 e 91 dias. Esse parâmetro foi obtido através do uso de solução EDTA, assim como em Lumley *et al.* (1996) e Xu *et al.* (2020). O método consiste na imersão de porções das amostras de pasta cimentícia na solução ácida, que dissolverá os hidratos, restando apenas a porção de escória não reagida. O ensaio será realizado conforme especificado por Lumley *et al.* (1996):

Dissolve-se 93 g de dissódio de EDTA 2H₂O em uma mistura de 250 ml de trietanolamina e 500 ml de água. Em seguida, transfere-se a solução para um recipiente com medição volumétrica, que já conterá 173 ml de dietilamina. Por fim, adiciona-se água até que a marca de 1000 ml seja alcançada. Para realização do ensaio, 50 ml da solução descrita são dissolvidos em 800 ml de água.

Adiciona-se, à solução dissolvida de 850 ml, 0,5 g de pasta de cimento endurecida com idade correspondente ao ensaio. O conjunto é agitado durante duas horas e em seguida é filtrado à vácuo com um filtro Whatman GF/C de 90 mm de

diâmetro, previamente pesado. O resíduo é então lavado cinco vezes com 10 ml de água destilada e seco em estufa a 105°C. Após 1 hora, pesa-se o material restante no conjunto. Os resultados obtidos pelo ensaio realizado no LABPPAM (UFPPR) foram utilizados na equação (1), apresentada no trabalho de Xu *et al.* (2020):

$$R_s(\%) = \frac{P\% \times W_s - W_r}{P\% \times W_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

R_s – Porcentagem de escória no cimento;

R_s – Porcentagem de escória reagida;

W_s – Peso da pasta de cimento endurecida;

W_r – Peso escória não dissolvida seca;

3.2.6.2 Microscopia eletrônica de varredura

Para acompanhar a formação de produtos de hidratação com os diferentes teores de adição do aditivo, imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas. Para isso, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 450 FEG, equipamento disponível no laboratório Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR.

Por limitação de tempo e material, foram obtidas imagens apenas referentes às composições REFZ, Z2, Z3, REFE, E2 e E3. As idades das amostras testadas foram de 28 e 91 dias, para acompanhar a evolução da formação dos produtos de hidratação na presença de diferentes teores do aditivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir dos ensaios detalhados no programa experimental desta pesquisa são apresentados a seguir.

4.1 TEMPO DE PEGA

Os valores registrados referentes ao início (Ti) e fim (Tf) de pega de todas as composições são apresentados na Tabela 12, bem como suas médias acompanhadas dos respectivos valores de desvio padrão. Os dados encontrados foram verificados através de análise de variância (Apêndices A e B), a qual apontou diferença entre os teores testados.

TABELA 12 – TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Tipo de cimento	Medição 1 (h)		Medição 2 (h)		Média ± Dp (h)	
		Ti	Tf	Ti	Tf	Ti ± Dp	Tf ± Dp
REFE	CP III	3,15	7,23	2,88	7,05	3,02 ± 0,13	7,14 ± 0,09
E1		2,55	5,88	2,23	6,32	2,39 ± 0,16	6,10 ± 0,22
E1,5		2,50	5,17	2,20	5,62	2,35 ± 0,15	5,39 ± 0,23
E2		2,12	5,20	2,07	4,73	2,09 ± 0,02	4,97 ± 0,23
E3		1,72	5,55	1,62	4,53	1,67 ± 0,05	5,04 ± 0,51
REFZ	CPIV	4,02	6,68	3,88	6,38	3,95 ± 0,07	6,53 ± 0,15
Z1		3,23	6,07	3,23	5,90	3,23 ± 0,00	5,98 ± 0,08
Z1,5		3,00	5,83	2,87	5,70	2,93 ± 0,07	5,77 ± 0,07
Z2		2,20	4,70	2,30	4,63	2,25 ± 0,05	4,67 ± 0,03
Z3		2,03	5,53	1,90	5,23	1,97 ± 0,07	5,38 ± 0,15

FONTE: A autora (2023).

É possível perceber a tendência, seguida por ambos os cimentos, de aceleração dos tempos de início e fim de pega com o aumento do teor de aditivo incorporado até o teor de 2,0%. Para as pastas de cimento CP III, os valores médios de tempos de início e fim de pega das composições de referência foram acelerados em 0,93 e 2,17 horas ao adicionar 2,0% do aditivo estudado. De forma semelhante, as pastas de referência de cimento CP IV apresentaram aceleração de 1,70 e 1,86 horas para, respectivamente, a média de tempos de início e fim de pega na presença de 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H.

Esse mesmo comportamento é observado para o tempo de início de pega para o teor de extrapolação, que apresentou uma aceleração de 1,35 horas para o cimento com escórias e de 1,98 horas para o cimento com cinzas volantes, com

relação às respectivas pastas de referência. No caso do tempo de fim de pega, nota-se uma aceleração da propriedade proporcionada pelo teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H para os cimentos CP III e CP IV de 2,10 e 1,15 horas com relação às pastas de referência. Porém, os valores de aceleração apresentados pelas pastas cimentícias com tal teor são menores do que os referentes às pastas com 2,0%. Isso indica uma menor eficiência de aceleração do processo de hidratação dos cimentos apresentada pelo teor de extrapolação frente ao teor de 2,0%.

A aceleração dos tempos de início e fim de pega, observada no ensaio, corresponde ao comportamento reportado na literatura (LAND & STEPHAN, 2018; LI *et al.*, 2020; Z. ZHOU *et al.*, 2021; PIZON *et al.*, 2022). É possível justificar esse fenômeno através da ação de nucleação das partículas na mistura causada pela presença do aditivo. Assim como salientado por John *et al.* (2018) e Wang *et al.* (2021), o uso de sementes de C-S-H leva à possível redução da camada de inibição ao redor dos grãos de clínquer, otimizando sua hidratação. Dessa maneira, uma diminuição dos períodos de indução e dormência é esperada, sinalizando a aceleração da hidratação sofrida pela pasta cimentícia.

De forma a verificar o efeito de cada teor empregado com relação às pastas sem aditivos, mostra-se na Tabela 13 a comparação entre os tempos de início e fim de pega registrados para as composições aditivadas e a composição de referência de cada cimento:

TABELA 13 – COMPARAÇÃO DE TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Tipo de cimento	Média (h)		Diferença* (h)		Diferença* (%)	
		Ti	Tf	Ti	Tf	Ti	Tf
REFE	CP III	3,02	7,14	-	-	-	-
E1		2,39	6,10	0,63	1,04	20,7	14,6
E1,5		2,35	5,39	0,67	1,75	22,1	24,5
E2		2,09	4,97	0,93	2,18	30,7	30,5
E3		1,67	5,04	1,35	2,10	44,8	29,4
REFZ	CPIV	3,95	6,53	-	-	-	-
Z1		3,23	5,98	0,72	0,55	18,1	8,4
Z1,5		2,93	5,77	1,02	0,77	25,7	11,7
Z2		2,25	4,67	1,70	1,87	43,0	28,6
Z3		1,97	5,38	1,98	1,15	50,2	17,6

*Com relação às referências (REFE e REFZ).

FONTE: A autora (2023).

Diante dessa análise comparativa, nota-se a efetividade do aditivo de sementes de C-S-H no tempo de pega das pastas estudadas. Para os teores dentro da faixa recomendada pelo fabricante (até 2,0%), o cimento CP III apresentou uma

aceleração próxima de 30%, para os tempos de início e fim de pega. Já os valores correspondentes ao cimento CP IV registraram aceleração de até 43,0% para início e até 28,6% para fim de pega.

Entretanto, nota-se que, para ambos os cimentos, os valores de tempo de início de pega das composições com 1,0 e 1,5% de aditivo de sementes de C-S-H foram muito próximos entre si. Para o cimento com escórias, a diferença do efeito no tempo de início de pega entre as pastas E1 e E1,5 não é relevante, estando próxima de 20% com relação à referência. Em contrapartida, tais teores apresentam diferença relevante entre os valores de tempo de fim de pega, podendo chegar até 24,5% com relação a REFE. A ocorrência desse efeito pode estar relacionada ao maior tempo decorrido para medição de tal parâmetro. Dessa forma, a redução do tempo de dormência, que já se torna mais evidente, é favorecida por maiores teores de aditivo assim como levantado por Land e Stephan (2018).

No caso do CP IV, as pastas com 1,5% de aditivo demonstram maior aceleração de tempo de início de pega frente as com 1,0%. Assim, tais composições apresentaram aumento de até 25,7% com relação a REFZ. A aceleração do tempo de fim de pega apresenta aumento gradual, em consonância com o incremento de quantidade de aditivo adicionada. No caso desse aglomerante, nota-se uma diferença mais expressiva entre os resultados referentes aos teores de 1,5 e 2,0% para início e fim de pega.

Com relação ao teor de extrapolação, de 3,0%, percebe-se desempenho mais efetivo para o cimento CP III, onde obteve uma aceleração de tempo de início de pega (44,8%) maior do que o teor de 2,0% (30,7%). Para o tempo de fim de pega, o teor já apresenta um comportamento próximo do observado com 2,0% com uma aceleração de 29,4% com relação à pasta de referência para 3,0%. Para o cimento CP IV, essa aceleração também foi percebida apenas para o tempo de início de pega, que mostrou um aumento de 50,2% com relação à pasta de referência. A diferença entre REFZ e as pastas com 3,0% de aditivo (17,6%) foi menor para o tempo de fim de pega quando comparada aos valores de Z2 (28,6%).

O comportamento também pode ser compreendido através da representação gráfica dos tempos de início e fim de pega em função do teor de aditivo utilizado, mostrada na Figura 22 (início de pega) e Figura 23 (fim de pega):

FIGURA 22 - TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

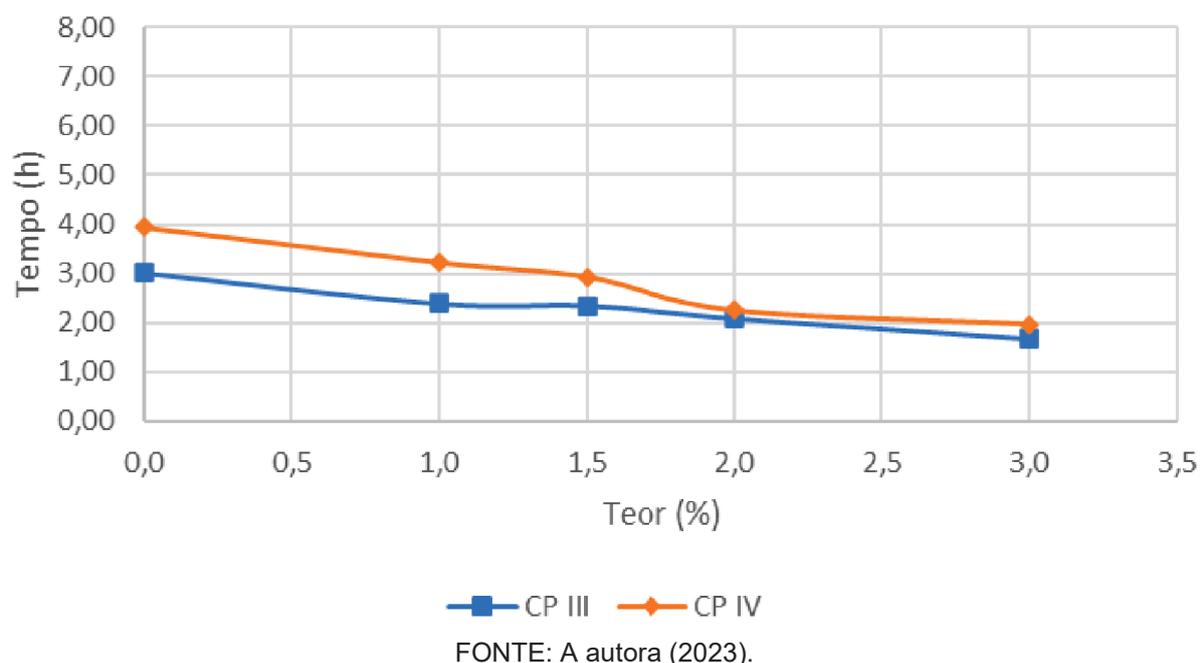
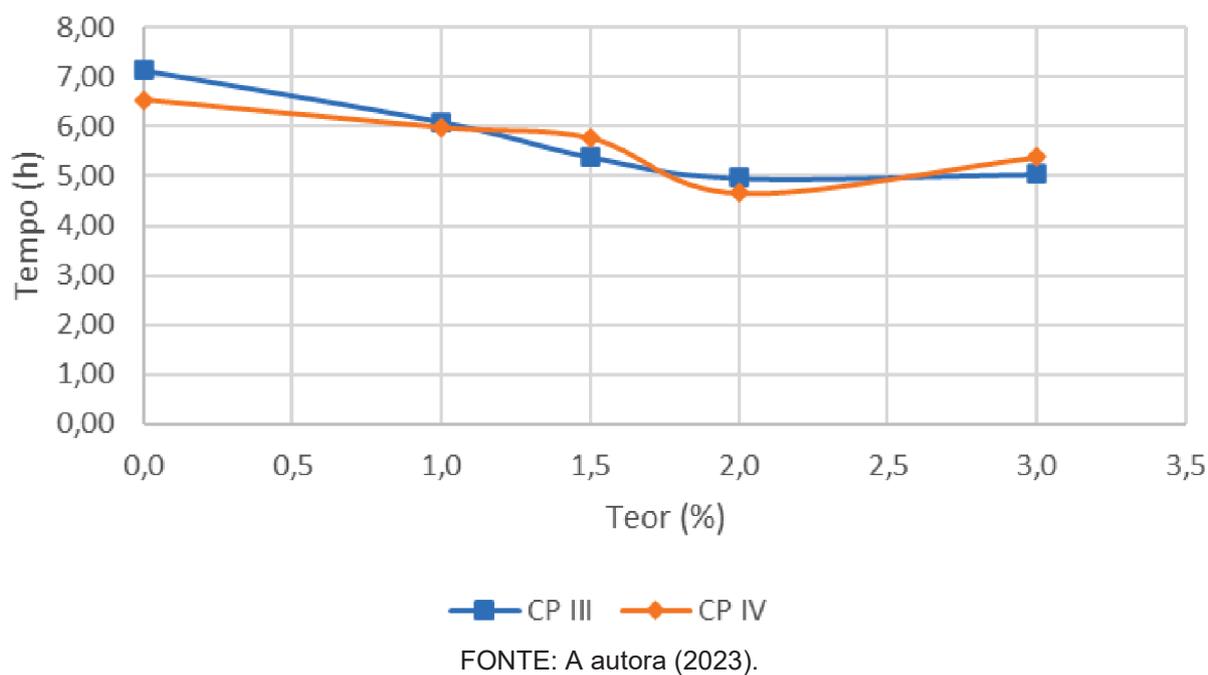


FIGURA 23 - TEMPO DE FIM DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS



A análise das figuras permite identificar o efeito causado pelo teor de 3,0% na aceleração do tempo de pega das pastas cimentícias. Identifica-se uma tendência de estagnação desta aceleração no tempo de início de pega de ambos os cimentos, assim como para fim de pega para o CP III. Com relação ao fim da pega apresentado pelo cimento pozolânico na presença de tal teor de aditivo, percebe-se um ponto de inflexão na curva de comportamento referente a essa propriedade. Assim, esse teor

resulta em uma aceleração significativamente menor do que o teor de 2,0%. Tal fenômeno indica o ponto de saturação do aditivo, a partir do qual o aumento de quantidade de material não indica maior aceleração da propriedade avaliada.

Ao misturar as pastas cimentícias com 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H, observou-se a ocorrência de exsudação e separação de fases. Dessa forma, é possível que o desempenho das pastas tenha sido afetado negativamente por tais fenômenos, os quais poderiam ser amenizados através do uso de aditivos complementares, como utilizado em Kanchanason e Plank (2019), Pedrosa *et al.* (2020), Li *et al.* (2022).

A partir do ensaio, identificou-se menores valores de tempo de pega na presença do aditivo de sementes de C-S-H. A aceleração alcançada por pastas de ambos os cimentos com teores mais elevados desse aditivo, quando comparadas às de referência, condiz com o comportamento relatado na literatura (LAND & STEPHAN, 2018; LI *et al.*, 2020; Z. ZHOU *et al.*, 2021; PIZON *et al.*, 2022).

4.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO

As temperaturas alcançadas por cada composição estudada foram acompanhadas ao longo de 30 horas consecutivas. Para efeito de visualização dos valores, os resultados foram espaçados em intervalos de 6 horas e apresentados na Tabela 14, juntamente com a temperatura máxima atingida e momento correspondente.

TABELA 14 – TEMPERATURAS ATINGIDAS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Código	Temperatura (°C)						Temperatura Máxima	
	0h	6h	12h	18h	24h	30h	Valor (°C)	Tempo
REFE	23,89	26,95	34,43	30,27	28,13	26,31	34,81	10,79h
E1	23,69	32,01	34,61	31,43	28,17	26,10	35,93	9,07h
E1,5	23,57	31,81	32,74	29,53	27,50	25,93	34,79	8,50h
E2	23,52	32,27	32,86	29,81	27,74	26,13	34,79	8,51h
E3	22,46	33,12	33,77	30,55	28,20	26,42	35,80	8,43h
REFZ	23,51	27,72	45,89	29,87	25,20	24,02	51,50	10,20h
Z1	23,40	34,70	42,59	29,58	25,22	24,01	53,04	8,64h
Z1,5	23,34	33,91	39,44	28,05	24,80	23,98	49,92	8,64h
Z2	25,08	48,92	33,64	27,30	24,61	23,77	49,65	5,47h
Z3	23,88	48,22	34,54	27,77	24,92	23,99	49,93	5,16h

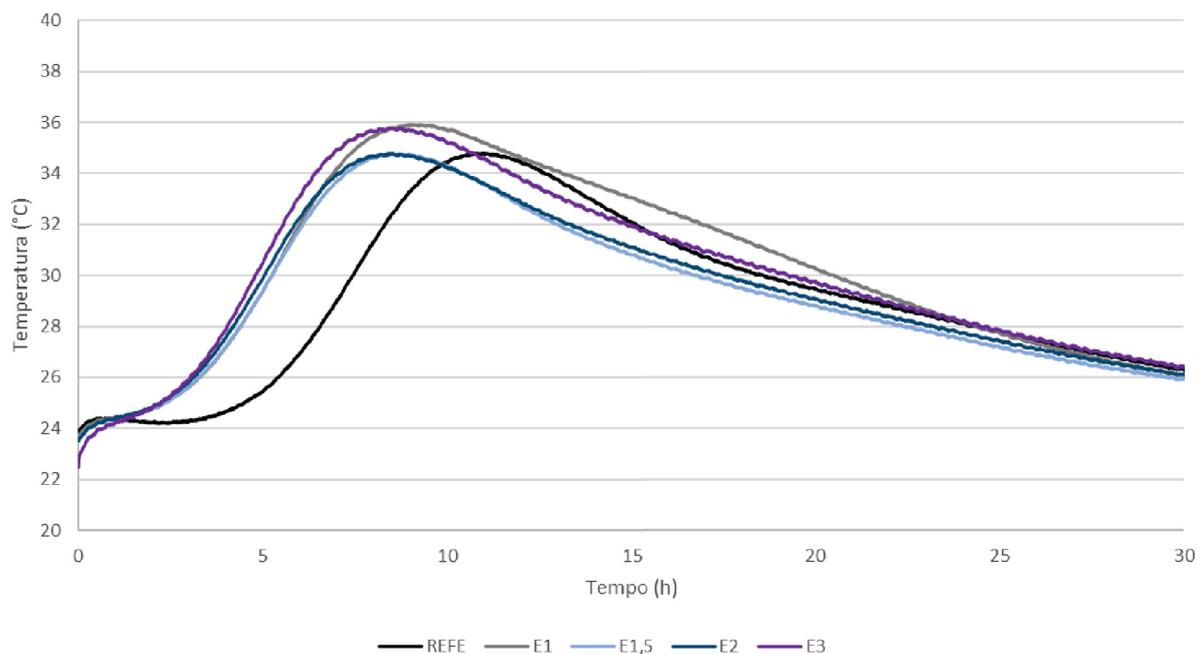
FONTE: A autora (2023).

É possível identificar a aceleração gerada pela presença de aditivo nas pastas de ambos os cimentos. Para o cimento com escórias, a temperatura máxima atingida pela amostra de referência, de 34,81°C, foi alcançada 10,79 horas após sua mistura, enquanto o teor de 3,0% alcançou o valor máximo de 35,80°C em menos tempo (8,43 horas). Já para o cimento CP IV, as amostras REFZ e Z3 pastas de cimento com cinzas volantes de referência e com 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H apresentaram desempenho semelhante. Notou-se temperaturas máximas semelhantes, próximas de 50,0°C, mas com aceleração de até 5,04 horas para as pastas com teor de 3,0% de aditivo.

Assim como encontrado em John *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2020), observa-se que a temperatura máxima atingida pelas pastas de cimento com aditivo não necessariamente ultrapassa o valor apresentado pela composição de referência. A principal diferença encontra-se no tempo em que tal estágio é atingido. Observa-se que o tempo apresentado pelas pastas de referência dos cimentos CP III e CP IV foi reduzido em até 2,36 e 5,04 horas para as pastas com aditivo de sementes de C-S-H. Dessa forma, percebe-se que o valor de temperatura máxima é alcançado em menor tempo para todas as composições com aditivo analisadas. O efeito do aditivo acelerador pode ser considerado ainda mais pronunciado, já que a presença de PCE pode levar a atrasos na hidratação dos cimentos, como verificado por Wang *et al.* (2020).

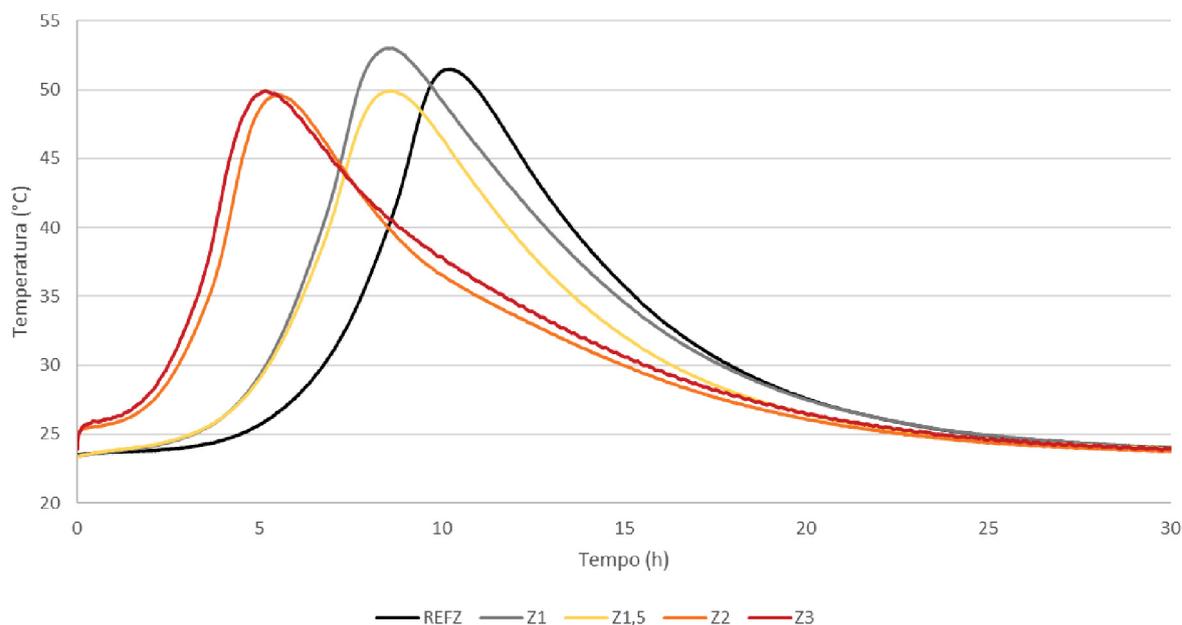
Com intuito de acompanhar a progressão das temperaturas atingidas ao longo do processo de hidratação das pastas cimentícias, curvas de temperatura foram plotadas. Essa configuração é representada na Figura 24 (cimento com escórias) e na Figura 25 (cimento com cinzas volantes):

FIGURA 24 – CURVAS DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 25 – CURVAS DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV



FONTE: A autora (2023).

Assim como visto em trabalhos como Wang *et al.* (2020), Li *et al.* (2020), He e Liao (2021) e Wang *et al.* (2021), é possível observar o deslocamento da curva para a esquerda para todos os teores de aditivo testados. Esse fenômeno sinaliza a aceleração da hidratação das pastas cimentícias gerada pelas sementes de C-S-H.

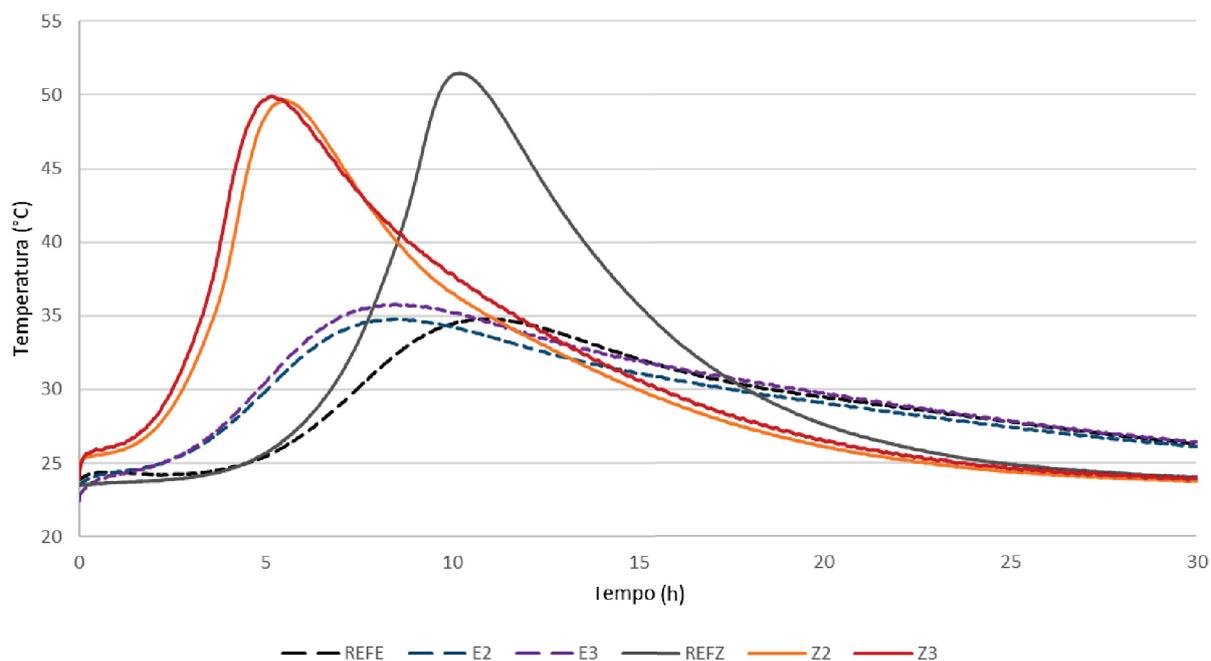
É possível comparar a geometria das curvas obtidas à análise proposta por Gartner *et al.* (2002), retomada por John *et al.* (2018) e ilustrada anteriormente neste trabalho na Figura 13 do item 2.3.3.2. Nota-se que o período de dormência de ambos os cimentos é reduzido para as pastas com a presença de aditivo, o que leva à ocorrência antecipada dos períodos de aceleração e desaceleração para as amostras. Esse comportamento poderia ser explicado pela redução da camada de inibição ao redor dos grãos de clínquer (LAND & STEPHAN, 2018; JOHN *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2021).

Para o cimento com escórias, observa-se que os picos de temperatura de todas as composições, inclusive a de referência, se mantiveram em uma faixa entre 34,0 e 36,0°C, apesar de ocorrerem em momentos distintos. Com relação ao tempo levado para alcançar tal valor, um comportamento similar é apresentado para todos os teores de aditivos estudados, com pequeno aumento gradual conforme o teor é aumentado. As pastas aditivadas alcançaram o pico de temperatura liberada durante a reação de hidratação do cimento com uma redução de tempo na faixa situada entre 16,0 e 22,0% em comparação à composição de referência.

As pastas compostas pelo cimento CP IV apresentaram uma maior aceleração para as composições Z2 e Z3 frente aos demais teores de aditivo. Para as adições de 1,0 e 1,5% houve uma aceleração da ocorrência do pico de temperatura de aproximadamente 15,30% com relação à pasta de referência. Já as amostras com 2,0 e 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H apresentaram uma aceleração mais pronunciada, de quase 50,0%, com relação a REF Z. De maneira similar ao ocorrido para o cimento CP III, as pastas cimentícias do ligante CP IV não apresentaram diferença relevante entre os picos de temperatura alcançados, resultando em valores próximos de 50,0°C para todas as composições.

Ao relacionar os dois tipos de cimento, é possível perceber que o cimento CP IV atingiu maiores temperaturas do que o CP III, conforme observado na Figura 26, onde são acompanhados os valores referentes às composições REFE, E2, E3, REFZ, Z2 e Z3:

FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE TEMPERATURA DOS CIMENTOS CP III E CP IV



FONTE: A autora (2023).

Esse comportamento pode ser justificado através da quantidade de clínquer presente em cada tipo de cimento. Como apresentado no item 3.1.1 deste trabalho, o CP IV conta com maior quantidade desse material em sua composição quando comparado ao CP III, já que apresenta aproximadamente 23,0% de adição mineral, enquanto há aproximadamente 52,0% de escórias no CP III. Dessa forma, o cimento com cinzas volantes apresentou temperaturas (aproximadamente 50,0°C) 30,0% maiores do que as atingidas pelo cimento com escórias (aproximadamente 35,0°C), valor que coincide com a diferença entre a quantidade de adição mineral presente na composição de cada ligante. Para além do deslocamento das curvas, não foi notada mudança significativa na geometria dos gráficos de cada cimento, indicando a liberação de quantidade similar de calor pelas pastas analisadas.

Diante dos resultados obtidos, notou-se que o uso do aditivo gera o deslocamento das curvas de temperatura para a esquerda com relação às pastas de referência para ambos os cimentos analisados. No caso do ligante CP III, não houve influência relevante do teor de aditivo, sendo apenas sua presença (de 1,0 a 3,0%) suficiente para ocasionar o fenômeno. Já para o CP IV, notou-se maior influência de teores a partir de 1,5%, que resultaram em maior deslocamento das curvas. Assim como observado no ensaio de tempo de pega, tais teores mostraram-se mais

eficazes, o que significa maior aceleração da hidratação das pastas cimentícias. Apesar de menos pronunciado, o uso das quantidades de 1,0 e 1,5% também gerou aceleração da reação das pastas com relação às amostras sem aditivo compostas pelo cimento com cinzas volantes.

Também se comprovou que, para os materiais avaliados na presente pesquisa, a quantidade de calor total liberada pelas composições de cada cimento com e sem aditivo é similar, assim como pontuado por John *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2020). Isso pode sinalizar um efeito positivo para o fenômeno de retração, influenciado, dentre outros fatores, pela quantidade de calor liberada durante o processo de hidratação de materiais cimentícios.

4.3 VISCOSIDADE

A viscosidade das pastas cimentícias (Pa.s), foi submetida à análise de variância (Apêndice C), em que se constatou diferença causada pela presença do aditivo de sementes de C-S-H. Os valores médios de viscosidade, juntamente com os respectivos valores de desvio padrão (Dp), assim como a relação entre as pastas com e sem aditivo frente a essa propriedade, e o respectivo torque gerado no viscosímetro (%) obtidos durante 5 minutos de ensaio, realizado a uma velocidade de 5 rpm, são apresentados na Tabela 15:

TABELA 15 – VISCOSIDADE MÉDIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Códigos	Torque (%)	Viscosidade \pm Dp (Pa.s)	Diferença* (%)
REFE	15,60	1,56 \pm 0,03	-
E1	20,20	2,02 \pm 0,02	29,49
E1,5	32,00	3,20 \pm 0,02	105,13
E2	51,50	5,15 \pm 0,01	230,13
E3	47,00	4,70 \pm 0,03	201,28
REFZ	19,00	1,90 \pm 0,02	-
Z1	31,70	3,17 \pm 0,01	66,84
Z1,5	42,00	4,20 \pm 0,02	121,05
Z2	49,50	4,95 \pm 0,01	160,53
Z3	36,00	3,60 \pm 0,01	89,47

*Com relação às referências (REFE e REFZ).

FONTE: A autora (2023).

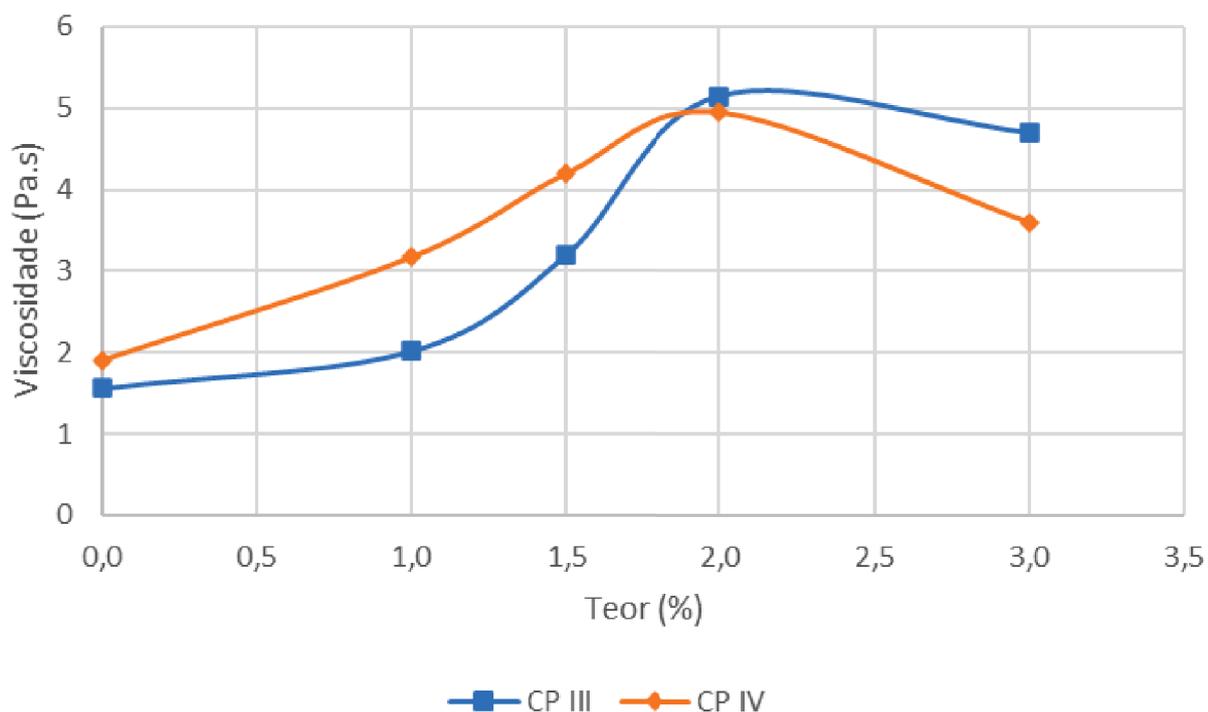
Conforme notado por trabalhos anteriores como John *et al.* (2019) e Charrier e Ouellet-Plamondon (2022), percebe-se que a incorporação do aditivo de sementes de C-S-H gera aumento da viscosidade das pastas cimentícias. Esse fenômeno pode

ser relacionado à maior área de superfície específica adicionada na mistura (BHOJARAJU *et al.*, 2021; F. ZHOU *et al.*, 2021). Ainda, é possível que as partículas de sementes de C-S-H adicionadas incorporem parte da água em sua estrutura química, como levantado por John *et al.* (2019). Em ambos os casos, o uso do aditivo de sementes de C-S-H levará a um aumento da viscosidade das pastas cimentícias. Além disso, esse fenômeno pode ainda estar relacionado à carga elétrica gerada pela presença das partículas coloidais do aditivo de sementes de C-S-H, que possivelmente influenciariam na alteração da tensão superficial das misturas, aumentando o esforço de torque medido no ensaio.

Os teores estudados dentro da faixa recomendada pelo fabricante do aditivo (até 2,0%) apresentaram um aumento de viscosidade gradual de até 230,13%, para o CP III, e de até 160,53%, para o CP IV, com relação às pastas de referência. Os valores apresentados pelas pastas dos cimentos com escórias passaram de 1,56 Pa.s (sem aditivo) para até 5,15 Pa.s (2,0% de aditivo). Já para o cimento com cinzas volantes, a viscosidade passou de 1,90 para 4,95 Pa.s para as pastas sem e com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H, respectivamente.

Com relação ao teor de extrapolação, ainda é possível observar um aumento de viscosidade. Tais composições apresentaram uma viscosidade de 4,70 Pa.s, 201,28% maior do que a pasta de referência, para o CP III e de 3,60 Pa.s, 89,47% maior do que a pasta sem aditivo, para o CP IV. Apesar disso, o ganho de viscosidade do teor de 3,0% é menor do que o atingido pelas pastas com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H, evidenciando uma redução de efeito do aditivo para o teor de extrapolação. Assim como notado no ensaio de tempo de pega, a redução de efeito gerada pelo teor de 3,0% em comparação à dosagem imediatamente anterior, de 2,0%, indica o ponto de saturação do aditivo. Observou-se que as amostras E3 e Z3 apresentam maior exsudação e separação de fases do que as demais composições analisadas. Dessa maneira, é possível que a ocorrência de segregação tenha influenciado a medição de viscosidade, já que o ensaio consiste em tomadas de valores em um mesmo ponto da amostra. Esse fenômeno é evidenciado pelo gráfico de evolução dos valores de viscosidade em função do teor de aditivo adicionado para cada cimento, mostrado na Figura 27:

FIGURA 27 – VISCOSIDADE DAS PASTAS CIMENTÍCIAS



FONTE: A autora (2023).

4.4 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

A seguir, são expostos os resultados de resistências mecânicas obtidos para as misturas estudadas. Inicia-se com a apresentação dos dados referentes ao ensaio de resistência à compressão, seguindo-se com os de resistência à tração na flexão.

4.4.1 Resistência à Compressão

A média dos valores de resistência à compressão e respectivos valores de desvio padrão (Dp), referentes a cada pasta cimentícia estudada são apresentados na Tabela 16.

Para os teores dentro da faixa de recomendação do fabricante (até 2,0%), observa-se uma tendência de aumento da resistência à compressão das pastas cimentícias à medida que maiores quantidades de aditivo são empregadas. Tal comportamento corresponde ao descrito na literatura (JOHN *et al.*, 2019; SZOSTAK & GOLEWSKI, 2020; WANG *et al.*, 2021; GU *et al.*, 2022). Após a realização da análise de variância (Apêndice D), foi identificada diferença relevante para as pastas compostas por ambos os cimentos em todas as idades, com exceção de 91 dias. Para

esse período, apenas as amostras de cimento com escórias de alto forno apresentaram um comportamento divergente entre as composições analisadas.

TABELA 16 – RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Resistência à compressão \pm Dp (MPa)			
	1 dia	7 dias	28 dias	91 dias
REFE	29,1 \pm 0,9	52,3 \pm 1,2	66,2 \pm 1,9	66,1 \pm 3,6
E1	35,4 \pm 2,7	54,2 \pm 0,9	66,7 \pm 4,2	68,2 \pm 2,9
E1,5	36,0 \pm 1,0	61,2 \pm 1,1	71,4 \pm 1,5	73,8 \pm 3,6
E2	37,4 \pm 1,5	63,0 \pm 0,7	69,5 \pm 2,2	74,4 \pm 6,6
E3	13,3 \pm 0,8	65,0 \pm 1,8	72,2 \pm 2,4	74,1 \pm 3,4
REFZ	29,9 \pm 1,8	52,1 \pm 0,7	59,8 \pm 1,1	62,2 \pm 1,5
Z1	51,6 \pm 1,6	51,9 \pm 1,4	60,4 \pm 3,0	62,3 \pm 2,4
Z1,5	52,7 \pm 1,2	53,9 \pm 1,3	60,7 \pm 1,2	63,9 \pm 2,5
Z2	53,7 \pm 1,1	52,7 \pm 2,1	61,1 \pm 3,2	64,1 \pm 1,7
Z3	32,0 \pm 1,4	55,7 \pm 1,9	63,9 \pm 3,0	62,6 \pm 3,0

FONTE: A autora (2023).

No cimento CP III, notou-se um aumento da propriedade na presença de 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H em 24 horas. Valores superiores ainda são notados em idades mais avançadas para as pastas aditivadas, chegando a 69,5 e 74,4 MPa nas idades de 28 e 91 dias, respectivamente. Tais resistências mostram-se maiores do que as apresentadas pela pasta de referência para o mesmo período, de 66,2 e 66,1 MPa para 28 e 91 dias, respectivamente. Os maiores valores de resistência mecânica observada ainda em idades mais avançadas em pastas cimentícias com escórias na presença de aditivo de sementes de C-S-H confirmam o comportamento observado por Kanchanason e Plank (2019) e Li *et al.* (2022).

Os teores intermediários, de 1,0 e 1,5%, apresentaram diferentes comportamentos entre si em idades mais avançadas no cimento com escórias. Os valores alcançados pelas pastas com tais teores de aditivo foram próximos para 24 horas. Entretanto, a partir de 7 dias notou-se uma tendência do menor teor, de 1,0%, se assemelhar às resistências apresentadas pelas pastas sem aditivo. Da mesma forma, o comportamento observado pelas pastas com 1,5% de aditivo aproximou-se dos valores atingidos pelas amostras com teor de 2,0%.

Ainda para os teores dentro da faixa de recomendação do fabricante, é possível notar um aumento da resistência inicial apresentada pelas pastas de cimento CP IV na presença do aditivo. Observa-se que o valor alcançado por REFZ em 24 horas é de 29,9 MPa enquanto Z2 chega a 53,7 MPa. Diferente do ocorrido para o cimento CP III, as resistências das misturas com CP IV apresentaram menor variação

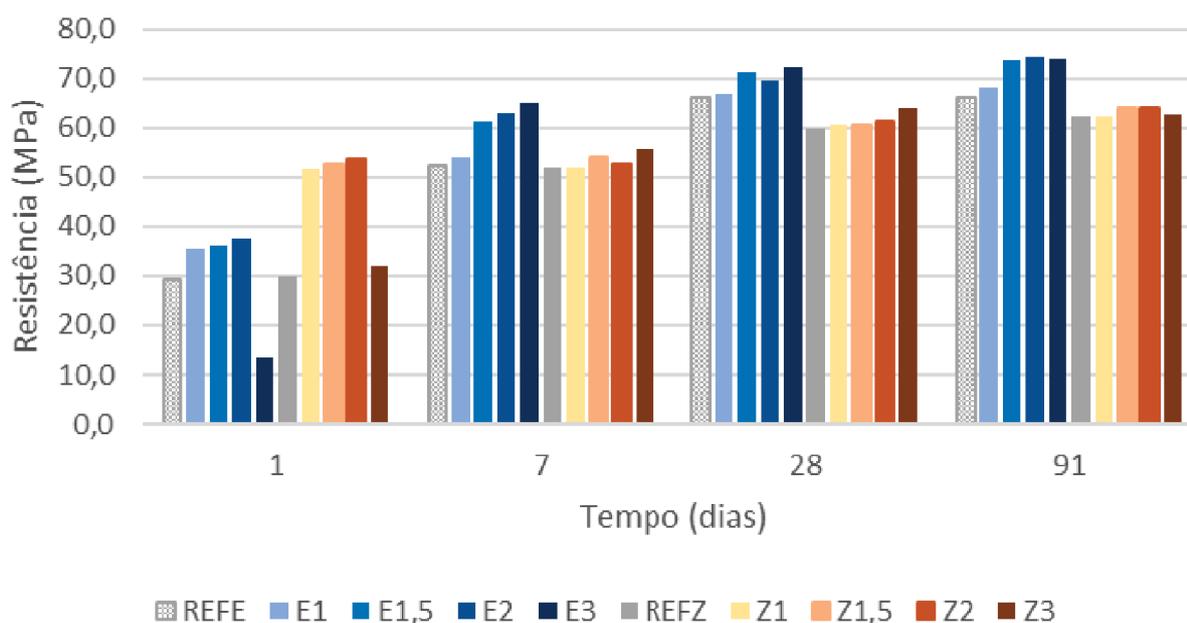
entre as dosagens para idades mais avançadas. Nesse caso, as pastas de referência atingiram valores próximos às amostras com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H no período de 7 a 91 dias. Nota-se também que, apesar da presença do aditivo influenciar o comportamento mecânico das pastas testadas, a diferença entre os teores não é pronunciada para o cimento com cinzas volantes.

Diante dos valores apresentados, é possível verificar como o desempenho mecânico inicial das pastas cimentícias é afetado pelo teor de extrapolação. Para o CP III, uma redução de 15,8 MPa é percebida para o teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H (13,3 MPa) com relação à amostra REFE em 24 horas. Apesar disso, a resistência à compressão é recuperada ao longo de idades mais avançadas para pastas com tal teor de aditivo. Nota-se que E3 atinge os maiores valores para as idades de 7 e 28 dias, alcançando até 72,2 MPa. Após 91 dias, o valor apresentado pelas composições com 3,0% de aditivo, de 74,1 MPa, ainda se mostra maior do que o das pastas de referência.

Apesar de não apresentar um valor inferior ao da pasta de referência, como ocorrido para o cimento com escórias, a perda de eficiência do aditivo também pode ser observada para o cimento CP IV. Mesmo apresentando um valor ligeiramente maior que REFE, de 29,9 MPa, a resistência à compressão referente às pastas Z3, de 32,0 MPa, é consideravelmente inferior ao valor apresentado por Z2, de 53,7 MPa. Entretanto, assim como para o CP III, o desempenho das pastas de cimento com cinzas com 3,0% de aditivo supera os demais valores nas idades de 7 e 28 dias, atingindo até 63,9 MPa, resistência que se mantém semelhante para 91 dias.

A evolução das resistências à compressão ao longo do período avaliado também é representada na Figura 28. O comportamento mecânico anteriormente explicado é evidenciado na Tabela 17, pela diferença percentual entre as pastas aditivadas e à de referência para cada cimento.

FIGURA 28 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS



FONTE: A autora (2023).

TABELA 17 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Código	Diferença de Resistência com Relação às Referências (%)			
	1 dia	7 dias	28 dias	91 dias
REFE	-	-	-	-
E1	21,6	3,6	0,8	3,2
E1,5	23,7	17,0	7,9	11,6
E2	28,5	20,5	5,0	12,6
E3	-54,3	24,3	9,1	12,1
REFZ	-	-	-	-
Z1	72,6	-0,4	1,0	0,2
Z1,5	76,3	3,5	1,5	2,7
Z2	79,6	1,2	2,2	3,1
Z3	7,0	6,9	6,9	0,6

FONTE: A autora (2023).

Os valores comparativos ressaltam os diferentes efeitos gerados pela adição de cada teor de aditivo testado. Para resistências iniciais, identifica-se uma eficiência discretamente maior para o teor 2,0%, quando aplicado em pastas compostas por ambos os cimentos testados. É possível observar um aumento de 28,5% para o cimento CP III e de 79,6% para o CP IV com relação às respectivas pastas de referência. Ainda para esse período (24 horas), nota-se a perda de eficiência gerada pelo teor 3,0%, apresentando uma redução de 54,3% nos valores referentes ao cimento com escórias. Ainda seguindo essa tendência, um aumento significativamente menor é notado para o desempenho mecânico inicial de Z3, que resultou em um valor apenas 7,0% maior do que REFZ, enquanto o restante dos

teores levou a acréscimos de resistências superiores a 70,0%. Conforme já comentado para o ensaio de calorimetria, é possível que a redução de desempenho em 24 horas na presença do teor de 3,0% de sementes de C-S-H seja devido ao possível atraso na hidratação das pastas cimentícias gerado pela quantidade elevada de PCE na mistura.

Assim como observado no ensaio de calorimetria, os maiores valores de ganho de resistência inicial apresentados pelo CP IV, comparativamente ao CP III, podem estar ligados à quantidade de clínquer na composição de cada cimento. O CP IV apresenta apenas 23,0% de adição mineral, enquanto o CP III, conta com 52,0% de escórias de alto forno em sua composição. Dessa forma, o efeito mais pronunciado de aumento de resistência inicial causado pelo aditivo pode estar relacionado à potencialização da hidratação dessa maior quantidade de clínquer presente no cimento com cinzas, assim como retomado por Pizon *et al.* (2022).

Outra diferença notada entre o comportamento dos dois cimentos testados é a influência do aditivo de sementes de C-S-H em idades avançadas. Para o cimento pozolânico, o aumento de resistência à compressão gerado por esse aditivo diminuiu após 24 horas, se mantendo em uma faixa de até 6,9% para 7 e 28 dias e de até 3,1% para 91 dias. Em contrapartida, o cimento CP III apresenta valores de acréscimo de resistência significativos mesmo aos 91 dias, apresentado um aumento de até 12,6%. Esse comportamento sinaliza uma possível interação da escória com o aditivo, o que aumentaria a quantidade de adição reagida e influenciaria o acréscimo de resistências mecânicas, como também observado por Kanchanason e Plank (2019) e Li *et al.* (2022).

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que os teores testados dentro da faixa de recomendação do fabricante (até 2,0%) levaram a um aumento das resistências à compressão. Em 24 horas, o acréscimo alcançado está contido na faixa entre 21,6 e 28,5% para o cimento com escórias e entre 72,6 e 79,6% para o cimento com cinzas volantes. Além disso, observou-se para idades mais avançadas, diferenças de resistência ainda relevantes para pastas compostas pelo cimento com escórias na presença do aditivo de sementes de C-S-H. Diante disso, evidenciou-se mais uma vez a relevância da composição de cada cimento estudado.

4.4.2 Resistência à Tração na Flexão

Os valores médios obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão apresentados por cada amostra analisada, bem como os respectivos valores de desvio padrão (Dp), são mostrados a seguir na Tabela 18:

TABELA 18 – RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Resistência à tração na flexão \pm Dp (MPa)			
	1 dia	7 dias	28 dias	91 dias
REFE	4,8 \pm 0,4	8,2 \pm 0,3	8,4 \pm 0,6	8,8 \pm 0,6
E1	5,6 \pm 0,4	9,4 \pm 0,5	10,4 \pm 0,9	9,2 \pm 0,9
E1,5	7,0 \pm 0,7	7,7 \pm 0,8	10,8 \pm 0,9	10,1 \pm 1,3
E2	7,6 \pm 0,4	8,2 \pm 0,5	9,0 \pm 1,0	9,9 \pm 1,0
E3	4,7 \pm 0,6	7,8 \pm 0,5	7,0 \pm 0,7	9,0 \pm 0,3
REFZ	7,7 \pm 0,8	8,4 \pm 0,6	8,8 \pm 0,8	8,7 \pm 0,5
Z1	8,5 \pm 0,6	10,5 \pm 0,9	10,1 \pm 0,4	10,2 \pm 1,1
Z1,5	7,8 \pm 0,9	11,2 \pm 1,0	10,9 \pm 0,5	11,2 \pm 0,7
Z2	8,5 \pm 0,6	9,6 \pm 0,7	9,2 \pm 0,6	10,1 \pm 1,2
Z3	7,4 \pm 0,4	8,1 \pm 1,0	8,6 \pm 1,1	8,9 \pm 0,9

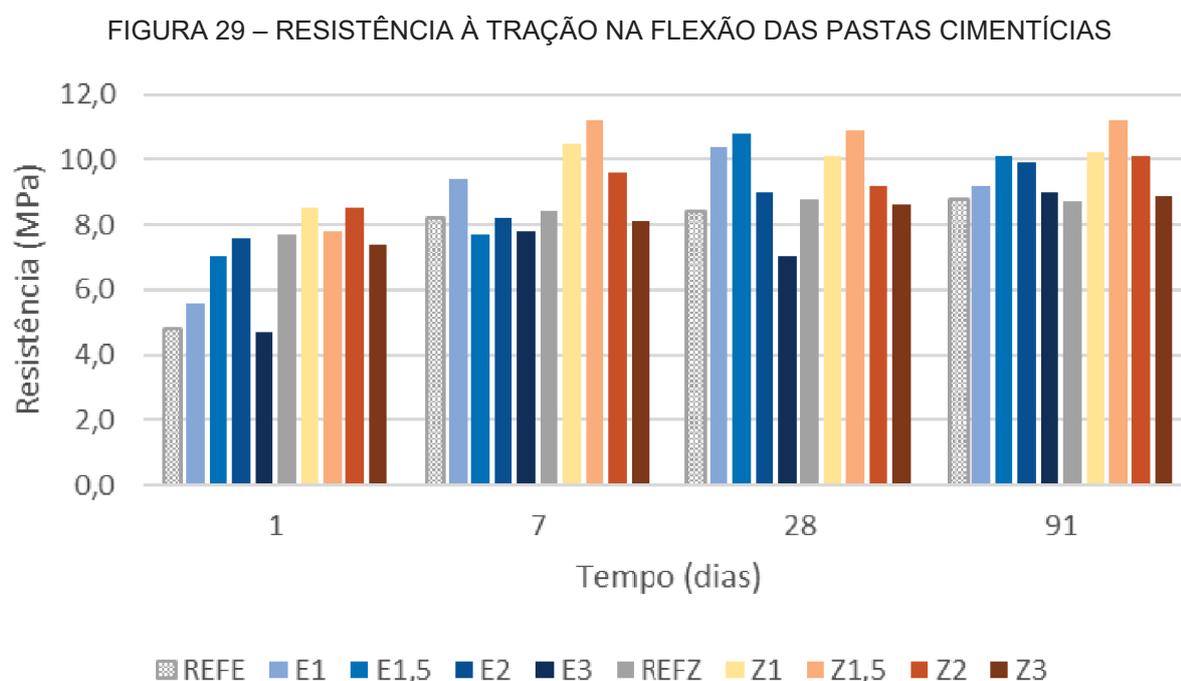
FONTE: A autora (2023).

É possível notar uma tendência de aumento da resistência à tração na flexão apresentada pelas pastas cimentícias com a presença de aditivo de sementes de C-S-H. Entretanto, o acréscimo dessa propriedade não acompanha, necessariamente, o aumento do teor do aditivo, mesmo para os valores dentro da faixa de recomendação do fabricante (até 2,0%). Diferente do ocorrido para a resistência à compressão, observa-se que, em algumas idades, os teores de 1,0 e 1,5% apresentam valores de resistência à tração na flexão superiores aos do teor de 2,0%. A análise de variância dos valores apresentados (Apêndice E) indicou diferença no comportamento das amostras na presença de aditivo acelerador em 24 horas para o cimento CP III, 91 dias para o cimento CP IV e em 28 dias para ambos os cimentos.

Para o cimento CP III, em 24 horas é possível observar um comportamento próximo ao obtido no ensaio de resistência à compressão, em que os valores sofrem aumento com maiores teores de aditivo dentro da faixa de recomendação do fabricante. Nesse momento, as composições de 1,0 a 2,0% de aditivo ultrapassam gradualmente a resistência atingida por REFE (4,8 MPa), atingindo até 7,6 MPa. Porém, tal comportamento não é mantido para as próximas idades das amostras. É possível observar que de 7 a 91 dias as resistências de E1 e E1,5 chegaram a valores superiores do que os alcançados por E2. Já as pastas compostas pelo cimento

pozolânico apresentam semelhanças de resistências em 24 horas entre REFZ e Z1,5, com valores próximos a 8,0 MPa, e entre Z1 e Z2, com 8,5 MPa. Para idades mais avançadas, também se nota melhor desempenho dos teores intermediários, especialmente de 1,5%, que manteve uma resistência de aproximadamente 11,0 MPa para as idades de 7 a 91 dias.

O teor de 3,0% demarca as menores resistências entre as pastas com a presença de aditivo de sementes de C-S-H para ambos os cimentos. Tanto para o CP III quanto para o CP IV, os valores alcançados pelas pastas na presença do teor de extrapolação do aditivo se mostram similares ou inferiores às respectivas referências. Dessa forma, as composições E3 e Z3 apresentam valores pronunciadamente inferiores aos das demais pastas aditivadas para o período entre 1 e 91 dias. O comportamento descrito pode ser observado através partir da Figura 29:



FONTE: A autora (2023).

A seguir, a Tabela 19 apresenta a comparação entre as resistências das composições aditivadas em relação às respectivas referências de cada cimento. Conforme já citado, no caso de ambas as pastas cimentícias é possível identificar um comportamento fora do esperado para as composições com aditivo dentro da faixa de recomendação do fabricante. Com exceção dos valores apresentados pelas pastas cimentícias com escórias em 24 horas, que seguiram uma sequência de

acréscimo de até 58,3% para os teores de 1,0 a 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H, as outras composições não acompanharam a tendência de aumento de resistências com maiores quantidades do acelerador. No caso do emprego do teor de 3,0%, não é notada diferença relevante com relação às pastas de referência de cada tipo de cimento. A única exceção é a redução sofrida por E3 em 28 dias, de 16,7%. À parte dessa composição, todas as pastas restantes apresentaram diferenças menores do que 5,0% com relação à referência.

TABELA 19 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Código	Diferença de Resistência com Relação às Referências (%)			
	1 dia	7 dias	28 dias	91 dias
REFE	-	-	-	-
E1	16,7	14,6	23,8	4,5
E1,5	45,8	-6,1	28,6	14,8
E2	58,3	0,0	7,1	12,5
E3	-2,1	-4,9	-16,7	2,3
REFZ	-	-	-	-
Z1	10,4	25,0	14,8	17,2
Z1,5	1,3	33,3	23,9	28,7
Z2	10,4	14,3	4,5	16,1
Z3	-3,9	-3,6	-2,3	2,3

FONTE: A autora (2023).

Os resultados de resistência à tração na flexão apresentados pelas pastas cimentícias estudadas demonstraram uma queda de eficiência para o teor 2,0% em idades maiores que 24 horas. Além disso, foi notada uma perda de resistência entre pastas de mesmo teor com o passar do tempo, como ocorrido para as amostras: E3, de 7 para 28 dias; E1, E1,5 e E2, de 28 para 91 dias. Esse comportamento pode relacionado à segregação das fases da pasta e à formação de vazios excedentes consequentes do uso do aditivo de sementes de C-S-H.

A separação da fase líquida e presença dos poros gerados pelo excesso de vazios pode facilitar a ocorrência de interconexão de vazios através de fissuração com consequente perda de resistência, assim como retomado por Li *et al.* (2020) e F. Zhou *et al.* (2021). De acordo com a literatura, tais efeitos poderiam ser contornados com o uso de aditivos complementares ao aditivo de sementes de C-S-H, como realizado em Kanchanason e Plank (2019), Pedrosa *et al.* (2020), Li *et al.* (2022). Essa hipótese foi verificada ao adicionar os aditivos complementares (antiespumante e estabilizador) nas composições E2 e Z2. Os resultados encontrados são apresentados e discutidos adiante, no item 4.9.2.

4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios referentes ao módulo de elasticidade estático das composições de referência e com teores 2,0 e 3,0% de aditivos de sementes de C-S-H. Para o cimento com escórias, nota-se um pequeno aumento da propriedade conforme acréscimo de aditivo incorporado em 24 horas. Com 28 dias, os valores para tal cimento se mantêm similares entre todas as amostras, mas já com 91 dias observa-se uma variação entre as pastas, já que E2 resultou em 3985 MPa enquanto REFE e E3 atingiram 4221 e 4389 MPa, respectivamente. Com relação ao cimento com cinzas volantes, é possível perceber valores similares entre as misturas em 24 horas. Entretanto, para 28 e 91 dias, nota-se uma redução de valores de módulo de elasticidade estático das pastas aditivadas com relação a REFZ.

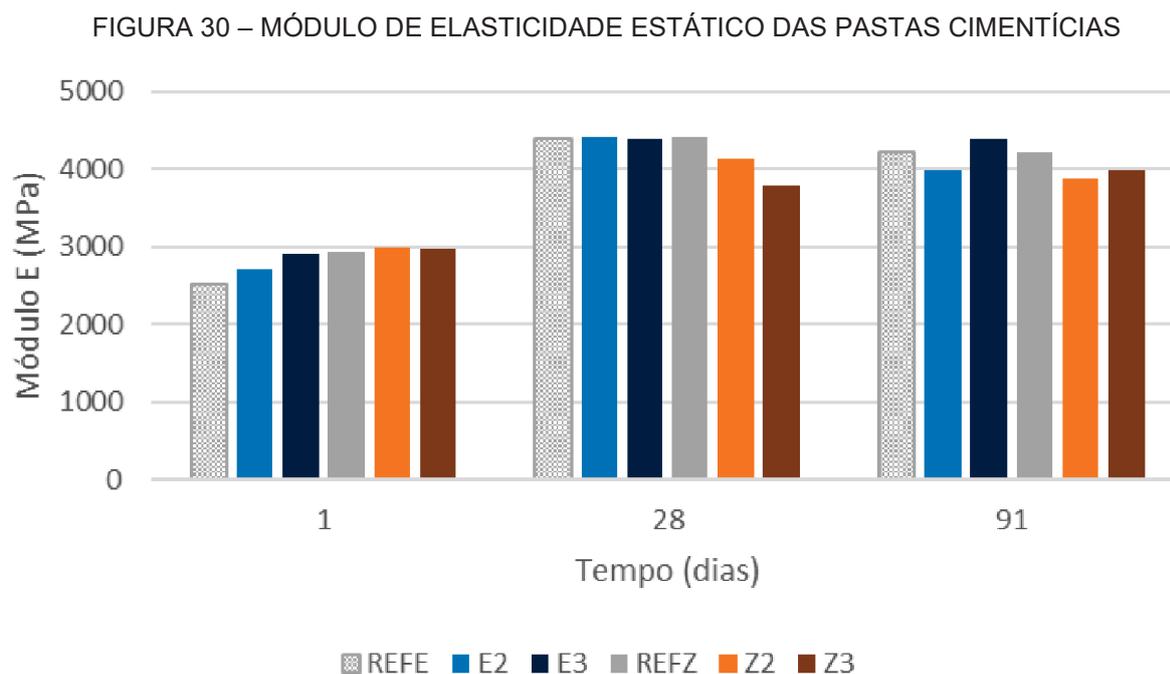
TABELA 20 – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO MÉDIO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Módulo de Elasticidade (MPa)		
	1 dia	28 dias	91 dias
REFE	2512	4399	4221
E2	2721	4415	3985
E3	2900	4394	4389
REFZ	2933	4425	4230
Z2	2997	4129	3868
Z3	2971	3781	3983

FONTE: A autora (2023).

De forma a melhor visualizar o comportamento apresentado pelas pastas cimentícias estudadas, são apresentados os gráficos de evolução de módulo de elasticidade estático na Figura 30. Além disso, são expostas na Tabela 21 as diferenças percentuais entre valores apresentados pelas pastas aditivadas com relação às de referência de cada cimento. Diante dos valores apresentados na tabela e do padrão exposto pelas imagens, para o cimento CP III, percebe-se um aumento de módulo de elasticidade na presença de aditivo para 24 horas, com acréscimo de até 15,4% para o teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H. Já para 28 dias, as composições aditivadas apresentaram resultados similares à pasta REFE, com variação menor que 5,0% entre os valores. Tal comportamento pode ser relacionado à diminuição da porosidade inicial das misturas que é notada em Thomas *et al.* (2009), Wang *et al.* (2020), He e Liao (2021) e Wang *et al.* (2021). Entretanto, em 91 dias

uma redução de 5,6% no módulo de elasticidade é percebida para E2. O mesmo ocorre para as idades de 28 e 91 dias para o cimento com cinzas volantes. Assim como já citado neste trabalho, é possível que decréscimo da propriedade e comportamento fora do apresentado na literatura esteja vinculado à quantidade excessiva de vazios na mistura causada pela ausência do uso dos aditivos complementares.



FONTE: A autora (2023).

TABELA 21 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Código	Diferença de Módulo de Elasticidade com Relação às Referências (%)		
	1 dia	28 dias	91 dias
REFE	-	-	-
E2	8,3	0,4	-5,6
E3	15,4	-0,1	4,0
REFZ	-	-	-
Z2	2,2	-6,7	-8,5
Z3	1,3	-14,6	-5,8

FONTE: A autora (2023).

4.6 RETRAÇÃO POR SECAGEM

A retração por secagem, sofrida pelas composições testadas, foi acompanhada durante 91 dias. A média dos valores de cada amostra durante o período é apresentada na Tabela 22:

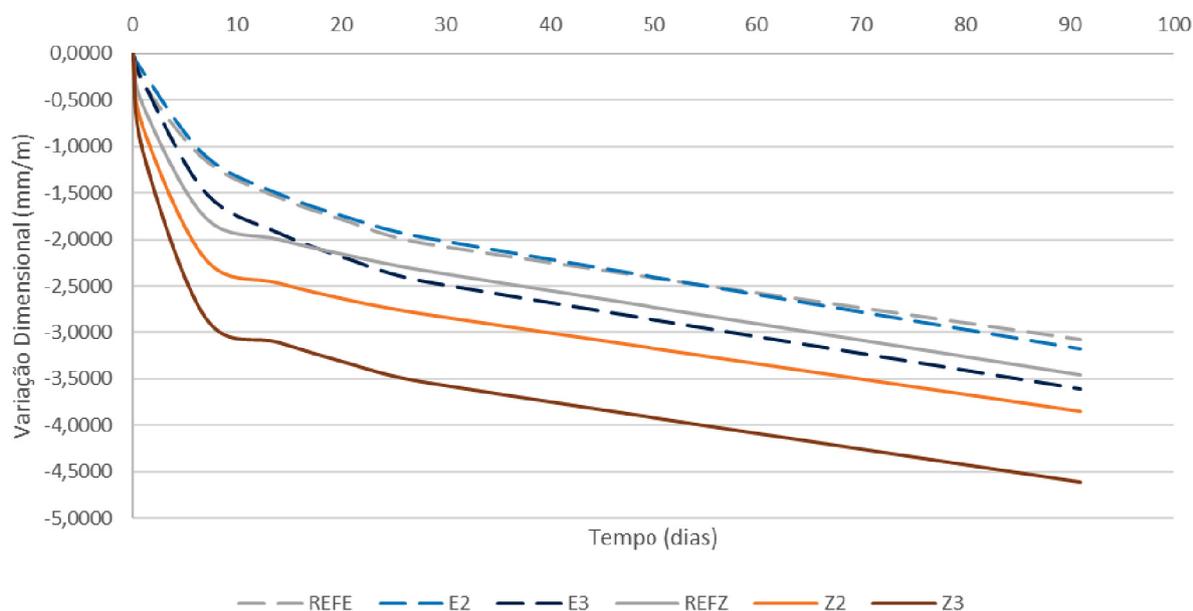
TABELA 22 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS

Código	Variação Dimensional (mm/m)					
	1 dia	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	91 dias
REFE	-0,3173	-1,1483	-1,5470	-1,8180	-2,0430	-3,0740
E2	-0,1943	-1,1033	-1,5117	-1,7803	-1,9843	-3,1833
E3	-0,2977	-1,4957	-1,9317	-2,2230	-2,4533	-3,6103
REFZ	-0,5620	-1,7670	-1,9993	-2,1787	-2,3337	-3,4540
Z2	-0,8023	-2,2190	-2,4717	-2,6617	-2,8060	-3,8517
Z3	-1,0647	-2,8467	-3,1073	-3,3417	-3,5347	-4,6067

FONTE: A autora (2023).

Comparativamente, nota-se que as amostras compostas pelo cimento com cinzas volantes apresentaram maior retração do que as com escórias. Mais uma vez, esse comportamento pode ser explicado através da quantidade de clínquer presente em cada cimento. Como o CP IV apresenta maior teor desse composto e, conseqüentemente, maior calor de hidratação, assim como observado no item 4.2, sua retração tenderá a ser maior. Esse fenômeno fica mais evidente ao comparar as curvas de variação dimensional apresentadas por cada composição. A seguir, tais curvas referentes às pastas de ambos os cimentos são apresentadas na Figura 31:

FIGURA 31 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS



FONTE: A autora (2023).

Para o cimento com escórias, os valores entre as composições de referência e com teor de 2,0% de aditivo são similares durante todo o período analisado. A diferença entre essas amostras mostrou-se menor do que 5,0% até a idade de 91

dias. No caso do teor de extrapolação para o cimento CP III, a diferença entre valores manteve-se pronunciada durante todo ensaio, indicando uma maior retração por secagem para E3. As pastas com esse teor chegaram a apresentar uma variação dimensional 17,0% maior do que a amostra REFE para 91 dias. A relação entre as composições sem aditivo e as com teor de 2,0% foi diferente para o cimento CP IV. Nesse caso, as amostras Z2 apresentaram uma distância relativamente uniforme dos valores alcançados por REFZ. Para 91 dias, as pastas com 2,0% de aditivo atingiram valores de retração aproximadamente 12,0% maiores do que as de referência. O aumento da variação dimensional foi ainda maior para o teor de 3,0% para o cimento com cinzas volantes, que apresentou valores 33,0% maiores do que as composições sem aditivo para o mesmo período (91 dias).

Os valores mostrados indicam um comportamento diferente do pontuado por Li *et al.* (2020), Szostak e Golewski (2021) e F. Zhou *et al.* (2021), indicando uma maior retração conforme o teor de aditivo de sementes de C-S-H é aumentado. De acordo com o que foi observado em tais trabalhos, a presença de aditivo nas pastas levaria a uma menor quantidade de calor de hidratação liberado após 16 horas desde a sua mistura. A menor temperatura nesse período aliada à menor quantidade de água livre, gerada pela otimização da hidratação da pasta cimentícia influenciada pelo aditivo de sementes de C-S-H, resulta em uma redução na retração por secagem sofrida pelas amostras aditivadas. As condições citadas pelos autores, relativas à menor temperatura liberada em fases mais avançadas do processo de hidratação e à otimização desse processo na presença de aditivo de sementes de C-S-H, foram identificadas neste trabalho. Os fenômenos enumerados puderam ser notados nos ensaios de calor de hidratação e tempo de pega, itens 4.2 e 4.1, respectivamente. Apesar disso, o comportamento referente à retração de secagem aqui encontrado não condiz com o relatado na literatura.

Assim como levantado para os comportamentos observados nos itens 4.4.2 e 4.5, referentes à resistência à tração e ao módulo de elasticidade estático, o aumento da retração por secagem para as pastas aditivadas pode estar relacionado às consequências da ausência dos aditivos complementares. É possível que a segregação sofrida pela pasta cimentícia e a maior conectividade entre poros através de fissuras e microfissuras fragilize as amostras, favorecendo o fenômeno da retração. De fato, tal redução de resistência foi percebida ao longo do programa experimental do presente trabalho, assim como apresentado no item 4.4.2. Dessa

forma, tal efeito poderia se sobrepôr às vantagens geradas na presença do aditivo levantadas pela literatura e observadas nos ensaios realizados neste trabalho. Tal hipótese foi verificada através do uso dos aditivos antiespumante e estabilizador nas composições E2 e Z2, com resultados expostos no item 4.9.3.

4.7 QUANTIFICAÇÃO DE ESCÓRIA REAGIDA

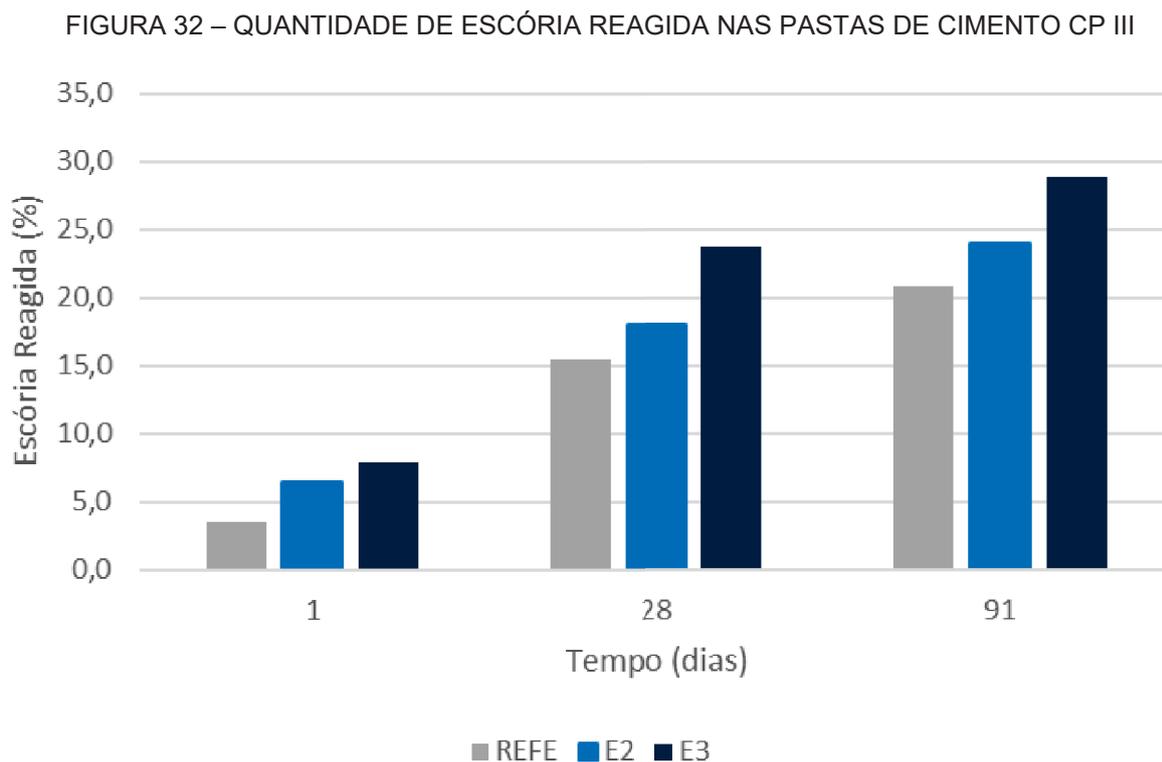
De forma a pontuar a possível interação entre as escórias e o aditivo de sementes de C-S-H, realizou-se o ensaio de quantificação de escória reagida. Na Tabela 23 são apresentados os valores resultantes de tal medição, realizada para as composições de cimento CP III de referência e com teores 2,0 e 3,0% de aditivo:

TABELA 23 – QUANTIDADE DE ESCÓRIA REAGIDA

Código	Quantidade de Escória Reagida (%)		
	1 dia	28 dias	91 dias
REFE	3,5	15,5	20,8
E2	6,4	18,0	24,0
E3	7,9	23,8	28,8

FONTE: A autora (2023).

Nota-se a existência de uma tendência da ocorrência de maior quantidade de escória reagida com o aumento da idade e do teor de aditivo nas composições. A tendência seguida, assim como os valores encontrados no ensaio, corresponde ao que foi observado em Li *et al.* (2022), que obtiveram até 35,0% de escória reagida em 28 dias para pastas cimentícias com 50,0% da adição mineral com teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H. Diante do comportamento observado, é possível justificar o aumento de resistências mecânicas apresentado no item 4.4 deste trabalho. Conforme já levantado por Kanchanason e Plank (2019), Xu *et al.* (2020) e Li *et al.* (2022), é possível perceber uma otimização da reação sofrida pelas escórias de alto forno em pastas cimentícias na presença do aditivo de sementes de C-S-H. Esse efeito acaba por gerar um ganho de resistências mecânicas nas pastas compostas pelo cimento CP III na presença do aditivo com relação às mesmas pastas de referência, conforme encontrado ao longo do programa experimental deste trabalho. Esse comportamento é representado na Figura 32:



FONTE: A autora (2023).

Percebe-se que a diferença de quantidade de escória reagida entre as composições analisadas é mantida ao longo de todas as idades analisadas, não ficando restrita ao primeiro dia após a mistura das pastas. Da mesma forma, o aumento de resistências, esperado para idades iniciais na presença do aditivo, acaba sendo notado ainda para idades mais avançadas, como em 28 e 91 dias, para as amostras compostas pelo cimento CP III.

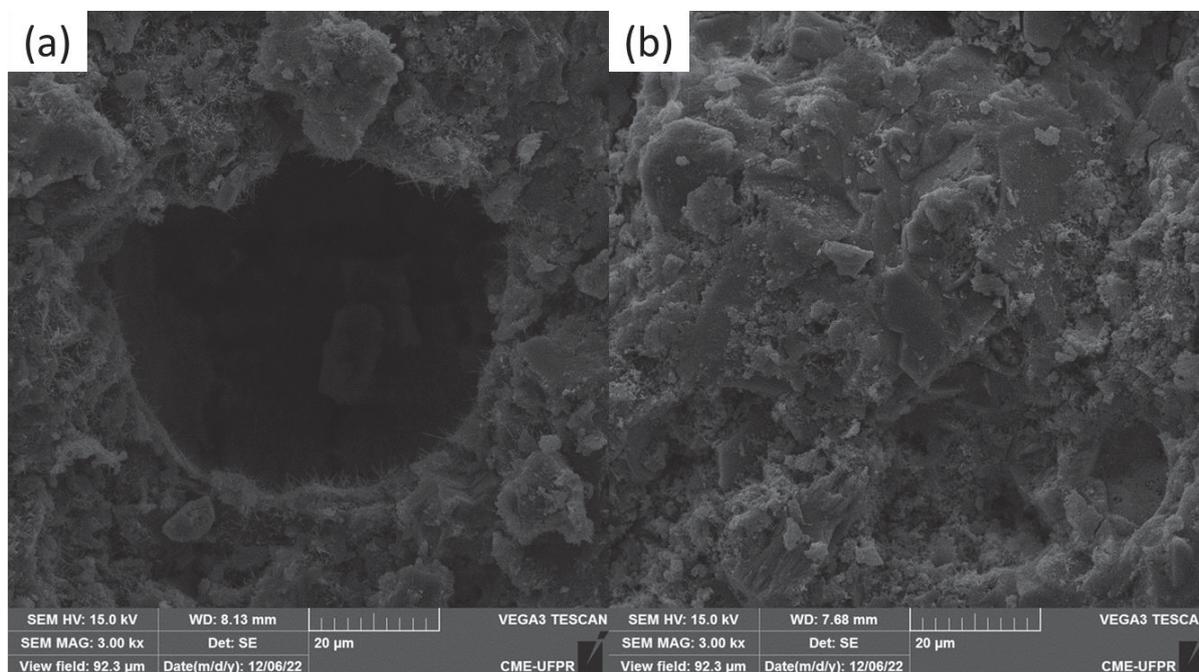
De forma coincidente com o que foi encontrado na literatura, os resultados obtidos neste trabalho indicam um aumento progressivo da quantidade de escória reagida na presença dos teores de 2,0 e 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H. Entretanto, salienta-se que tal ensaio deve ser considerado apenas como indicativo, já que as medições foram obtidas com uma amostra de cada composição analisada (REFE, E2 e E3).

4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As imagens obtidas através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura são apresentadas a seguir. Na Figura 33, compara-se a microestrutura da amostra

de referência do cimento CP III (a) com a mesma pasta com adição de 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H (b) aos 28 dias de idade:

FIGURA 33 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III DE REFERÊNCIA E COM 2,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE

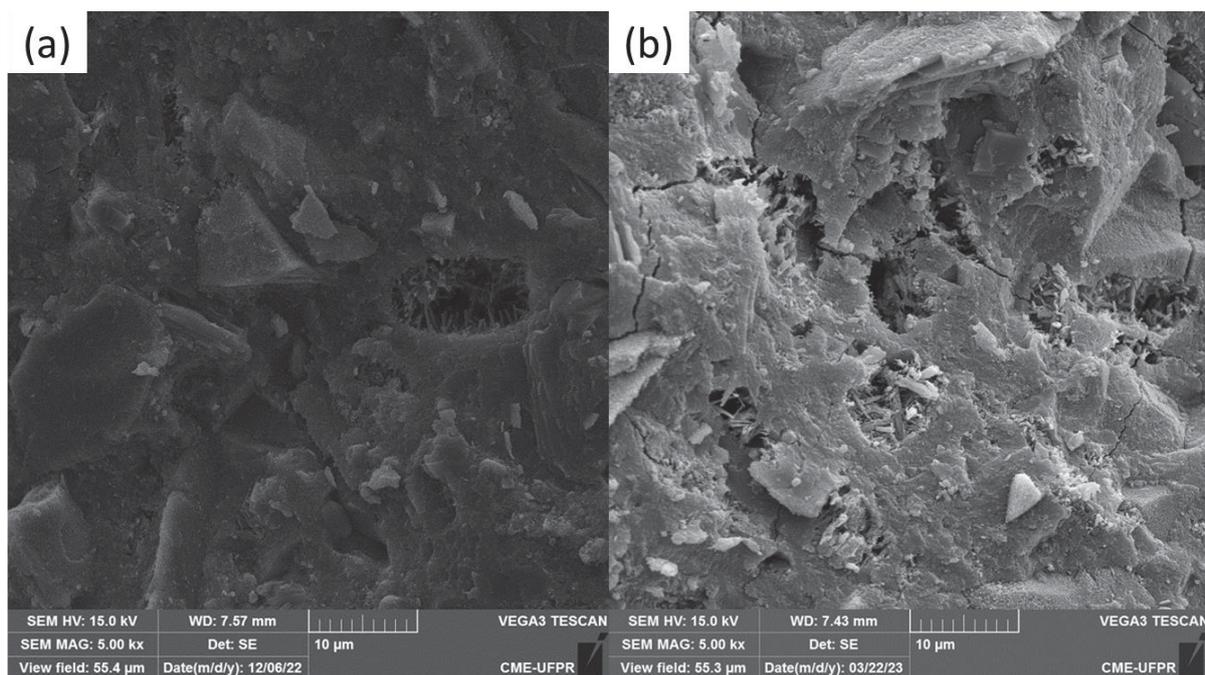


LEGENDA: Pastas cimentícias: (a) sem aditivo; (b) com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H.
 FONTE: A autora (2023).

Observa-se uma microestrutura mais densificada na presença do aditivo, tornando mais comum a identificação de grandes poros vazios na matriz cimentícia de referência. Também se notou a ocorrência de poros menores nas amostras aditivadas, entretanto as formações costumam estar preenchidas com produtos de hidratação, assim como visto em Wang *et al.* (2020), F. Zhou *et al.* (2021), He e Liao (2021) e Gu *et al.* (2022).

Esse fenômeno é apresentado na Figura 34, com uma comparação de imagens do mesmo cimento (CP III) entre as amostras com 2,0 (a) e 3,0% (b) de aditivo, também para o período de 28 dias. Na imagem, observa-se preenchimento de poros para ambos os teores de incorporação de aditivo de sementes de C-S-H. Esse efeito também pode ser identificado para o cimento CP IV, conforme mostrado na Figura 35, com imagens de Z2 (a) e Z3 (b) para a idade de 28 dias:

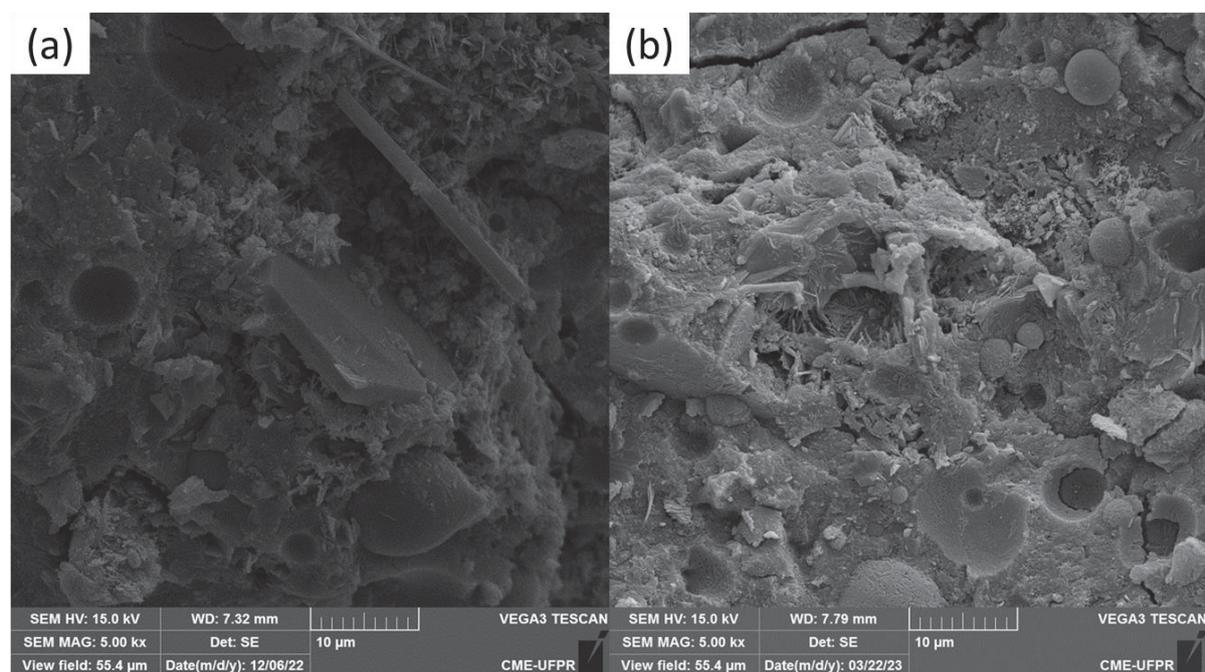
FIGURA 34 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP III COM 2,0 E 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE



LEGENDA: Pastas cimentícias com aditivo de sementes de C-S-H: (a) teor de 2,0%; (b) teor de 3,0%.

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 35 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV COM 2,0 E 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE

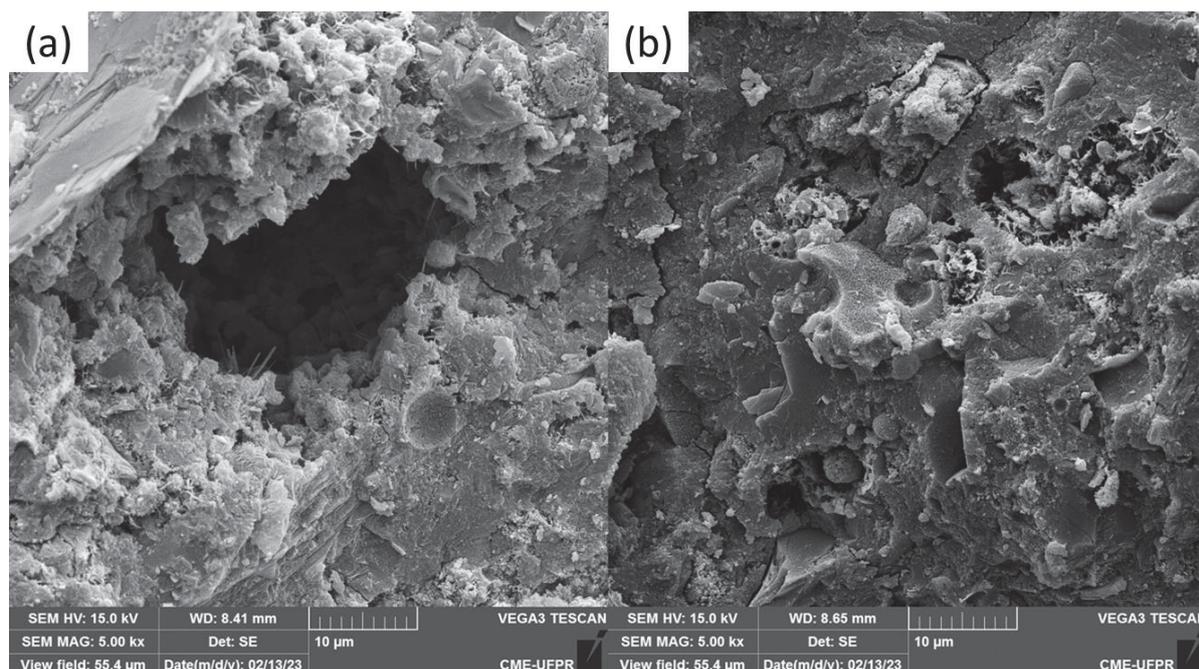


LEGENDA: Pastas cimentícias com aditivo de sementes de C-S-H: (a) teor de 2,0%; (b) teor de 3,0%.

FONTE: A autora (2023).

O preenchimento de vazios por produtos de hidratação nas pastas cimentícias analisadas continuou sendo notado para idades mais avançadas. Na Figura 36, observa-se o mesmo efeito apresentado anteriormente para pastas de cimento CP IV com idade de 91 dias. Na imagem, são mostradas as amostras de referência (a) e com teor de 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H (b):

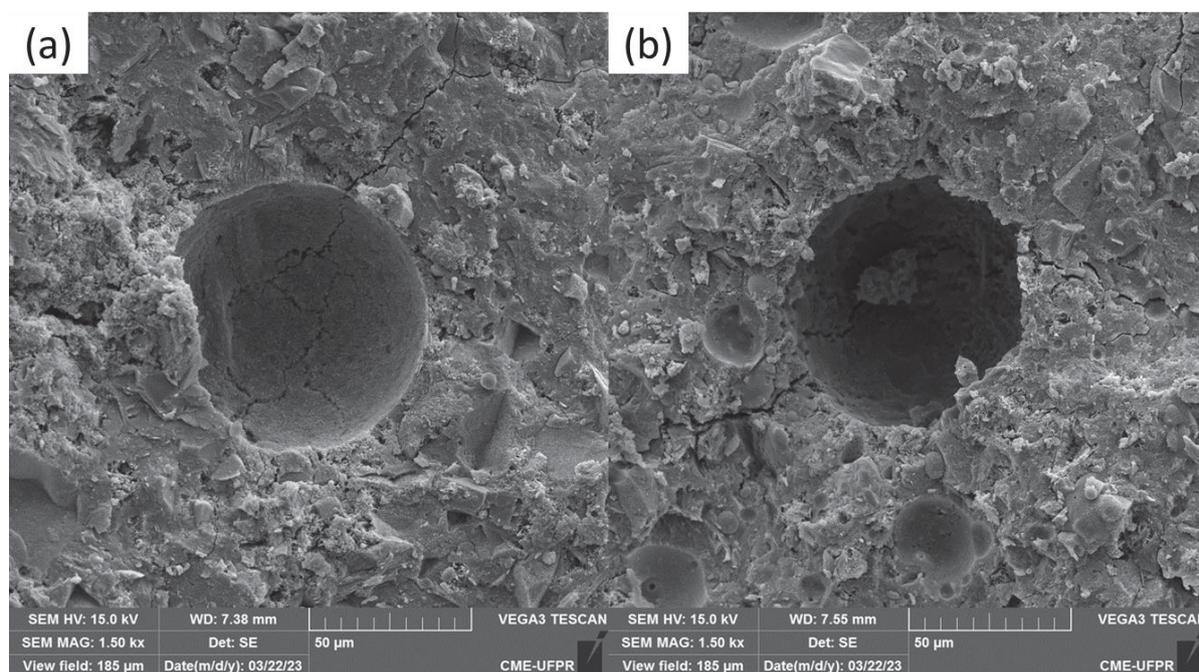
FIGURA 36 – MICROSCOPIA DAS PASTAS DE CIMENTO CP IV DE REFERÊNCIA E COM 2,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 91 DIAS DE IDADE



LEGENDA: Pastas cimentícias: (a) sem aditivo; (b) com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H.
 FONTE: A autora (2023).

A formação de produtos de hidratação dentro dos poros da matriz cimentícia justifica os resultados encontrados nos ensaios referentes a resistências mecânicas. No item 4.4.1, é possível notar que existe uma tendência de as amostras com aditivo apresentarem maiores valores de resistência à compressão do que as de referência. Entretanto, uma maior quantidade de vazios foi percebida na presença do teor de extrapolação (3,0%), assim como o maior aparecimento de fissuras interconectando os poros da matriz, conforme pode ser visto na Figura 34 (b) e na Figura 35 (b). A formação descrita também é reconhecida na Figura 37, na qual são mostradas as pastas dos cimentos com escória (a) e com cinzas volantes (b) com incorporação de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H.

FIGURA 37 – MICROSCOPIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS COM 3,0% DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H AOS 28 DIAS DE IDADE



LEGENDA: Pastas cimentícias com 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H: (a) CP III; (b) CP IV.
 FONTE: A autora (2023).

As imagens obtidas evidenciam a possível causa da redução de desempenho das pastas cimentícias na presença de maiores teores de aditivo. Os poros e fissuras identificados nas imagens de tais composições fragilizam as amostras, como observado de forma mais pronunciada nos ensaios de tração à flexão e retração por secagem (itens 4.4.2 e 4.6 deste trabalho).

4.9 COMPOSIÇÕES ADICIONAIS

Diante dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, decidiu-se refazer alguns experimentos para as pastas E2 e Z2 na presença dos aditivos antiespumante e estabilizador. Dessa forma, os dados encontrados puderam ser comparados aos apresentados pelas pastas de referência e com teor 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H para cada cimento. Os testes repetidos com o uso desses materiais foram os ensaios de tempo de pega, resistências mecânicas e retração por secagem. Os valores obtidos, assim como a comparação entre as outras composições citadas, são apresentados a seguir:

4.9.1 Tempo de pega

Apresenta-se na Tabela 24 os resultados de tempo de início e fim de pega apresentados pelas pastas cimentícias com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H na presença dos aditivos complementares (E2A e Z2A). A fim de comparar os resultados, também são mostrados os valores obtidos para as pastas de referência e apenas com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H:

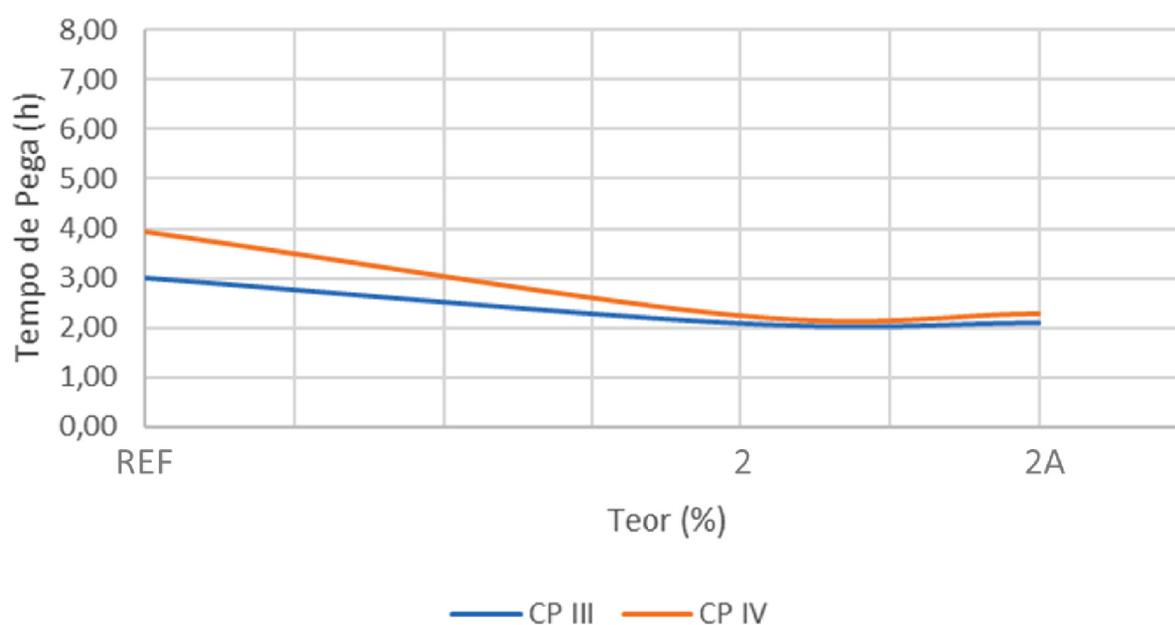
TABELA 24 – TEMPOS DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Tipo de cimento	Medição 1 (h)		Medição 2 (h)		Média (h)	
		Ti	Tf	Ti	Tf	Ti	Tf
REFE	CP III	3,15	7,23	2,88	7,05	3,02	7,14
E2		2,12	5,20	2,07	4,73	2,09	4,97
E2A		2,05	4,88	2,15	4,98	2,10	4,93
REFZ	CPIV	4,02	6,68	3,88	6,38	3,95	6,53
Z2		2,20	4,70	2,30	4,63	2,25	4,67
Z2A		2,27	4,77	2,32	4,65	2,29	4,71

FONTE: A autora (2023).

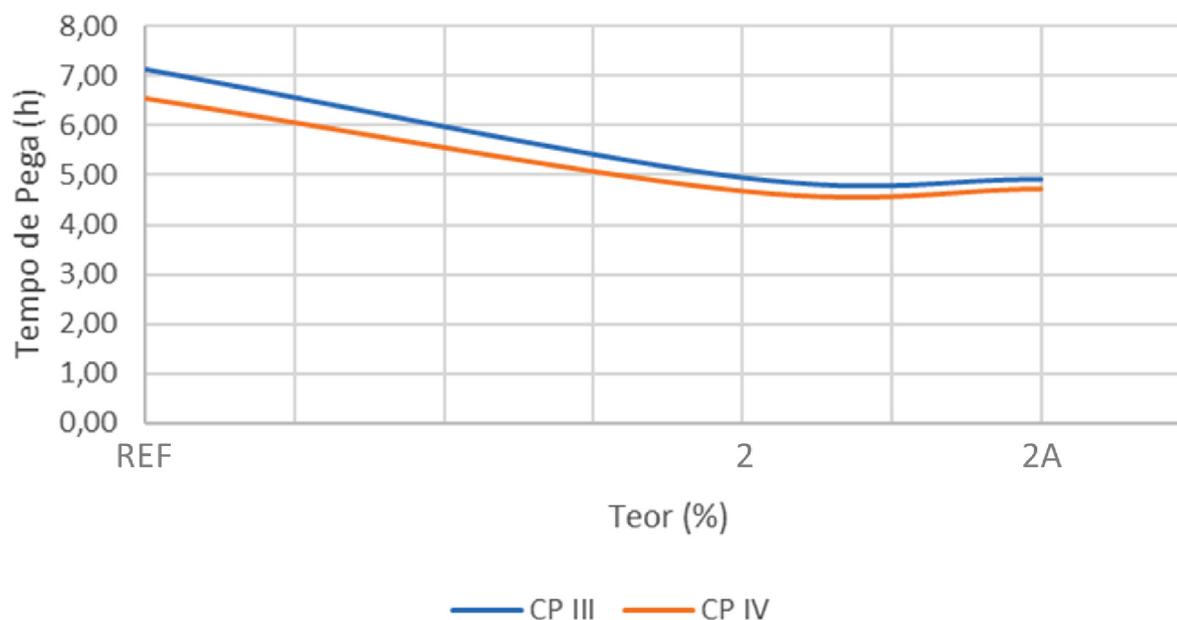
O comportamento comparativo entre as amostras analisadas também é apresentado na Figura 38, referente ao tempo de início de pega das pastas, e na Figura 39, para o tempo de fim de pega.

FIGURA 38 – TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 39 – TEMPO DE FIM DE PEGA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES



FONTE: A autora (2023).

Observa-se que a incorporação dos aditivos complementares não alterou o comportamento referente aos tempos de início e fim de pega das misturas, assim como apontado pela análise de variância realizada com os valores (Apêndice F). Isso pode ser concluído para o cimento CP III através da comparação entre as composições E2 e E2A, com tempos de início e fim de pega semelhantes, próximos de 2,10 e 4,95 horas, respectivamente. A mesma tendência é evidenciada para o cimento com cinzas volantes, que apresentou valores próximos de 2,30 e 4,70 horas para os tempos de início e fim de pega para as composições Z2 e Z2A.

Portanto, através da análise dos resultados apresentados, conclui-se que o uso de aditivos antiespumante e estabilizador não acarreta diferença relevante nos tempos de início e fim de pega das pastas compostas por ambos os cimentos.

4.9.2 Resistências mecânicas

As resistências à compressão e à tração na flexão também foram tomadas para as composições com aditivos complementares (antiespumante e estabilizador). Na Tabela 25 são expostos os valores médios de resistências à compressão obtidos para as pastas cimentícias sem (REFE, E2, REFZ e Z2) e com (E2A e Z2A) os aditivos complementares para as idades de 1, 7 e 28 dias:

TABELA 25 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Resistência à compressão (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
REFE	29,1	52,3	66,2
E2	37,4	63,0	69,5
E2A	37,2	72,0	78,1
REFZ	29,9	52,1	59,8
Z2	53,7	52,7	61,1
Z2A	54,3	58,8	62,4

FONTE: A autora (2023).

Para o cimento com escórias, não é notada diferença entre os valores apresentados pelas composições E2 e E2A em 24 horas, com resistências próximas de 37,0 MPa, assim como comprovado na análise de variância (Apêndice G). Apesar de os valores alcançados pela pasta sem os aditivos complementares serem superados por E2A, que atingiu resistências de 78,1 MPa em 28 dias, a análise de variância realizada não aponta diferença entre os dados. Um comportamento similar é observado para o cimento com cinzas volantes para 1 e 7 dias, atingindo até 58,8 MPa para Z2A em 7 dias. Diferente do ocorrido para o CP III, é possível notar que a diferença entre as composições é reduzida em 28 dias, quando foram registrados valores discretamente superiores a 60,0 MPa para as composições Z2 e Z2A.

Com relação às resistências à compressão, é possível acompanhar as diferenças entre as composições através dos valores comparativos entre as pastas aditivadas e as de referência, mostradas na Tabela 26:

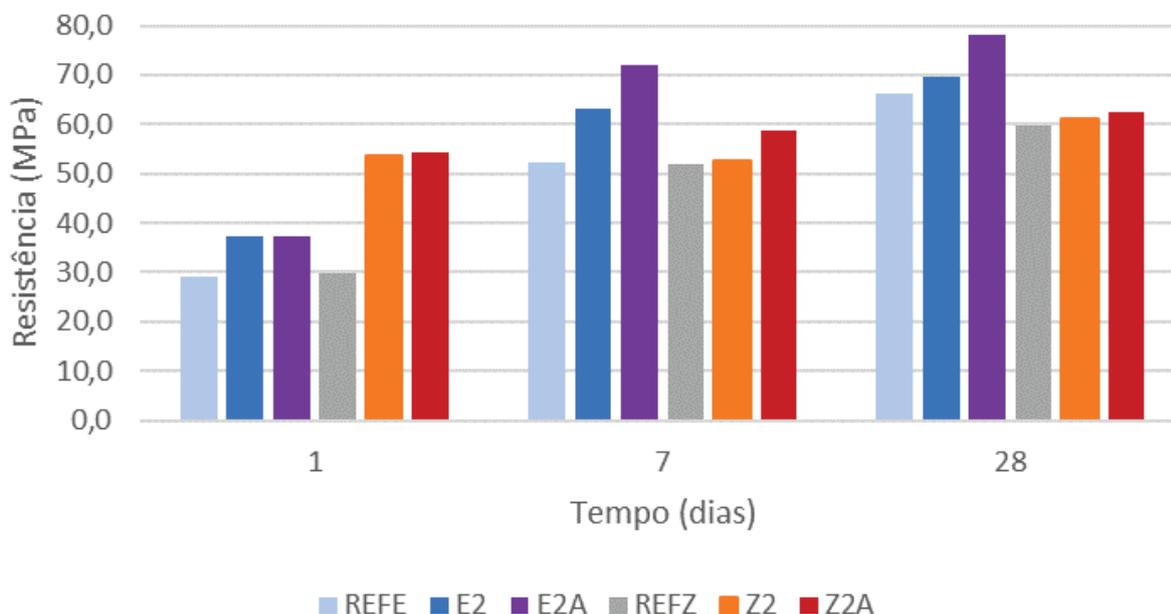
TABELA 26 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Diferença de Resistência com Relação às Referências (%)		
	1 dia	7 dias	28 dias
REFE	-	-	-
E2	28,5	20,5	5,0
E2A	27,8	37,7	18,0
REFZ	-	-	-
Z2	79,6	1,2	2,2
Z2A	81,6	12,9	4,3

FONTE: A autora (2023).

Ainda, a evolução dos valores de resistência à compressão referente às amostras sem e com aditivos complementares ao longo do período analisado é representada a seguir na Figura 40:

FIGURA 40 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES



FONTE: A autora (2023).

É evidente o aumento de resistência frente às pastas de referência apresentado por ambas as composições aditivadas, ou seja, pastas com apenas aditivo de sementes de C-S-H e pastas com esse aditivo juntamente com os aditivos complementares. Apesar disso, nota-se que em alguns períodos as resistências das composições com os três aditivos superam às apresentadas pelas pastas com apenas o aditivo de sementes de C-S-H.

Em 24 horas, não é percebida diferença entre E2 e E2A, que atingiram valores quase 30,0% maiores que REFE, nem entre Z2 e Z2A, com acréscimos de aproximadamente 80,0% comparados a REFZ. Para as outras idades, entretanto, as pastas de cimento CP III com aditivos complementares alcançaram melhor desempenho quando comparadas às com apenas aditivo de sementes de C-S-H. Nesse caso, o aumento de resistência frente a REFE chegou a até 37,7 e 18,0% para E2A em 7 e 28 dias. No caso do cimento CP IV, a diferença entre as composições Z2 e Z2A é notada apenas para a idade de 7 dias, quando é observado acréscimo somente para a pasta com aditivos antiespumante e estabilizador. Nesse caso, o aumento de resistência alcançado equivale a 12,9% em comparação a REFZ. Em 28 dias, não é notada diferença entre as resistências das pastas de cimento CP IV para os teores avaliados.

A resistência à tração na flexão apresentadas pelas pastas avaliadas também foi considerada e a médias dos valores obtidos para REFE, E2, E2A, REFZ, Z2 e Z2A são expostas na Tabela 27:

TABELA 27 – RESISTÊNCIA MÉDIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Resistência à tração na flexão (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
REFE	4,8	8,2	8,4
E2	7,6	8,2	9,0
E2A	7,7	9,5	12,0
REFZ	7,7	8,4	8,8
Z2	8,5	9,6	9,2
Z2A	8,2	9,5	12,3

FONTE: A autora (2023).

De forma similar ao ocorrido para as resistências à compressão, os valores de resistência à tração na flexão se assemelham entre as pastas com aditivo de sementes de C-S-H sem e com aditivos complementares em 24 horas para ambos os cimentos e em 7 dias para o cimento CP IV. Já após 24 horas, nota-se diferença entre as pastas E2 e E2A, observando-se resistências de 9,5 e 12,0 MPa em 7 e 28 dias para a composição com aditivos complementares. Um acréscimo da propriedade também é percebido para as pastas com aditivos antiespumante e estabilizador com o cimento CP IV para a idade de 28 dias. Nesse período, observa-se que Z2 atinge uma resistência de 9,2 MPa, enquanto Z2A chega a um valor de 12,3 MPa.

Verifica-se também o comportamento das pastas analisadas frente à tração na flexão, evidenciado na Tabela 28, com a comparação entre os valores das composições aditividades e de referência:

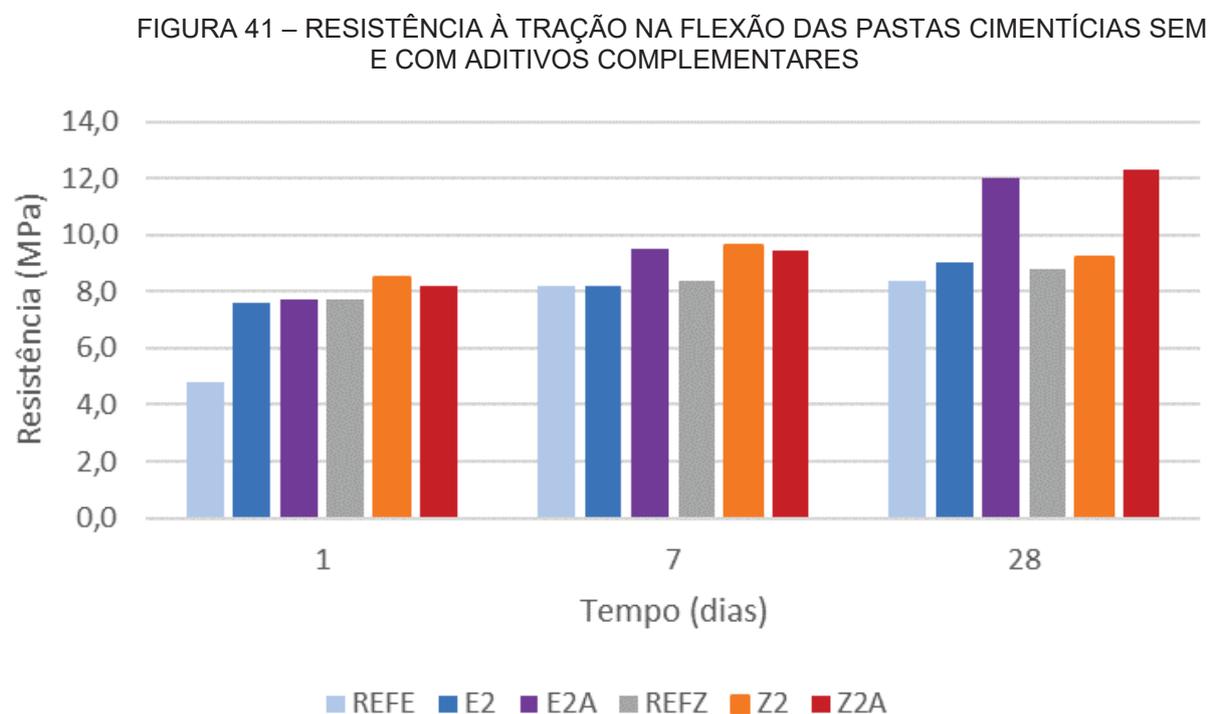
TABELA 28 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS PASTAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Diferença de Resistência com Relação às Referências (%)		
	1 dia	7 dias	28 dias
REFE	-	-	-
E2	58,3	0,0	7,1
E2A	60,6	15,7	43,1
REFZ	-	-	-
Z2	10,4	14,3	4,5
Z2A	6,1	12,7	41,4

FONTE: A autora (2023).

Assim como observado para a compressão e verificado através de análise de variância dos resultados (Apêndice G), não há diferença relevante para o acréscimo de resistências à tração na flexão entre as composições aditivadas em 24 horas para ambos os cimentos. Em 7 e 28 dias, é possível perceber um aumento da propriedade mais efetivo para as pastas de cimento CP III com aditivos complementares do que o apresentado pelas composições com apenas o aditivo de sementes de C-S-H. Em 7 dias, não foi observada diferença entre E2 e REFE, enquanto E2A mostrou-se 15,7% maior do que a referência. Em 28 dias as pastas com aditivos complementares alcançaram um aumento significativamente superior. Nesse caso, as composições E2A apresentaram uma diferença de 43,1% com relação a REFE, enquanto as resistências de E2 mostraram uma diferença de apenas 7,1% da referência.

Para as composições com cimento CP IV, por outro lado, não há diferença relevante entre as pastas aditivadas até 7 dias. Já em 28 dias, é percebe-se um acréscimo superior sofrido pelas composições com antiespumante e estabilizador, tal qual ocorrido para o cimento CP III. Nesse caso, as amostras Z2A apresentaram valores 41,4% maiores do que REFZ, enquanto Z2 apenas 4,5%. Através da Figura 41, é possível acompanhar o comportamento descrito referente às resistências à tração na flexão:



FONTE: A autora (2023).

A melhora no desempenho das pastas de ambos os cimentos frente às resistências mecânicas evidencia a necessidade do uso de aditivos antiespumante e estabilizador para melhor eficiência do aditivo de sementes de C-S-H. Apesar do emprego isolado desse produto não necessariamente diminuir as resistências encontradas, torna-se evidente que o seu efeito é potencializado com a presença de aditivos complementares. Observa-se baixa influência do uso desses produtos nas idades iniciais das amostras com gradual aumento até a idade mais avançada avaliada, de 28 dias. É possível que esse comportamento esteja relacionado à interconexão dos poros gerados pela presença do aditivo de sementes de C-S-H. Dessa forma, a propagação das fissuras ao longo do tempo comprometeria o desempenho mecânico das amostras, assim como retomado por Wang *et al.* (2020), He e Liao (2021) e Wang *et al.* (2021).

4.9.3 Retração por secagem

A retração por secagem sofrida pelas composições com aditivos complementares (antiespumante e estabilizador) foi avaliada durante 28 dias. Os valores médios apresentados pelas amostras sem (REFE, E2, REFZ e Z2) e com (E2A e Z2A) os aditivos complementares durante esse período são expostos na Tabela 29:

TABELA 29 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

Código	Variação Dimensional (mm/m)				
	1 dia	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
REFE	-0,3173	-1,1483	-1,5470	-1,8180	-2,0430
E2	-0,1943	-1,1033	-1,5117	-1,7803	-1,9843
E2A	-0,1993	-0,6970	-0,7377	-0,7600	-0,8013
REFZ	-0,5620	-1,7670	-1,9993	-2,1787	-2,3337
Z2	-0,8023	-2,2190	-2,4717	-2,6617	-2,8060
Z2A	-0,3560	-0,6527	-0,8490	-0,8593	-0,9367

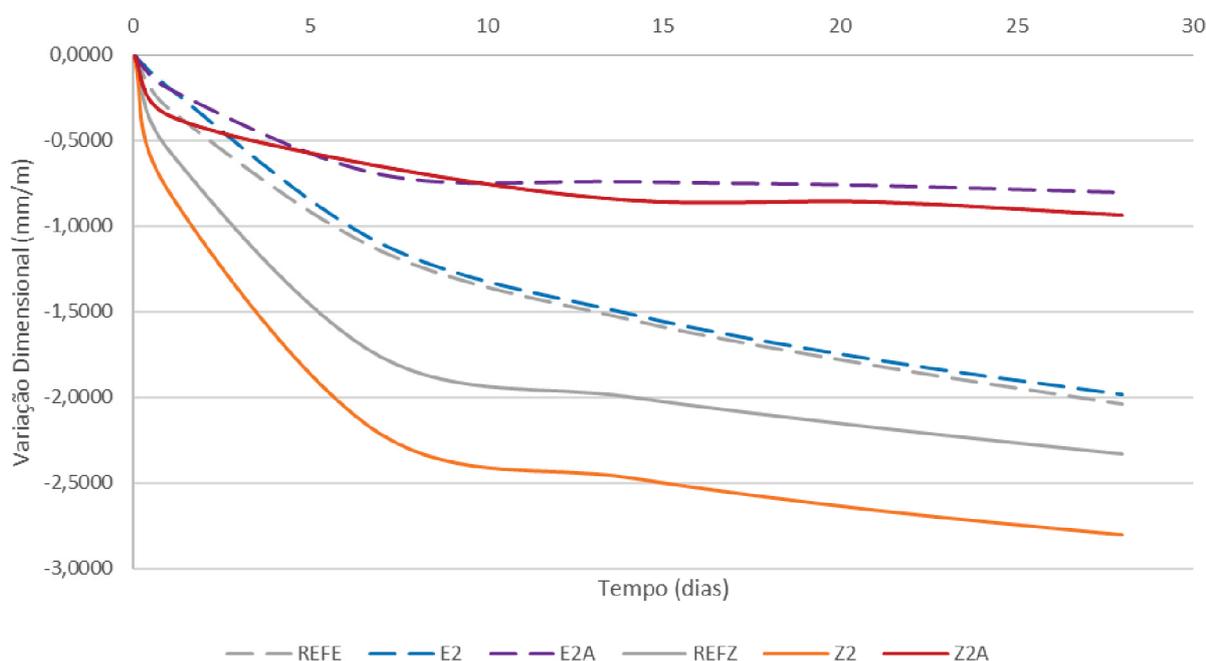
FONTE: A autora (2023).

Através da análise dos resultados, é possível identificar uma redução elevada da variação dimensional apresentada pelas pastas com os aditivos complementares. Em 24 horas, a retração sofrida por REFE é medida em 0,3173 mm/m, passando para 0,1943 e 0,1993 mm/m para as composições E2 e E2A. Nota-se que nesse momento as pastas aditivadas atingem valores próximos, não demonstrando diferença

relevante entre si. Porém, para as idades seguintes, uma distância gradual é estabelecida entre as duas amostras. Em 28 dias, as pastas cimentícias com apenas o aditivo de sementes de C-S-H alcançam o valor de 1,9843 mm/m, enquanto E2A se mantém com apenas 0,8013 mm/m.

As pastas de cimento CP IV já apresentam diferença desde as primeiras 24 horas, quando uma redução significativa é notada entre Z2 e Z2A, que resultaram em reduções dimensionais de 0,8023 e 0,3560 mm/m, respectivamente. Essa tendência se mantém para idades mais avançadas até os 28 dias, com valores de, respectivamente, 2,8060 e 0,9367 mm/m para as pastas sem e com aditivos complementares. O comportamento descrito e a acentuada diferença entre as pastas cimentícias são evidenciados através do gráfico de variação dimensional apresentado na Figura 42:

FIGURA 42 – RETRAÇÃO POR SECAGEM DAS PASTAS CIMENTÍCIAS SEM E COM ADITIVOS COMPLEMENTARES



FONTE: A autora (2023).

Para ambos os cimentos é notada grande diferença entre a retração sofrida pelas composições com e sem o uso de aditivos antiespumante e estabilizador. Ao final do período analisado, o emprego conjunto dos três aditivos (sementes de C-S-H, antiespumante e estabilizador) resultou em valores de retração 59,62% (CP III) e

66,62% (CP IV) menores do que os apresentados pelas composições com apenas o aditivo de sementes de C-S-H.

A configuração apresentada pelas composições frente ao fenômeno de retração por secagem corrobora com a hipótese comentada ao longo da discussão de resultados neste trabalho. Os valores encontrados levam a crer que a possível ocorrência de segregação de fases e interconexão dos poros, influenciada pelo uso de aditivo de sementes de C-S-H, pode ser controlada pelos aditivos antiespumante e estabilizador. Dessa forma, quando o aditivo acelerador é empregado em conjunto com os aditivos complementares, a retração sofrida pelas pastas cimentícias será reduzida.

4.10 VANTAGENS TRAZIDAS PELO USO DE ADITIVO DE SEMENTES DE C-S-H

De forma a estabelecer uma visão geral das vantagens trazidas pelo uso do aditivo de sementes de C-S-H, observadas ao longo desta pesquisa, os dados apresentados foram compilados. No Quadro 3 apresenta-se o potencial da incorporação do aditivo de sementes de C-S-H, utilizado isoladamente e dentro da faixa de recomendação do fabricante (até 2,0%), em ensaios específicos. As propriedades expostas foram selecionadas de forma a evidenciar o benefício do uso do aditivo acelerador e são apresentadas juntamente com a ação que mais traz vantagens ao desempenho do material, seja a redução ou o aumento da propriedade analisada. Essa informação consta na coluna denominada “Vantagem”.

Além disso, são discriminados os valores obtidos para cada teste e a sua diferença relativa às respectivas pastas de referência de cada cimento (REFE e REFZ), sendo selecionado o teor, dentro da faixa de recomendação do fabricante, que apresentou efeito mais pronunciado para cada propriedade analisada. Como diferenças absolutas inferiores a 5,0% não foram consideradas relevantes, denominou-se efeito “sem alteração” para tais situações.

QUADRO 3 – Potencial do uso de aditivo de sementes de C-S-H com teores dentro da faixa de recomendação (até 2,0%)

Propriedade analisada	Vantagem	CP III		CP IV	
		Valor	Diferença*	Valor	Diferença*
Tempo de início de pega	Redução	2,09 h	-30,7%	2,25 h	-43,0%
Tempo de fim de pega	Redução	4,97 h	-30,5%	4,67 h	-28,6%
Calorimetria - Tempo para pico de temperatura	Redução	8,50 h	-21,2%	5,47 h	-46,4%
Resistência à compressão - 1 dia	Aumento	37,4 MPa	+28,5%	53,7 MPa	+79,6%
Resistência à compressão - 28 dias	Aumento	71,4 MPa	+7,9%	61,1 MPa	Sem alteração
Resistência à compressão - 91 dias	Aumento	74,4 MPa	+12,6%	64,1 MPa	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 1 dia	Aumento	7,6 MPa	+58,3%	8,5 MPa	+10,4%
Resistência à tração na flexão - 28 dias	Aumento	10,8 MPa	+28,6%	10,9 MPa	+23,9%
Resistência à tração na flexão - 91 dias	Aumento	10,1 MPa	+14,8%	11,2 MPa	+28,7%
Quantidade de escória reagida - 1 dia	Aumento	6,4%	+82,9%	-	-
Quantidade de escória reagida - 28 dias	Aumento	18,0%	+16,1%	-	-
Quantidade de escória reagida - 91 dias	Aumento	24,0%	+15,4%	-	-

*Com relação às pastas de referência (REFE e REFZ).

FONTE: A autora (2023).

De maneira semelhante, a influência do teor de extrapolação, de 3,0%, no desempenho das pastas cimentícias avaliadas com relação às mesmas propriedades anteriormente analisadas é discriminada no Quadro 4:

QUADRO 4 – Influência do teor de extrapolação de aditivo de sementes de C-S-H (3,0%)

Propriedade analisada	Vantagem	CP III		CP IV	
		Valor	Diferença*	Valor	Diferença*
Tempo de início de pega	Redução	1,67 h	-44,8%	1,97 h	-50,2%
Tempo de fim de pega	Redução	5,04 h	-29,4%	5,38 h	-17,6%
Calorimetria - Tempo para pico de temperatura	Redução	8,43 h	-21,9%	5,16 h	-49,41%
Resistência à compressão - 1 dia	Aumento	13,3 MPa	-54,3%	32,0 MPa	+7,0%
Resistência à compressão - 28 dias	Aumento	72,2 MPa	+9,1%	63,9 MPa	+6,9%
Resistência à compressão - 91 dias	Aumento	74,1 MPa	+12,1%	62,6 MPa	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 1 dia	Aumento	4,7 MPa	Sem alteração	7,4 MPa	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 28 dias	Aumento	7,0 MPa	-16,7%	8,6 MPa	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 91 dias	Aumento	9,0 MPa	Sem alteração	8,9 MPa	Sem alteração
Quantidade de escória reagida - 1 dia	Aumento	7,9%	+125,7%	-	-
Quantidade de escória reagida - 28 dias	Aumento	23,8%	+53,5%	-	-
Quantidade de escória reagida - 91 dias	Aumento	28,8%	+38,5%	-	-

*Com relação às pastas de referência.

FONTE: A autora (2023).

Finalmente, no Quadro 5 é resumido o comportamento das pastas cimentícias com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H na presença de aditivos complementares (E2A e Z2A) com relação às pastas de referência (sem nenhum aditivo) e com relação às amostras com o mesmo teor de aditivo acelerador (2,0%), mas sem a presença dos demais componentes (E2 e Z2):

QUADRO 5 - Resultados referentes às pastas com aditivos complementares

Propriedade analisada	Vantagem	CP III		CP IV	
		Referência	C-S-H	Referência	C-S-H
Tempo de início de pega	Redução	-30,5%	Sem alteração	-42,0%	Sem alteração
Tempo de fim de pega	Redução	-31,0%	Sem alteração	-27,9%	Sem alteração
Resistência à compressão - 1 dia	Aumento	+27,8%	Sem alteração	+81,6%	Sem alteração
Resistência à compressão - 28 dias	Aumento	+18,0%	+12,4%	Sem alteração	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 1 dia	Aumento	+60,6%	Sem alteração	+6,1%	Sem alteração
Resistência à tração na flexão - 28 dias	Aumento	+43,1%	+33,3%	+41,4%	+33,7%
Retração por secagem - 1 dia	Redução	-37,2%	Sem alteração	-36,7%	-55,6%
Retração por secagem - 28 dias	Redução	-60,8%	-59,6%	-59,9%	-66,6%

LEGENDA: Referência – Diferença relativa às pastas de referência; C-S-H – Diferença relativa às pastas com apenas 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H.

FONTE: A autora (2023).

Diante dos valores apresentados, é possível comprovar a aceleração da hidratação das pastas cimentícias testadas na presença do aditivo de sementes de C-S-H. Tal fenômeno é evidenciado através da redução dos tempos de pega (entre 30 e 43%) e antecipação do pico de calor de hidratação (entre 20 e 47%) para o teor de 2,0% com relação às pastas de referência. Possivelmente, o mecanismo de nucleação exerceu papel fundamental na antecipação desses acontecimentos, já que a promoção de maior espaçamento entre as partículas das misturas cimentícias gerada, otimiza o processo de hidratação dos grãos de clínquer.

Isso também pode ser evidenciado através da resistência à compressão em 1 dia, que alcança valores mais pronunciados para o cimento CP IV. O aumento de quase 80% nessa propriedade para o cimento com cinzas volantes é quase três vezes maior do que a diferença alcançada pelo mesmo teor de aditivo de sementes de C-S-H (2,0%) para o cimento CP III, que obteve um acréscimo de resistência de quase 30% para 1 dia. Pode-se correlacionar essa discrepância de desempenho à quantidade de clínquer presente em cada cimento, de 77% para o CP IV e de apenas 48% para o CP III. Desta forma, o mecanismo de nucleação exerce um impacto maior na otimização da hidratação da pasta cimentícia com cinzas volantes, já que sua atuação principal é relacionada à quantidade de clínquer na mistura.

A tendência à estabilização das resistências em idades mais avançadas para as pastas de cimento com cinzas volantes reforça o fenômeno da antecipação das reações de hidratação na presença de aditivo de sementes de C-S-H. Isso comprova que por mais que os hidratos sejam formados de forma precoce, o desempenho a longo prazo não será influenciado. O mesmo não ocorre para o cimento com escórias, já que mesmo em 91 dias, a presença de aditivo de sementes de C-S-H ainda resulta em maiores resistências (até 13% com relação à referência). É provável que as escórias, assim como os grãos de clínquer, também sejam beneficiadas pelo mecanismo de nucleação gerado pelo aditivo de sementes de C-S-H, já que o cimento CP III apresenta valores da adição reagida maiores do que o dobro do valor apresentado pela referência (até 125%, para o teor de 3,0%). Além disso, é possível que ocorra uma interação química entre as escórias e o aditivo acelerador, já que mesmo em 91 dias, ainda se notam valores superiores para quantidade de escórias reagidas, como quantidades até 40% maiores, frente às pastas não aditivadas, para o teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H.

Os valores apresentados também evidenciam o impacto nas propriedades iniciais das pastas cimentícias gerado pelo teor de extrapolação de aditivo de sementes de C-S-H, de 3,0%. Entretanto, percebe-se que o mesmo padrão não é mantido para idades mais avançadas. Como tal teor afeta propriedades diretamente ligadas ao processo de hidratação das pastas cimentícias, como tempos de pega e resistências mecânicas iniciais, infere-se que o alto teor de PCE, contido no aditivo de sementes de C-S-H, gera um atraso na formação inicial dos hidratos das pastas cimentícias. Por essa razão, há uma alteração apenas nas propriedades iniciais das pastas, com o atraso da hidratação sendo gradativamente compensado ao longo do tempo. Por fim, para idades a partir de 7 dias, o desempenho das pastas cimentícias na presença do teor de 3,0% de aditivo de sementes de C-S-H é recuperado, muitas vezes ultrapassando os valores apresentados pelo teor de 2,0%.

Apesar de trazer benefícios frente a algumas propriedades, como resistências mecânicas, o uso de teores mais elevados de aditivo de sementes de C-S-H, como 2,0 e 3,0%, pode influenciar negativamente o comportamento das pastas cimentícias, como observado na retração por secagem e resistência à tração na flexão. É possível que essa perda de desempenho seja causada pelo excesso de vazios e separação de fases gerados na presença do aditivo, como também identificado através de imagens MEV. Diante disso, comprovou-se, através do emprego em conjunto de 2,0%

do aditivo de sementes de C-S-H e aditivos complementares, que a incorporação de antiespumante e estabilizador pode compensar este problema. As misturas que contaram com a presença dos três aditivos apresentaram valores de retração por secagem até 67% mais baixos e obtiveram aumento de até 34% na resistência à tração na flexão em 28 dias, quando comparadas às pastas apenas com 2,0% de aditivo de sementes de C-S-H, sem aditivos complementares. Desta forma, observa-se que o uso isolado do aditivo acelerador não atinge o seu potencial para o teor de 2,0%, resultando em melhor desempenho quando aplicado em conjunto com aditivos antiespumante e estabilizador. Entretanto, como o comportamento de apenas as composições com este teor de aditivo de sementes de C-S-H foi verificado na presença dos aditivos complementares, não se pode afirmar o mesmo para diferentes teores, necessitando de mais estudos.

Por fim, ao analisar e correlacionar os resultados apresentados, percebe-se que o uso do aditivo de sementes de C-S-H potencializa o desempenho de cimentos com grandes quantidades de adição em substituição ao clínquer, como é o caso do cimento CP III. Mesmo com apenas 48% de sua composição formada por clínquer, as pastas compostas por esse ligante apresentaram propriedades como resistência à compressão e tração na flexão e tempos de pega comparável às amostras do cimento CP IV, que conta com 77% de clínquer em sua formulação. Isso indica um potencial ambiental do uso do aditivo de sementes de C-S-H, que pode contribuir para a propagação aplicação e aceitação pelo mercado de pastas cimentícias com maiores teores de materiais cimentícios suplementares em substituição ao clínquer.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa objetivou avaliar a influência de diferentes teores de aditivo comercial de sementes de C-S-H em pastas cimentícias com teor de clínquer reduzido. Diante dos resultados obtidos ao longo do programa experimental, foi possível confirmar a eficiência da adição desse aditivo nas amostras ensaiadas. De forma semelhante ao que foi revisado na literatura, para as condições e materiais utilizados neste trabalho, foi possível concluir:

- O uso do aditivo de sementes de C-S-H é capaz de potencializar a aplicação de cimentos com menor teor de clínquer, já que compensa a redução de desempenho inicial destes materiais, como evidenciado por esta pesquisa. Isso pode representar um avanço frente às metas ambientais propostas pelo setor, que estaria apto a fornecer cimentos com menor emissão de CO₂ com desempenho comparável ao cimento Portland comum, mesmo nas idades iniciais do material;
- Assim como observado no presente trabalho, é possível que o uso do aditivo de sementes de C-S-H contribua para o aumento de desempenho, como a aceleração do tempo de pega e aumento das resistências iniciais, de pastas cimentícias compostas por outros tipos de materiais cimentícios suplementares que não as escórias granuladas de alto forno e cinzas volantes. Isso pode resultar em mais uma vantagem ambiental por conta do incentivo ao uso e estudo de novas alternativas de materiais substitutos ao clínquer, já que existe uma previsão de gradual redução na oferta das adições estudadas no presente trabalho;
- Apesar de possibilitar um vislumbre de progresso frente a questões ambientais, as emissões geradas pela obtenção dos insumos utilizados, bem como ao longo do processo produtivo para obtenção do aditivo de sementes de C-S-H, ainda devem ser consideradas. Caso o emprego de tal aditivo se torne amplamente adotado, mesmo que adicionado em baixos teores, o impacto ambiental gerado por sua produção pode se tornar mais significativo, já que a quantidade de CO₂ gerada durante esse processo compara-se à emitida ao longo da produção do cimento;

- A incorporação do aditivo de sementes de C-S-H é capaz de influenciar as propriedades dos estados fresco e endurecido de pastas cimentícias com uma tendência a atuar na redução do tempo de pega, antecipação da curva de calor de hidratação, aumento da viscosidade e das resistências mecânicas iniciais das pastas cimentícias;
- O efeito gerado pelo aditivo de sementes de C-S-H nas propriedades avaliadas das pastas cimentícias é dependente da dosagem empregada de aditivo e da composição do cimento utilizado referente à quantidade de clínquer e ao tipo de adição contida no aglomerante;
- A presença do aditivo de sementes de C-S-H promove uma otimização do processo de hidratação das pastas cimentícias. É possível que a redução da camada de inibição ao redor dos grãos de cimento, verificada em trabalhos anteriores, tenha acelerado a reação sofrida pelo material. Dessa forma, a formação precoce dos hidratos conduz a uma antecipação do tempo de pega e do pico da curva de temperatura durante a reação de hidratação do cimento;
- Com relação ao calor de hidratação liberado durante o processo de hidratação das pastas cimentícias, os períodos de indução e dormência da reação foram reduzidos, levando à antecipação do tempo de pega das amostras. De maneira similar, a redução dos períodos de aceleração e desaceleração da hidratação também é gerada na presença do aditivo acelerador;
- O efeito físico da incorporação do aditivo, de alta área superficial específica, aliado à possível influência da tensão superficial das misturas, causada pela carga elétrica ao longo da geometria coloidal do aditivo de sementes de C-S-H, conduz ao aumento da viscosidade das respectivas pastas;
- A formação precoce de hidratos gerada pelo aditivo de sementes de C-S-H acaba por desencadear o aumento das resistências mecânicas iniciais das amostras. Além disso, é possível que essa propriedade também seja influenciada pela formação de produtos de hidratação nos espaços vazios da matriz cimentícia, com conseqüente refinamento de poros, conforme indicado pela análise de imagens de microscopia eletrônica;
- A utilização do aditivo de sementes de C-S-H potencializa não apenas a hidratação do clínquer, como também da adição mineral de escória de alto forno, contida no cimento. Esse fenômeno pôde ser evidenciado através da

verificação das resistências mecânicas que apresentaram valores superiores mesmo para idades mais avançadas, como em 28 e 91 dias. A interação entre o aditivo de sementes de C-S-H e as escórias de alto forno foi confirmada através do ensaio de quantificação de escória reagida, que apontou valores superiores para maiores teores do aditivo;

- O uso isolado do aditivo de sementes de C-S-H pode levar ao aumento da retração por secagem e à redução de resistências à tração na flexão das pastas cimentícias. Esse fenômeno foi observado apesar do efeito de formação precoce de hidratos juntamente e concentração de temperaturas mais elevadas durante as primeiras horas de hidratação gerado pelo aditivo acelerador. Atribuiu-se tal comportamento à interconexão dos poros gerados durante sua mistura;
- É possível que a junção dos efeitos secundários do aditivo, de ligação dos poros através de fissuras ao longo do tempo e da exsudação, contribua para uma redução de resistência à tração, o que também acaba por facilitar a ocorrência de retração por secagem;
- O uso de aditivos complementares (antiespumante e estabilizador), em conjunto com aditivo de sementes de C-S-H, compensa os efeitos secundários gerados pelo aditivo acelerador para o teor de 2,0%. Dessa forma, o uso conjunto desses materiais leva ao aumento das resistências à tração na flexão e à retração por secagem das pastas cimentícias, além de não influenciar no efeito de aceleração do tempo de pega;
- Para o teor analisado, de 2,0%, nota-se que o uso isolado do aditivo de sementes de C-S-H não possibilita o alcance do potencial efeito do produto, sendo necessário o emprego conjunto desse material com os aditivos antiespumante e estabilizador;
- O ponto de saturação do aditivo de sementes de C-S-H, quando utilizado isoladamente, situa-se entre os teores de 2,0 e 3,0%, já que as pastas cimentícias com tal teor apresentam uma redução de desempenho frente às outras composições analisadas. É possível que, nesse caso, os efeitos de formação excessiva de vazios e separação de fases supere as vantagens observadas na presença de teores inferiores do aditivo; e

- A presença do aditivo de sementes de C-S-H é capaz de otimizar a reação de hidratação de pastas cimentícias. Dessa forma, o uso desse material possibilita a utilização de cimentos com teor reduzido de clínquer sem que tal ação afete o desempenho do aglomerante, o que torna tangível a produção de materiais com menor impacto ambiental por parte da indústria cimenteira. Portanto, o uso do aditivo de sementes de C-S-H é capaz de aliar vantagens técnicas e ambientais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos fenômenos observados ao longo desta pesquisa, é possível indicar os seguintes procedimentos para trabalhos futuros:

- Estudar o desempenho de pastas cimentícias com diferentes teores e tipos de materiais cimentícios suplementares na presença do aditivo de sementes de C-S-H e buscar estabelecer limites de atuação do aditivo na compensação dos efeitos gerados por essa modificação na composição do cimento;
- Realizar mais estudos referentes ao impacto ambiental gerado durante os processos de obtenção e produção do aditivo acelerador e seus precursores, como Análises de Ciclo de Vida;
- Analisar quimicamente o efeito da incorporação do aditivo de sementes de C-S-H nos produtos de hidratação formados nas pastas cimentícias;
- Estudar a possível existência de interação do aditivo com pozolanas em maiores quantidades de adição na pasta cimentícia, assim como observado para as escórias de alto forno na presente pesquisa;
- Diferenciar, por meio de ensaios focados nos produtos de hidratação formados, os efeitos físicos e químicos envolvidos na interação do aditivo de sementes de C-S-H com as adições minerais das pastas cimentícias;
- Avaliar de forma completa a influência dos aditivos complementares em diversos teores de aditivos de sementes de C-S-H, testando se há deslocamento do ponto de saturação do aditivo em quantidades mais elevadas às testadas neste trabalho em função da presença de antiespumante e estabilizador; e
- Verificar a influência de cada aditivo complementar isoladamente e buscar definir a dosagem de aditivo de sementes de C-S-H que torne necessário o uso de aditivo antiespumante, estabilizador ou de seu emprego em conjunto.

REFERÊNCIAS

ADESINA, A. Overview of workability and mechanical performance of cement-based composites incorporating nanomaterials. **Silicon**, 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00800-y>.

ALIZADEH, R.; RAKI, L.; MAKAR, J. M.; BEAUDOIN, J. J.; MOUDRAKOVSKI, I. Hydration of tricalcium silicate in the presence of synthetic calcium–silicate–hydrate. **Journal of Materials Chemistry**, v. 19, n. 42, p. 7937-7946, 2009.

ALTUN, I. A.; SERT, Y. Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 4, p. 677-680, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C1608-17**: Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C618-19**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. Disponível em <<https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

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

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15184**: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BAROIS-CAZENAVE, A.; MARCHAL, P.; FALK, V.; CHOPLIN, L. Experimental study of powder rheological behaviour. **Powder technology**, v. 103, n. 1, p. 58-64, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00013-3).

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; HASHIM, H. A novel design for green and economical cement manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, n. 1, p. 60-66, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.019>.

BENHELAL, E.; SHAMSAEI, E.; RASHID, M. I. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 104, p. 84-101, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.020>.

BENSTED, John. Early hydration behaviour of portland cement containing boro-, citro- and desulphogypsum. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 2, p. 165-171, 1980.

BHOJARAJU, C.; CHARRIER, M.; OUELLET-PLAMONDON, C. M. How admixtures affect yield stresses of cement. **ACI Materials Journal**, n. 118-M107, 2021. doi: [10.14359/51734149](https://doi.org/10.14359/51734149).

BRÄU, M.; MA-HOCK, L.; HESSE, C.; NICOLEAU, L.; STRAUSS, V.; TREUMANN, S.; WIENCH, K.; LANDSIEDEL, R.; WOHLLEBEN, W. Nanostructured calcium silicate hydrate seeds accelerate concrete hardening: a combined assessment of benefits and risks. **Archives of Toxicology**, v. 86, n. 7, p. 1077-1087, 2012. doi: <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0839-x>.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

BYE, Gerry C. **Portland cement: composition, production and properties**. Thomas Telford, 1999.

CAILLAHUA, M. C.; MOURA, F. J. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 2, p. 190-197, 2018.

CALMETRIX. **I-Cal 8000 HPC Isothermal Calorimeter**. Disponível em <<https://www.calmetrix.com/i-cal-8000-hpc>>. Acesso em: 01 ag. 2022.

CHANDARA, C.; AZIZLI, K. A. M.; AHMAD, Z. A.; SAKAI, E. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement. **Waste management**, v. 29, n. 5, p. 1675-1679, 2009.

CHARRIER, M.; OUELLET-PLAMONDON, C. M. Artificial neural network for the prediction of the fresh properties of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 156, p. 106761, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106761>.

CHEN, K.; WU, D.; XIA, L.; CAI, Q.; ZHANG, Z. Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 279, 122496, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2006.

DANISH, A.; SALIM, M. U.; AHMED, T. Trends and developments in green cement “A sustainable approach”. **Sustainable Structures and Materials**, v. 2, n. 1, p. 45-60, 2019. doi: <https://doi.org/10.26392/SSM.2019.02.01.045>.

DAS, S.; RAY, S.; SARKAR, S. Early strength development in concrete using preformed CSH nano crystals. **Construction and Building Materials**, v. 233, 117214, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117214>.

DE LA VARGA, I.; CASTRO, J.; BENTZ, D. P.; ZUNINO, F.; WEISS, J. Evaluating the hydration of high volume fly ash mixtures using chemically inert fillers. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 221-228, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.132>.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. Hydration reactions of cement combinations containing vitrified incinerator fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 5, p. 849-856, 2004.

FENG, P.; CHANG, H.; LIU, X.; YE, S.; SHU, X.; RAN, Q. The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes. **Materials and Design**, v. 186, 108320, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108320>.

GARRAULT-GAUFFINET, S.; NONAT, A. Experimental investigation of calcium silicate hydrate (CSH) nucleation. **Journal of Crystal Growth**, v. 200, n. 3-4, p. 565-574, 1999.

GARTNER, E. M.; YOUNG, J. F.; DAMIDOT, D. A.; JAWED, I. Hydration of Portland cement. **Structure and Performance of Cements**, v. 2, p. 57-113, 2002.

GLASSER, F.; TYRER, M.; QUILLIN, K. The chemistry of blended cements and backfills intended for use in radioactive waste disposal. **Environment Agency**, 1999.

GLASSER, F. P.; ZHANG, L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate–belite compositions. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1881-1886, 2001. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00649-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00649-4).

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **GNR 2.0 – GCCA in Numbers**. Reino Unido, 2023. Disponível em <<https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

GU, X.; TAN, H.; HE, X.; ZHANG, J.; LI, M.; SU, Y.; YANG, J. Nano C-S-H seeds prepared from ground granulated blast-furnace slag-carbide slag and its application in Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 329, 127204, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127204>.

HABERT, G. Assessing the environmental impact of conventional and 'green' cement production. **Eco-Efficient Construction and Building Materials**. Woodhead Publishing, 2014. p. 199-238.

HAMED, N.; EL-FEKY, M. S.; KOHAIL, M.; NASR, E. S. A. R. Effect of nano-clay de-agglomeration on mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 245-256, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.018>.

HE, W.; LIAO, G. Effects of nano-C-S-H seed crystal on early-age hydration process of Portland cement. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 30, n. 3, p. 365-372, 2021. doi: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1940969>.

HORGNIES, M.; FEI, L.; ARROYO, R.; CHEN, J. J.; GARTNER, E. M. The effects of seeding C3S pastes with afwillite. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 145-157, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.015>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Tracking Cement**. Paris, 2023. Disponível em <<https://www.iea.org/energy-system/industry/cement#tracking>>. Acesso em: 23 set. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Genebra, 2022. Disponível em <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>>. Acesso em: 27 set. 2023.

JALAL, M.; MANSOURI, E.; SHARIFIPOUR, M.; POULADKHAN, A. R. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. **Materials & Design**, v. 34, p. 389-400, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037>.

JANG, J. G.; LEE, H. K. Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 50-57, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.001>.

JOHN, E. **The Effect of Artificial Calcium Silicate Hydrate on Cement Hydration**. Tese de Doutorado – Technische Universität Berlin. Berlim, 2022.

JOHN, E.; EPPING, J. D.; STEPHAN, D. The influence of the chemical and physical properties of C-S-H seeds on their potential to accelerate cement hydration. **Construction and Building Materials**, v. 228, 116723, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116723>.

JOHN, E.; MATSCHEI, T.; STEPHAN, D. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. **Cement and Concrete Research**, v. 113, p. 74-85, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.003>.

JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>.

JUILLAND, P.; GALLUCCI, E.; FLATT, R.; SCRIVENER, K. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 6, p. 831-844, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.012>.

KANCHANASON, V.; PLANK, J. CSH-PCE Nanocomposites for enhancement of early strength of Portland cement. **Proceedings of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement**, Beijing, China, p. 13-16, 2015.

KANCHANASON, V.; PLANK, J. Effect of calcium silicate hydrate – polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite as accelerating admixture on early strength enhancement of slag and calcined clay blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 44-50, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.007>.

KANCHANASON, V.; PLANK, J. Effectiveness of a calcium silicate hydrate–Polycarboxylate ether (CSH–PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 20-27, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.053>.

KONG, D.; DU, X.; WEI, S.; ZHANG, H.; YANG, Y.; SHAH, S. P. Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 707-715, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>.

KONG, D.; HUANG, S.; CORR, D.; YANG, Y.; SHAH, S. P. Whether do nano-particles act as nucleation sites for C-S-H gel growth during cement hydration? **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 98-109, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.007>.

LAND, G.; STEPHAN, D. Controlling cement hydration with nanoparticles. **Cement & Concrete Composites**, v. 57, p. 64-67, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.003>.

LAND, G.; STEPHAN, D. The effect of synthesis conditions on the efficiency of C-S-H seeds to accelerate cement hydration. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 73-78, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.006>.

LAND, G.; STEPHAN, D. The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement. **J Mater Sci**, v. 47, p. 1011-1017, 2012. doi: 10.1007/s10853-011-5881-1.

LEE, B. Y.; KURTIS, K. E. Influence of TiO₂ nanoparticles on early C₃S hydration. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 93, n. 10, p. 3399-3405, 2010. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03868.x>.

LI, J.; ZHANG, W.; XU, K.; MONTEIRO, J. M. Fibrillar calcium silicate hydrate seeds from hydrated tricalcium silicate lower cement demand. **Cement and Concrete Research**, v. 137, p. 106195, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106195>.

LI, X.; BIZZOZERO, J.; HESSE, C. Impact of C-S-H seeding on hydration and strength of slag blended cement. **Cement and Concrete Research**, v. 161, p. 106935, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106935>.

LI, X.; OUZIA, A.; SCRIVENER, K. Laboratory synthesis of C₃S on the kilogram scale. **Cement and Concrete Research**, v. 108, p. 201-207, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.019>.

LISKA, M.; VANDEPERRE, L. J.; AL-TABBAA, A. Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement-based pressed masonry units. **Advances in Cement Research**, v. 20, n. 2, p. 53-64, 2008. doi: <https://doi.org/10.1680/adcr.2008.20.2.53>.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1244-1256, 2011. doi: [10.1016/j.cemconres.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001).

LUMLEY, J. S.; GOLLOP, R. S.; MOIR, G. K.; TAYLOR, H. F. W. Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 139-151, 1996. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00190-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00190-5).

MARQUES, A. I.; MORAIS, J.; MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P.; FERREIRA, J. G. Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117216, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216>.

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

MORALES-CANTERO, A.; CUESTA, A.; DE LA TORRE, A. G.; MAZANEC, O.; BORRALLERAS, P.; WELDERT, K. S.; GASTALDI, D.; CANONICO, F.; ARANDA, M. A. G. Portland and belite cement hydration acceleration by C-S-H seeds with variable w/c ratios. **Materials**, v. 15, p. 3553, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15103553>.

MORSY, M. S.; ALSAYED, S. H.; AQEL, M. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 145-149, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.046>.

NAQI, A.; JANG, J. G. Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review. **Sustainability**, v. 11, n. 2, p. 537, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su11020537>.

NASR, Mohammed Salah et al. Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101444, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101444>.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto, 5ª Edição. **Bookman Editora**, 2015.

NEWMAN, John; CHOO, Ban Seng (Ed.). Advanced concrete technology 2: concrete properties. **Elsevier**, 2003.

NICOLEAU, L. Accelerated growth of calcium silicate hydrates: Experiments and simulations. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 1339-1348, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.012>.

NICOLEAU, L.; NONAT, A.; PERREY, D. The di-and tricalcium silicate dissolutions. **Cement and Concrete Research**, v. 47, p. 14-30, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.017>.

OLTULU, M.; SAHIN, R. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. **Materials Science and Engineering**, v. 528, n. 22-23, p. 7012-7019, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.054>.

ONAZI, A. M.; HUSEIEN, G. F.; LIM, N. H. A. S.; AMRAN, M.; SAMADI, M. Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 306, 124850, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124850>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **COP26: Together for our planet**. Disponível em <<https://www.un.org/en/climatechange/cop26>>. Acesso em: 24 mai. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Glasgow Climate Pact**. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021, p. 2-10. Framework Convention on Climate Change. Glasgow, 2022. Disponível em <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Paris Agreement**. Paris, 2015. Disponível em <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

OUYANG, X.; KOLEVA, D. A.; YE, G.; BREUGEL, K. Insights into the mechanisms of nucleation and growth of C–S–H on fillers. **Materials and Structures**, v. 50, 213, 2017. doi: 10.1617/s11527-017-1082-y.

PARK, S. M.; JANG, J. G.; LEE, H. K. Unlocking the role of MgO in the carbonation of alkali-activated slag cement. **Inorganic Chemistry Frontiers**, v. 5, n. 7, p. 1661-1670, 2018. doi: <https://doi.org/10.1039/C7QI00754J>.

PEDROSA, H. C.; REALES, O. M.; REIS, V. D.; PAIVA, M. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Hydration of Portland cement accelerated by C-S-H seeds at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 129, 105978, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105978>.

PIZON, J.; MIERA, P.; ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, B. Influence of hardening accelerating admixtures on properties of cement with ground granulated blast furnace slag. **Procedia engineering**, v. 161, p. 1070-1075, 2016. doi: [10.1016/j.proeng.2016.08.850](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.850).

PIZON, J.; PIEKARCZYK, B. L.; MIERA, P. The influence of the acceleration admixture type and composition of cement on hydration heat and setting time of slag blended cement. **Materials**, v. 15, 2797, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15082797>.

POTGIETER, J. H.; POTGIETER, S. S.; MCCRINDLE, R. I. A comparison of the performance of various synthetic gypsums in plant trials during the manufacturing of OPC clinker. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2245-2250, 2004.

PROVIS, John L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11-25, 2014. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>.

RASHAD, A. M. An overview on rheology, mechanical properties and durability of highvolume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 89-117, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.150>.

RICHARDSON, I. G. The nature of C-S-H in hardened cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1131-1147, 1999.

SALAS, D. A.; RAMIREZ, A. D.; RODRÍGUEZ, C. R.; PETROCHE, D. M.; BOERO, A. J.; DUQUE-RIVERA, J. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114-122, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>

SAMUI, P.; KIM, D.; IYER, N. R.; CHAUDHARY, S. **New Materials in Civil Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Precificação de Carbono**. Disponível em <<http://snic.org.br/sustentabilidade-mudanca-climatica.php>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SIKORA, P.; AUGUSTYNIAK, A.; CENDROWSKI, K.; NAWROTEK, P.; MIJOWSKA, E. Antimicrobial activity of Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄, and ZnO nanoparticles in scope of

their further application in cement-based building materials. **Nanomaterials**, v. 8, n. 4, p. 212, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/nano8040212>.

SNELLINGS, R. Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 50-55, 2016. doi: [10.21809/rilemtechlett.2016.12](https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.12).

SNELLINGS, R. Solution-controlled dissolution of supplementary cementitious material glasses at pH 13: the effect of solution composition on glass dissolution rates. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 96, n. 8, p. 2467-2475, 2013. doi: <https://doi.org/10.1111/jace.12480>.

SOBOLEV, K. Nanotechnology and nanoengineering of construction materials. **Nanotechnology in Construction**, p. 3-13, 2015. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-17088-6_1.

STEMMERMANN, P.; SCHWEIKE, U.; GARBEV, K.; BEUCHLE, G.; MÖLLER, H. Celitement – A sustainable prospect for the cement industry. **Cement International**, v. 8, n. 5, p. 52-66, 2010.

SUN, J.; SHI, H.; QIAN, B.; XU, Z.; LI, W.; SHEN, X. Effects of synthetic CSH/PCE nanocomposites on early cement hydration. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 282-292, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.075>.

SZOSTAK, B.; GOLEWSKI, G. L. Improvement of strength parameters of cement matrix with the addition of siliceous fly ash by using nanometric C-S-H seeds. **Energies**, v. 13, 6734, 2020. doi: [10.3390/en13246734](https://doi.org/10.3390/en13246734).

SZOSTAK, B.; GOLEWSKI, G. L. Rheology of cement pastes with siliceous fly ash and the CSH nano-admixture. **Materials**, v. 14, 3640, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14133640>.

TAYLOR, Harry FW et al. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford, 1997.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M.; CHEN, J. J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 113, p. 4327-4334, 2009. doi: <https://doi.org/10.1021/jp809811w>.

UN ENVIRONMENT; SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2021 Global Status Report for Buildings and Construction**: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi, 2021. Disponível em <www.globalabc.org>. Acesso em: 26 mai. 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Five Key Takeaways from COP27**. Disponível em

<<https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/five-key-takeaways-from-cop27>>. Bonn, 2023. Acesso em: 24 set. 2023.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

WANG, B.; YAO, W.; STEPHAN, D. Preparation of calcium silicate hydrate seeds by means of mechanochemical method and its effect on the early hydration of cement. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 11 (4), p. 1-7, 2019. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814019840586>.

WANG, F.; KONG, X.; JIANG, L.; WANG, D. The acceleration mechanism of nano-C-S-H particles on OPC hydration. **Construction and Building Materials**, v. 249, 118734, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118734>.

WANG, Y.; LÜ, L.; HE, Y.; WANG, F.; HU, S. Effect of Calcium Silicate Hydrate Seeds on Hydration and Mechanical Properties of Cement. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 36, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11595-021-2382-1>.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GNR PROJECT**. Genebra: 1990-2016. Publicado em 2016. Disponível em <<https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Cement-Industry-Energy-and-CO2-Performance>>. Acesso em: 19 mai. 2022.

XU, C.; LI, H.; YANG, X. Effect and characterization of the nucleation C-S-H seed on the reactivity of granulated blast furnace slag powder. **Construction and Building Materials**, v. 238, 117726, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117726>.

XU, Z.; ZHOU, Z.; DU, P.; CHENG, X. Effects of nano-limestone on hydration properties of tricalcium silicate. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, p. 75-83, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6123-9>.

YUN, C. M.; RAHMAN, M. R.; PHING, C. Y. W.; CHIE, A. W. M.; BAKRI, M. K. B. The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar. **Construction and Building Materials**, v. 260, 120622, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120622>.

ZHANG, P.; WAN, J.; WANG, K.; LI, Q. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 648-658, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>.

ZHOU, F.; PAN, G.; MI, R.; ZHAN, M. Improving the properties of concrete using in situ-grown C-S-H. **Construction and Building Materials**, v. 276, 122214, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122214>.

ZHOU, Z.; SOFI, M.; LIU, J.; LI, S.; ZHONG, A.; MENDIS, P. Nano-CSH modified high volume fly ash concrete: Early-age properties and environmental impact analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, 124924, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124924>.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA

TABELA RESUMO – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	2	6,03	3,02	0,0365
E1	2	4,78	2,39	0,0512
E1,5	2	4,70	2,35	0,0450
E2	2	4,19	2,10	0,0013
E3	2	3,34	1,67	0,0050

TABELA ANOVA – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1,9213	4	0,4803	17,2907	0,0039	5,1922
Dentro dos grupos	0,1389	5	0,0278			
Total	2,0602	9				

TABELA RESUMO – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	2	7,90	3,95	0,0098
Z1	2	6,46	3,23	0,0000
Z1,5	2	5,87	2,94	0,0084
Z2	2	4,50	2,25	0,0050
Z3	2	3,93	1,97	0,0084

TABELA ANOVA – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	5,0071	4	1,2518	197,4424	1,09E-05	5,1922
Dentro dos grupos	0,0317	5	0,0063			
Total	5,0388	9				

APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE FIM DE PEGA

TABELA RESUMO – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	2	14,28	7,14	0,0162
E1	2	12,20	6,10	0,0968
E1,5	2	10,79	5,40	0,1013
E2	2	9,93	4,97	0,1105
E3	2	10,08	5,04	0,5202

TABELA ANOVA – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	6,5971	4	1,6493	9,7601	0,0140	5,1922
Dentro dos grupos	0,8449	5	0,1690			
Total	7,4420	9				

TABELA RESUMO – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	2	13,06	6,53	0,0450
Z1	2	11,97	5,99	0,0145
Z1,5	2	11,53	5,77	0,0084
Z2	2	9,33	4,67	0,0025
Z3	2	10,76	5,38	0,0450

TABELA ANOVA – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	3,8837	4	0,9709	42,0860	0,0005	5,1922
Dentro dos grupos	0,1154	5	0,0231			
Total	3,9991	9				

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS VISCOSIDADES

TABELA RESUMO – VISCOSIDADES (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	3	4680	1560	1300
E1	3	6060	2020	700
E1,5	3	9600	3200	700
E2	2	10300	5150	200
E3	2	9400	4700	1800

TABELA ANOVA – VISCOSIDADES (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	24163800	4	6040950	6530,7568	4,39E-14	3,8379
Dentro dos grupos	7400	8	925			
Total	24171200	12				

TABELA RESUMO – VISCOSIDADES (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	3	5700	1900	700
Z1	3	9510	3170	100
Z1,5	2	8400	4200	800
Z2	3	14850	4950	300
Z3	2	7200	3600	200

TABELA ANOVA – VISCOSIDADES (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	15312231	4	3828058	9570,1442	9,53E-15	3,8379
Dentro dos grupos	3200	8	400			
Total	15315431	12				

APÊNDICE D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	10	290,62	29,06	0,8331
E1	12	425,29	35,44	8,0421
E1,5	10	359,66	35,97	1,1362
E2	10	374,39	37,44	2,5383
E3	10	133,34	13,33	0,7314

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	4040,4646	4	1010,1161	350,0763	2,49E-34	2,5695
Dentro dos grupos	135,6146	47	2,8854			
Total	4176,0792	51				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	12	794,05	66,17	3,8603
E1	10	667,22	66,72	19,2265
E1,5	10	713,74	71,37	2,6010
E2	8	555,75	69,47	5,3130
E3	8	577,59	72,20	6,4424

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	287,6381	4	71,9095	9,6268	1,19E-05	2,5888
Dentro dos grupos	321,1983	43	7,4697			
Total	608,8363	47				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 91 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	10	660,64	66,06	14,3896
E1	12	818,67	68,22	8,8613
E1,5	8	590,32	73,79	15,0451
E2	12	893,20	74,43	47,7947
E3	8	592,48	74,06	12,9801

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 91 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	614,2860	4	153,5715	7,2829	0,0001	2,5787
Dentro dos grupos	948,8977	45	21,0866			
Total	1563,1838	49				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	12	358,56	29,88	3,4128
Z1	12	619,53	51,63	2,9077
Z1,5	10	527,06	52,71	1,5858
Z2	8	429,47	53,68	1,3006
Z3	8	255,67	31,96	2,1553

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	5756,8303	4	1439,2076	599,7346	2,13E-38	2,5787
Dentro dos grupos	107,9883	45	2,3997			
Total	5864,8186	49				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	10	598,19	59,82	1,3006
Z1	10	604,07	60,41	9,6770
Z1,5	10	607,33	60,73	1,5968
Z2	8	489,06	61,13	11,6561
Z3	10	638,63	63,86	9,8230

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	98,4910	4	24,6227	3,7390	0,0107	2,5888
Dentro dos grupos	283,1695	43	6,5853			
Total	381,6605	47				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 91 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	12	746,55	62,21	2,4466
Z1	10	622,96	62,30	6,6531
Z1,5	10	638,66	63,87	6,9763
Z2	10	641,11	64,11	3,2135
Z3	8	500,94	62,62	10,6127

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 91 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	33,4103	4	8,3526	1,4869	0,2221	2,5787
Dentro dos grupos	252,7879	45	5,6175			
Total	286,1982	49				

APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	5	24,06	4,81	0,2047
E1	6	33,35	5,56	0,2409
E1,5	5	34,90	6,98	0,6632
E2	5	38,16	7,63	0,2400
E3	5	23,61	4,72	0,4405

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	34,3709	4	8,5927	24,3903	1,23E-07	2,8401
Dentro dos grupos	7,3983	21	0,3523			
Total	41,7692	25				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	6	50,34	8,39	0,4263
E1	5	51,88	10,38	1,0010
E1,5	5	53,84	10,77	1,0980
E2	4	36,06	9,02	1,2846
E3	4	28,08	7,02	0,5779

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	42,2761	4	10,5690	12,4615	3,84E-05	2,8951
Dentro dos grupos	16,1145	19	0,8481			
Total	58,3906	23				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 91 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFE	5	43,95	8,79	0,4272
E1	6	54,95	9,16	1,0105
E1,5	4	40,30	10,08	2,2996
E2	6	59,16	9,86	1,1860
E3	4	36,05	9,01	0,1381

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 91 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	5,8897	4	1,4724	1,4721	0,2480	2,8661
Dentro dos grupos	20,0041	20	1,0002			
Total	25,8938	24				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	6	46,03	7,67	0,6823
Z1	6	50,79	8,47	0,4742
Z1,5	5	38,94	7,79	0,9257
Z2	4	34,07	8,52	0,5056
Z3	4	29,66	7,42	0,2142

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	4,5986	4	1,1497	1,9746	0,1374	2,8661
Dentro dos grupos	11,6445	20	0,5822			
Total	16,2431	24				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	5	43,78	8,76	0,7969
Z1	5	50,59	10,12	0,1569
Z1,5	5	54,52	10,90	0,3465
Z2	4	36,97	9,24	0,5574
Z3	5	42,95	8,59	1,6158

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	18,9118	4	4,7279	6,7359	0,0015	2,8951
Dentro dos grupos	13,3362	19	0,7019			
Total	32,2480	23				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 91 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REFZ	6	51,90	8,65	0,3594
Z1	5	50,99	10,20	1,5016
Z1,5	5	56,05	11,21	0,6157
Z2	5	50,53	10,11	1,8076
Z3	4	35,74	8,94	1,0488

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 91 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	22,1268	4	5,5317	5,3594	0,0042	2,8661
Dentro dos grupos	20,6431	20	1,0322			
Total	42,7699	24				

APÊNDICE F – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA DAS PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

TABELA RESUMO – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	2	4,19	2,10	0,0013
E2A	2	4,20	2,10	0,0050

TABELA ANOVA – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	2,5E-05	1	2,5E-05	0,0080	0,9369	18,5128
Dentro dos grupos	0,0063	2	0,0031			
Total	0,0063	3				

TABELA RESUMO – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	2	4,50	2,25	0,0050
Z2A	2	4,59	2,30	0,0012

TABELA ANOVA – TEMPOS DE INÍCIO DE PEGA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0020	1	0,0020	0,6480	0,5053	18,5128
Dentro dos grupos	0,0062	2	0,0031			
Total	0,0083	3				

TABELA RESUMO – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	2	9,93	4,97	0,1105
E2A	2	9,86	4,93	0,0050

TABELA ANOVA – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0012	1	0,0012	0,0212	0,8975	18,5128
Dentro dos grupos	0,1155	2	0,0577			
Total	0,1167	3				

TABELA RESUMO – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	2	9,33	4,67	0,0025
Z2A	2	9,42	4,71	0,0072

TABELA ANOVA – TEMPOS DE FIM DE PEGA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0020	1	0,0020	0,4197	0,5835	18,5128
Dentro dos grupos	0,0096	2	0,0048			
Total	0,0117	3				

APÊNDICE G – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DAS PASTAS COM ADITIVOS COMPLEMENTARES

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	10	374,39	37,44	2,5383
E2A	6	223,12	37,19	3,0751

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,2388	1	0,2388	0,0875	0,7718	4,6001
Dentro dos grupos	38,2204	14	2,7300			
Total	38,4592	15				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	8	555,75	69,47	5,3130
E2A	6	468,67	78,11	163,2830

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	256,1143	1	256,1143	3,6005	0,0821	4,7472
Dentro dos grupos	853,6058	12	71,1338			
Total	1109,7201	13				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	8	429,47	53,68	1,3006
Z2A	6	325,88	54,31	7,1925

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 1 DIA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1,3590	1	1,3590	0,3619	0,5587	4,7472
Dentro dos grupos	45,0665	12	3,7555			
Total	46,4255	13				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	8	489,06	61,13	11,6561
Z2A	6	374,17	62,36	6,2021

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO 28 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	5,1801	1	5,1801	0,5520	0,4718	4,7472
Dentro dos grupos	112,6028	12	9,3836			
Total	117,7829	13				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	5	38,16	7,63	0,2400
E2A	3	23,13	7,71	0,2923

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0114	1	0,0114	0,0443	0,8402	5,9874
Dentro dos grupos	1,5447	6	0,2574			
Total	1,5561	7				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP III)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
E2	4	36,06	9,02	1,2846
E2A	3	36,06	12,02	1,2484

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP III)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	15,4800	1	15,4800	12,1881	0,0174	6,6079
Dentro dos grupos	6,3505	5	1,2701			
Total	21,8305	6				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	4	34,07	8,52	0,5056
Z2A	3	24,51	8,17	0,7987

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 1 DIA (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,2070	1	0,2070	0,3324	0,5893	6,6079
Dentro dos grupos	3,1143	5	0,6229			
Total	3,3213	6				

TABELA RESUMO – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP IV)

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Z2	4	36,97	9,24	0,5574
Z2A	3	36,91	12,30	0,0914

TABELA ANOVA – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO 28 DIAS (CP IV)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	16,0606	1	16,0606	43,2915	0,0012	6,6079
Dentro dos grupos	1,8549	5	0,3710			
Total	17,9156	6				