

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THIAGO RANILSON CAIXETA SILVA

**Efeito de aditivos superplastificantes em argamassas
de revestimento com fíler calcário e incorporadores
de ar**

Uberlândia, 2025

THIAGO RANILSON CAIXETA SILVA

Efeito de aditivos superplastificantes em argamassas de revestimento com fíler calcário e incorporadores de ar

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Uberlândia, 2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586
2025

Silva, Thiago Ranilson Caixeta, 1999-
Efeito de aditivos superplastificantes em argamassas de
revestimento com fíler calcário e incorporadores de ar [recurso
eletrônico] / Thiago Ranilson Caixeta Silva. - 2025.

Orientadora: Eliane Betânia Carvalho Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.675>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. I. Costa, Eliane Betânia Carvalho ,1982-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 326, PPGEC				
Data:	18 de novembro de 2025	Hora de início:	14:10	Hora de encerramento:	16:35
Matrícula do Discente:	12322ECV010				
Nome do Discente:	Thiago Ranilson Caixeta Silva				
Título do Trabalho:	Efeito de aditivos superplastificantes em argamassas de revestimento com fíler calcário e incorporadores de ar				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Inovação em Materiais de Construção				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Waleska da Silva Barbosa - UP, Maria Cláudia de Freitas Salomão - UFU e Eliane Betânia Carvalho Costa, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Eliane Betânia Carvalho Costa, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/11/2025, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Claudia de Freitas Salomão, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/11/2025, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Waleska da Silva Barbosa, Usuário Externo**, em 19/11/2025, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6874335** e o código CRC **D6D7F82D**.

Referência: Processo nº 23117.083062/2025-01

SEI nº 6874335

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me iluminado durante esse período, e ter me ajudado a concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais, Rosimeire Caixeta e Cláudio Ranilson, por sempre me apoiarem em minhas escolhas e decisões e por terem acreditado em mim até o final, é uma honra e gratidão imensa ser filho de pessoas incríveis. Agradecimento também aos meus avós e irmãos que me apoiaram e estiveram comigo nesse período.

À minha amiga e namorada, Mariany Ribeiro, pelo apoio incondicional e por sempre acreditar em mim, pelos conselhos e por ter sido meu conforto diário durante todo esse tempo.

À minha orientadora, Eliane Betânia, por ter ajudado na minha orientação, por ter compartilhado o seu conhecimento agregando na minha inteligência, por ter tido paciência para me ensinar e por ter me dado essa oportunidade e acreditado esse projeto a mim.

À Marina Prata, pelo auxílio e parceria durante todos os ensaios de caracterização dos materiais, moldagens de corpos de prova e aplicações das argamassas nos painéis de blocos cerâmicos.

Às professoras Maria Cláudia de Freitas Salomão e Waleska da Silva Barbosa, membros da banca de qualificação e defesa, obrigada por toda contribuição para a realização desta pesquisa.

Aos técnicos dos laboratórios de materiais e estruturas da FECIV/UFU, Wanderly e Cristiane, pelo auxílio nos procedimentos dos ensaios e paciência e competência para ensinar, que foi de suma importância para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela realização dos ensaios de calorimetria isotérmica, reometria rotacional e caracterização dos aditivos superplastificantes ensaios essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

E aos laboratórios da Universidade Federal de Uberlândia, sendo eles, o laboratório multiusuário em energias renováveis pelos ensaios de FRX e análise dinâmica de imagem da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI). Agradeço ainda, à técnica Carolina Martins, do Laboratório de Química do Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal – ICENP/UFU pela realização dos ensaios de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de mestrado, o que foi fundamental para a realização desta pesquisa. O auxílio recebido possibilitou a minha dedicação às atividades

acadêmicas e científicas, contribuindo de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho e para a minha formação.

RESUMO

O uso de superplastificante pode influenciar as propriedades de argamassas no estado fresco, endurecido e a resistência de aderência à tração quando aplicada em um substrato. Este estudo tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes aditivos superplastificantes na aplicabilidade de argamassas de revestimento. Foram avaliadas quatro composições constituídas por: (i) cimento (C10), (ii) substituição de 30% de cimento por filer calcário (C40), (iii) aditivo incorporador de ar (IA) e (iv) aditivo plastificante e estabilizador (PE), sem e com o uso de três superplastificantes: um a base de lignossulfonato (A) e dois a base de éter policarboxilatos (B e C). O estudo foi desenvolvido em três etapas: (1) em pasta para avaliar a influência dos aditivos superplastificantes na cinética de hidratação por meio de ensaios de calorimetria isotérmica; (2) em argamassas para verificar o impacto dos aditivos nas propriedades no estado fresco e endurecido; e (3) da aplicabilidade das argamassas a fim de avaliar como os aditivos interferem nas etapas de execução do revestimento e nas propriedades do conjunto argamassa-substrato. Na primeira etapa, foram avaliadas dezesseis pastas, com relação água/finos igual a 0,50. Para o estudo em argamassa, foi adotado como referência o traço 1: 4 (cimento: areia) em volume. As argamassas foram avaliadas por ensaios no estado fresco: densidade de massa, teor de ar incorporado e capacidade de retenção de água. Aos 28 dias, foram avaliadas quanto a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água por capilaridade. Na terceira etapa, foram selecionadas argamassas para aplicação em painéis de blocos cerâmicos. Estas foram aplicadas por oficial pedreiro e submetidas a ensaios no estado fresco, endurecido e resistência de aderência à tração. Os resultados indicaram que o aditivo superplastificante influencia na cinética de hidratação das pastas, promovendo aumento no período de indução e, conseqüentemente, retardo na hidratação das pastas, sendo esse efeito mais pronunciado no lignossulfonato. No estudo em argamassa, o aditivo A apresentou resistência mecânica inferior aos outros aditivos superplastificantes. Por outro lado, os aditivos B e C promoveram um acréscimo na resistência à tração na flexão. O uso dos superplastificantes afetaram a cinética de hidratação de todas as pastas do estudo, retardando o início de pega. No estudo em argamassa o uso dos superplastificantes otimizou resultados no estado fresco e endurecido, além da resistência de aderência à tração.

Palavras-chave: superplastificante; dispersante; aderência; argamassa; revestimento;

ABSTRACT

The use of superplasticizers can influence the properties of mortars in both the fresh and hardened states, as well as the tensile bond strength when applied to a substrate. This study aims to evaluate the effect of different superplasticizing admixtures on the applicability of rendering mortars. Four base compositions were evaluated: (i) cement (C10), (ii) 30% cement replacement by limestone filler (C40), (iii) an air-entraining admixture (IA), and (iv) a plasticizing and stabilizing admixture (PE); each was tested both without and with the addition of one of three superplasticizers: a lignosulfonate-based (A) and two polycarboxylate ether-based types (B and C). The investigation was conducted in three stages: (1) on pastes to evaluate the influence of superplasticizers on hydration kinetics via isothermal calorimetry; (2) on mortars to determine their impact on fresh and hardened properties; and (3) on mortar applicability to evaluate how the admixtures affect rendering application procedures and the properties of the mortar–substrate system. In the first phase, sixteen pastes mixtures with a water–binder ratio of 0.50 were tested. For the mortar phase, a 1:4 (cement: sand) volumetric mix proportion was used as the reference. Fresh mortar properties evaluated included bulk density, entrained air content, and water retention capacity. At 28 days, hardened properties were assessed, including flexural tensile strength, compressive strength, dynamic modulus of elasticity, and capillary water absorption. In the third phase, selected mortars were applied by a professional workmanship onto ceramic brick panels and subsequently tested for fresh and hardened state properties, as well as tensile bond strength tests. The results indicated that the superplasticizer admixtures influenced the hydration kinetics of the pastes, increasing the dormant period and thereby retarding hydration; this retarding effect was most pronounced for the lignosulfonate-based admixture (A). In the mortar study, admixture A yielded lower mechanical strength compared to the polycarboxylate-based admixtures (B and C). Conversely, superplasticizers B and C increased flexural tensile strength. The use of superplasticizers delayed the setting time in all pastes mixtures. In mortars, the use of superplasticizers improved performance in both fresh and hardened states and increased the tensile bond strength.

Keywords: superplasticizer; dispersing agent; adhesive strength; mortars; mortars

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curvas de calorimetria de pastas de cimento Portland com LS e diferentes áreas superficiais específicas: (a) 890 m ² /kg e (b) 1330 m ² /kg.	21
Figura 2: Efeito do comprimento da cadeia lateral dos PCs na cinética de hidratação das pastas de cimento.	23
Figura 3: Representação dos mecanismos de ação dos aditivos superplastificantes.	25
Figura 4: Representação esquemática do incorporador de ar.	27
Figura 5: Fluxograma das etapas a serem desenvolvidas.	34
Figura 6: Curva granulométrica do cimento e filer calcário.	36
Figura 7: Curva de termogravimetria obtida para o cimento Portland (CP-V)	37
Figura 8: Curva de termogravimetria obtida para o filer calcário	37
Figura 9: Curva granulométrica areia natural.	38
Figura 10: Espectros FT-IR dos aditivos químicos.	41
Figura 11: Curva média de absorção de água por capilaridade dos blocos cerâmicos.	42
Figura 12: Tempo de início e fim de pega do CPV.	45
Figura 13: Módulo de elasticidade dinâmico (a); resistência à tração na flexão (b) e compressão (c).	48
Figura 14: Pannel de bloco cerâmico.	49
Figura 15: Argamassas aplicadas nos painéis.	50
Figura 16: Colagem das pastilhas metálicas (a); ensaio de resistência potencial de aderência à tração do revestimento (b); corpos de prova extraídos (c).	51
Figura 17: (a) Curvas de cinética de hidratação em função do tempo; (b) liberação de calor acumulado em função do tempo.	53
Figura 18: Curvas de fluxo de calor (a) e (b) e de calor acumulado (c) e (d) em função do tempo para as pastas C10 e C40.	55
Figura 19: Curvas de fluxo de calor (a) e (b) e de calor acumulado (c) e (d) em função do tempo para as pastas IA e PE.	57
Figura 20: Retenção de água das argamassas.	62
Figura 21: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.	62
Figura 22: Resistência à compressão (a) e (c) e à tração na flexão (b) e (d) das argamassas C10 e C40.	67
Figura 23: Resistência à compressão (a) e (c) e à tração na flexão (b) e (d) das argamassas IA e PE.	68

Figura 24: Parâmetros obtidos das argamassas de laboratório e aplicadas em painéis.	71
Figura 25: Absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas aplicadas em painéis.	72
Figura 26: Módulo de elasticidade das argamassas.....	74
Figura 27: Resultados médios de resistência de aderência à tração e formas de ruptura das argamassas aplicadas (a) e (c) (C40); (b) e (d) IA e PE.	74
Figura 28: Relação entre a resistência de aderência à tração (Rad) e o teor de ar incorporado das argamassas aplicadas em painéis.	76
Figura 29: Aspectos da superfície de ruptura do revestimento após ensaio de aderência à tração (a) C40-B; (b) C40-C.....	77
Figura 30: Aspectos da superfície de ruptura do revestimento C40-A após ensaio de aderência à tração.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos físicos dos superplastificantes.....	28
Tabela 2: Requisitos físicos do incorporador de ar.	29
Tabela 3: Propriedades físicas do cimento e fíler calcário.	35
Tabela 4: Composição química do cimento e do fíler calcário	36
Tabela 5 - Composição química dos aditivos químicos.	40
Tabela 6: Teor de saturação de aditivo superplastificante.....	43
Tabela 7: Composição das argamassas estudadas.	46
Tabela 8: Resultados de índice de consistência, teor de água em função da massa total de sólidos, densidade de massa e o teor de ar incorporado.	60
Tabela 9: Coeficiente de capilaridade (C) das argamassas aos 28 dias.....	63
Tabela 10: Propriedades mecânicas das argamassas aos 28 dias.	65
Tabela 11: Análise de variância da influência dos aditivos superplastificantes nas propriedades mecânicas das argamassas estudadas.	66
Tabela 12: Tempo de mistura para aplicação e sarrafeamento/desempeno dos revestimentos.	70
Tabela 13: Coeficiente de capilaridade (C) das argamassas aplicadas em painéis.	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Requisitos classificatórios e informativos de argamassas para revestimento segundo a NBR 13281-1 (2023).	18
Quadro 2: Classificação das argamassas.	18
Quadro 3: Tipos de PCs e suas características.	22
Quadro 4: Caracterização dos aditivos químicos segundo NBR 11768-3 (ABNT, 2019).....	39
Quadro 5: Formulação das pastas utilizadas no ensaio de calorimetria isotérmica.....	44
Quadro 6: Ensaios realizados para avaliação das argamassas no estado endurecido.....	48
Quadro 7: Ensaios das argamassas aplicadas nos painéis.	51
Quadro 8: Parâmetros calculados do ensaio de calorimetria de indução isotérmica das pastas.	56
Quadro 9: Parâmetros calculados do ensaio de calorimetria de indução isotérmica das pastas.	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Estrutura do Trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Argamassas de revestimento.....	16
2.2 Aditivos superplastificantes	19
2.3 Aditivo incorporador de ar	25
2.4 Requisitos normativos para aditivo superplastificante e incorporador de ar.....	27
2.5 Dosagem de aditivos	29
2.6 Uso combinado de aditivos superplastificantes e incorporador de ar	30
2.7 Fíler calcário.....	31
2.8 Aditivos químicos e fíler calcário na matriz cimentícia de argamassas de revestimento	32
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	34
3.1 Materiais.....	34
3.1.1 Cimento e fíler calcário	35
3.1.2 Areia natural	38
3.1.3 Caracterização dos aditivos químicos.....	38
3.1.4 Bloco cerâmico	42
3.2 Definição do teor de aditivo superplastificante.....	43
3.3 Estudo em pasta	43
3.4 Estudo em argamassa	45
3.4.1 Ensaio no estado fresco	46
3.4.2 Ensaio no estado endurecido	47
3.5 Estudo da aplicabilidade das argamassas em painéis de blocos cerâmicos.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1 Estudo em pasta	53
4.1.1 Efeito dos superplastificantes nas matrizes C10 e C40	55
4.1.2 Efeito sinérgico dos superplastificantes e incorporadores de ar	57
4.2 Estudo das argamassas - laboratório	59
4.2.1 Propriedades no estado fresco	59
4.2.2 Propriedades no estado endurecido	62

4.2.2.1	<i>Argamassas C10 e C40</i>	66
4.2.2.2	<i>Argamassas IA e PE</i>	68
4.3	Estudo das argamassas aplicadas em painéis	70
4.3.1	Estado fresco	71
4.3.2	Estado endurecido	72
4.3.2.1	<i>Módulo de elasticidade</i>	73
4.3.2.2	<i>Resistência de aderência à tração</i>	74
5	CONCLUSÕES	79
5.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	80

1 INTRODUÇÃO

As argamassas desempenham um papel fundamental na construção civil, sendo utilizadas principalmente para unir elementos, como blocos cerâmicos, e para compor os sistemas de revestimento, que são essenciais na proteção e acabamento das edificações (PULIDO-ARCAS; FLORES-ALÉS; PÉREZ-FARGALLO, 2022).

O revestimento argamassado impacta em diversas características na edificação, como aspectos de habitabilidade, isolamento térmico e acústico, estética, segurança, conforto e impermeabilidade (COELHO; SILVA, 2024). Além disso, atuam como proteção de paredes contra agentes de degradação e podem colaborar para a proteção passiva contra incêndios (FLORES-COLEN *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2024).

O pouco controle da aplicabilidade desse material para revestimento e a falta de conhecimento técnico pode ocasionar manifestações patológicas e o baixo desempenho da argamassa como elemento de revestimento. Com isso, análises de fatores como permeabilidade, porosidade, retenção de água, aderência da argamassa ao substrato, qualidade da aplicação e dos materiais, são essenciais para garantir um revestimento argamassado com durabilidade adequada.

Segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) argamassas são materiais compostos por um ou mais ligantes inorgânicos, agregados finos e água, pode ser incluído na sua composição, fibras, adições e/ou aditivos, com propriedades adequadas para a sua utilização. A composição varia entre argamassa convencional composta por cimento areia e água, e argamassas mistas, incluindo a cal na sua composição, geralmente utilizadas para assentamento e revestimento (YAZIGI, 2009).

O cimento é o principal ligante utilizado para produção de argamassas (TIAN *et al.*, 2019). Segundo dados do Sindicato Nacional Da Indústria do Cimento, a produção nacional chegou a mais de 66,5 milhões de toneladas de cimento em 2023. Estima-se que 40% da produção total de cimento no Brasil é utilizado para confecção de argamassas, 40% para produção de concreto e 20% para outros fins (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

Pesquisas têm sugerido a reformulação na composição das argamassas, substituindo parte do cimento por filer calcário (COSTA, E. B.C.; CARDOSO; JOHN, 2017; MARCHETTI *et al.*, 2022; NEHDI; MINDESS; AITCIN, 1996a). A preocupação com a redução do uso de cimento Portland decorre de seu alto impacto ambiental, relacionado tanto às emissões de CO₂ durante sua produção quanto à sua elevada energia incorporada. Energia incorporada é o consumo de energia desde o processo de extração das matérias-primas até a sua utilização e

descarte (SAMAD; SHAH, 2017). Um indicador importante para análise de impacto ambiental é a quantidade total de CO_2 incorporado por unidade de massa ou volume (kg de CO_2 /tonelada ou kg de CO_2/m^3) produzidos na extração da matéria-prima, transporte e produto final. Estima-se para o filer calcário 71 kg de CO_2 /tonelada, enquanto o cimento Portland comum (CP-I) apresenta cerca de 910 kg/t, valor treze vezes superior ao do filer calcário (BHANDARI *et al.*, 2023).

Além das adições minerais, aditivos químicos como incorporadores de ar, retentores de água, estabilizadores de hidratação, plastificantes e superplastificantes desempenham um papel fundamental na melhoria das propriedades das argamassas de revestimento (CASALI *et al.*, 2020; SOUZA; CARVALHAIS; DOS SANTOS, 2020). Aditivos incorporadores de ar e estabilizadores de hidratação são utilizados em argamassas estabilizadas, com objetivo de inibir a hidratação e manter a trabalhabilidade por 36 a 72 horas (CASALI *et al.*, 2020). Retentores de água, em sua maioria éteres de celulose, têm por finalidade evitar a perda de água da argamassa de revestimento para o substrato poroso (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Aditivos plastificantes e superplastificantes são aditivos químicos que se destacam por reduzir a relação água/cimento (a/c) sem a necessidade de aumentar o consumo de cimento, alcançando maior fluidez e trabalhabilidade sem comprometer a resistência final do material (LI *et al.*, 2021; SATHYAN; ANAND, 2019). Embora comumente aplicados ao concreto, possibilitando a redução da a/c e, conseqüentemente, maior resistência e durabilidade, esses aditivos se demonstram eficazes na melhoria da fluidez e trabalhabilidade de argamassas de revestimento (GE *et al.*, 2024; LEI *et al.*, 2022).

Os superplastificantes, também conhecidos como aditivos dispersantes/redutores de água, reduzem a tensão superficial da água, diminuem a resistência ao atrito e promovem a dispersão das partículas de cimento na mistura (LEI *et al.*, 2022). Cada categoria de aditivo possui uma base química específica e pode atuar através de dois mecanismos principais: repulsão eletrostática e impedimento estérico (BHANDARI *et al.*, 2023).

O uso desses aditivos intensificou-se nos últimos 40 anos, principalmente pelo surgimento dos superplastificantes à base de éter policarboxilato (KAPELUSZNA; CHRABĄSZCZ, 2023; SCHIEFER; PLANK, 2023). Sua utilização influencia diversas propriedades, como: reologia, durabilidade, propriedades mecânicas e porosidade de materiais cimentícios. O uso mais comum desses aditivos é para melhorar a reologia da mistura no estado fresco, proporcionando uma trabalhabilidade adequada para aplicações específicas, enquanto reduz a quantidade de água de amassamento (KAPELUSZNA; CHRABĄSZCZ, 2023).

Superplastificantes podem influenciar na eficiência de aditivos incorporadores de ar (IA)

quando combinados. A interação com o superplastificante pode influenciar na formação de bolhas ao longo do processo de hidratação e modificar o sistema de vazios na matriz cimentícia (TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021). Segundo Tunstall *et al.* (2021), essas interações estão relacionadas principalmente devido a modificação da viscosidade e da interação química do superplastificante com o incorporador de ar. Embora exista alguns estudos sobre a compatibilidade entre superplastificantes e incorporadores de ar (ŞAHİN *et al.*, 2023; TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021; WANG, YANHAI *et al.*, 2023), a interação entre eles ainda é pouco explorado em argamassas de revestimento.

Sabe-se que a utilização de incorporadores de ar, superplastificantes e filer calcário separadamente em pastas e argamassas de cimento Portland favorecem algumas propriedades no estado fresco e endurecido, além de contribuir com fatores econômicos e ambientais. Por outro lado, o uso combinado desses três produtos em argamassas de revestimento é pouco abordado na literatura. A interação desses materiais levanta questões importantes sobre a influência dos aditivos na matriz cimentícia contendo adições minerais, bem como a possibilidade de adsorção competitiva entre os aditivos, o que pode resultar em incompatibilidades entre eles.

Diante do que foi apresentado, esse trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos dos superplastificantes na aplicabilidade de argamassas de revestimento, considerando a interação com o filer calcário e outros aditivos químicos. A combinação dos aditivos pode melhorar o desempenho das argamassas, impactando na eficiência da aplicação dos revestimentos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do estudo foi avaliar o efeito de aditivos superplastificantes na produção de argamassas de revestimentos com filer calcário e incorporadores de ar. São objetivos específicos:

- investigar o efeito de três superplastificantes, um a base de lignossulfonatos e dois policarboxilatos, na cinética de hidratação das pastas cimentícias, com e sem o uso de filer calcário e incorporadores de ar;
- analisar o efeito sinérgico do uso combinado de aditivos superplastificantes e incorporadores de ar em matrizes cimentícias e com filer calcário;
- estudar a aplicabilidade das argamassas em painéis de blocos cerâmicos.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: Contextualização, justificativas e objetivos específicos do estudo;
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Uso de aditivos superplastificantes, com foco nos seus efeitos em argamassas de revestimento com e sem substituição parcial do cimento por fíler calcário, e a compatibilidade com aditivos incorporadores de ar;
- Capítulo 3 – Programa experimental: apresenta os materiais utilizados no estudo, assim como as variáveis, metodologias e métodos de ensaio;
- Capítulo 4 – Resultados e discussão: análise e discussão dos resultados;
- Capítulo 5 – Conclusões: principais conclusões obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argamassas de revestimento

O desempenho das argamassas, tanto no estado fresco quanto endurecido, depende da seleção adequada dos materiais, das proporções utilizadas e da sua qualidade (DE AZEVEDO *et al.*, 2019). Aditivos e adições incorporados em argamassas de revestimento podem trazer benefícios no desempenho e durabilidade, mas também podem causar efeitos indesejados, como a incorporação de ar, quando aplicados em dosagens excessivas ou de forma inadequada (SOUZA; CARVALHAIS; DOS SANTOS, 2020).

A durabilidade está associada à capacidade da argamassa de manter suas características e desempenhar sua função ao longo do tempo, mesmo sob condições adversas. Esse material deve conter uma boa resistência mecânica e química, uma vez que pode estar exposto a intempéries (ARAGÓN *et al.*, 2019). A resistência mecânica necessária para suportar as tensões aplicadas, juntamente com o módulo de elasticidade, são parâmetros essenciais para garantir a durabilidade, permitindo que a argamassa suporte tensões e deformações (HADDAD *et al.*, 2020).

No estado fresco, argamassas de revestimento devem apresentar características como: teor de ar incorporado, coesão e retenção de água. Esta última, está relacionada com a capacidade da argamassa manter a sua trabalhabilidade, evitando a perda excessiva de água de amassamento por evaporação ou absorção pelo substrato (CARASEK, 2007).

Segundo Patural *et al.* (2011), a retenção de água é uma característica essencial das argamassas, pois impede que a água seja rapidamente absorvida pelo substrato devido à sucção. Quando aplicada no estado fresco sobre substratos secos e porosos, como blocos cerâmicos, a argamassa pode sofrer perda de água excessiva devido à ação de sucção capilar desses materiais. Essa perda de água pode comprometer tanto o desenvolvimento completo das reações de hidratação do cimento quanto a aderência entre a argamassa e o substrato (INCE *et al.*, 2014).

A aderência da argamassa ao substrato é um parâmetro complexo e que depende de diversos fatores, como o teor de água, quantidade de partículas finas e grau de hidratação (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2016; STOLZ *et al.*, 2016). A resistência de aderência à tração é a capacidade da argamassa de revestimento de resistir às tensões na interface com o substrato, caracterizando a interação entre as camadas do sistema de revestimento (VAZ; CARASEK, 2019).

Stolz *et al.* (2016), listam alguns fatores que influenciam na aderência, como: técnica de aplicação; condições climáticas no momento da aplicação e durante todo o período de vida útil

do revestimento; características dos materiais utilizados para produção da argamassa e da própria argamassa; características e propriedades do material poroso em contato com a argamassa.

O teor de ar incorporado exerce influência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido das argamassas cimentícias (WANG, SHUNXIANG *et al.*, 2023). Segundo Wang *et al.* (2023), no estado fresco, a incorporação de ar pode favorecer a fluidez do material e reduzir sua densidade aparente, enquanto no estado endurecido, o teor de ar excessivo, associado à formação de macroporos, pode comprometer as resistências a compressão e flexão.

O módulo de elasticidade é uma propriedade das argamassas que deve ser considerada nos estudos, pois influencia diretamente na capacidade de absorção das tensões decorrentes de deformações, sejam elas provocadas por cargas estruturais ou por variações térmicas, o que pode resultar no surgimento de fissuras (HADDAD *et al.*, 2020). O módulo de elasticidade expressa a relação entre a tensão aplicada e a deformação correspondente, caracterizando o comportamento da argamassa sob solicitações mecânicas e contribuindo para a avaliação da sua compatibilidade com o substrato sem haver fissuração (ARAGÓN *et al.*, 2024).

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) classifica as argamassas de revestimento como uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante e água, podendo conter adições ou aditivos, e que tenham propriedades de aderência e endurecimento. Assim como estabelece requisitos e critérios de caracterização e desempenho para as argamassas de revestimentos, dividindo-os em classificatórios e informativos. Esses requisitos garantem o desempenho adequado das suas funções como proteger e nivelar a superfície dos elementos de vedação, além de contribuir para a estética e durabilidade da edificação. Os requisitos classificatórios dividem as argamassas em ARV-I, ARV-II, ARV-III ou AET, e devem atender aos critérios estabelecidos pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023). O Quadro 1 apresenta os requisitos no estado fresco e no estado endurecido de argamassas de revestimento, e o Quadro 2: Classificação das argamassas. a classificação das argamassas.

Quadro 1: Requisitos classificatórios e informativos de argamassas para revestimento segundo a NBR 13281-1 (2023).

Estado	Tipo de Requisito	Requisito
Estado Fresco	Requisitos Informativos	Retenção de água
		Densidade de massa no estado fresco
		Teor de ar incorporado
		Tempo de uso
Estado Endurecido	Requisitos Classificatórios	Resistência potencial de aderência à tração ao substrato
		Resistência potencial à tração superficial
		Módulo de elasticidade dinâmico
		Variação dimensional (retração ou expansão linear)
	Requisitos Informativos	Densidade de massa no estado endurecido
		Resistência à tração na flexão
		Coefficiente de absorção de água por capilaridade
		Fator de resistência à difusão de vapor de água

Fonte: Adaptado da NBR 13281-1 (2023).

Quadro 2: Classificação das argamassas.

Tipo de Argamassa	Classe	Aplicação	Altura Máxima da Edificação
Argamassa para Revestimento (ARV)	ARV-I	Revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações	Até 10 m do nível médio da rua da fachada principal
	ARV-II	Revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações	Até 60 m do nível médio da rua da fachada principal
	ARV-III	Revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações	Superior a 60 m do nível médio da rua da fachada principal
Emboço Técnico (AET)	AET	Primeira camada do revestimento de edificações, parte de um revestimento ATD multicamadas (substrato para a última camada – camada aparente)	Conforme NBR 16648 (ABNT, 2018)

Fonte: Adaptado da NBR 13281-1 (2023).

2.1.1 Produção, mistura e tipos de argamassas de revestimento

A mistura dos materiais na produção de argamassas é fundamental para o desenvolvimento de sua microestrutura, que desempenha um papel importante no desempenho das propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é realizada por meio de uma ação mecânica, cujo objetivo é homogeneizar os materiais, minimizando o aglomerado de partículas que pode prejudicar a reologia do material (SILVA; SILVEIRA, 2017). Outros parâmetros, como a sequência de adição dos materiais, o tempo de mistura e o tipo de ação mecânica aplicada influenciam nas características reológicas das argamassas (SILVA; SILVEIRA, 2017; YANG; JENNINGS, 1995).

A ordem de adição dos materiais afeta a reologia das argamassas, conforme observado por Antunes *et al.*, (2005). Além disso, o tempo e a energia mecânica aplicada podem influenciar na incorporação de ar das argamassas, assim como na consistência e resistência à compressão (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005).

No caso de argamassas preparadas em obra, pode haver dificuldades em garantir a proporção adequada dos materiais, o tempo de mistura e a sequência de adição. Essas dificuldades geralmente estão associadas a fatores como a falta de controle rigoroso no canteiro, o uso de medições aproximadas em vez de dosagens precisas, a ausência de procedimentos padronizados ou a falta de treinamento adequado da equipe.

Visando um maior controle e desempenho desses materiais no canteiro de obras, no Brasil, são comercializadas argamassas industrializadas, fornecidas em embalagens ou a granel, nas quais a formulação de materiais já vem pronta, exigindo apenas a adição de água, conforme indicado pelo fabricante.

2.2 Aditivos superplastificantes

Os aditivos superplastificantes promovem a desaglomeração de partículas finas ($< 75\mu\text{m}$) permitindo a redução da quantidade de água na mistura sem comprometer a trabalhabilidade e resistência (LEI; HIRATA; PLANK, 2022; LI *et al.*, 2021; SATHYAN; ANAND, 2019).

Os superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias com base em sua composição química e método de fabricação. Essas categorias incluem lignossulfonatos (LS), melamina formaldeído sulfonado (SMF), naftaleno formaldeído sulfonado (SNF) e éter policarboxilato (PC) (SATHYAN; ANAND, 2019). Este último atua principalmente por meio de impedimento estérico, enquanto os demais atuam por repulsão eletrostática (BHANDARI *et*

al., 2023; SHA *et al.*, 2020).

Nkinamubanzi *et al.* (2016) classificou os aditivos de acordo com a capacidade de redução de água: 1) Os LS oferecem uma redução de água de cerca de 10%, e são utilizados para melhorar a trabalhabilidade em aplicações de concreto pré-misturado; 2) O SNF permite a redução de água de até 30%; 3) SMF reduz em mais de 20 a 30%; 4) PC apresentam estruturas químicas que podem ser modificadas, atingindo uma redução de água de mais de 40%. Neste estudo, foram utilizados dois aditivos à base de éter policarboxilato e um à base de lignossulfonado.

Esses aditivos também desempenham um papel fundamental ao viabilizar a substituição parcial do cimento por materiais de baixa energia incorporada, como o fíler calcário, que impactam a reologia do material no estado fresco (FLATT; SCHÖBER, 2012). A adição de agentes superplastificantes torna-se, portanto, essencial para otimizar o comportamento reológico de materiais cimentícios em sua fase inicial, além de contribuir para a redução de emissões de CO₂.

Segundo Aitcin *et al.* (2016) os lignossulfonatos são polímeros naturais amplamente utilizados como superplastificantes desde a década de 1930 e possuem um baixo custo comercial comparado a polímeros sintéticos como éter policarboxilato. Extraídos de árvores, esses polímeros resultam da fragmentação e sulfonação da lignina presente na madeira, processo que confere a eles a capacidade de solubilidade em água (AITCIN; FLATT, 2016).

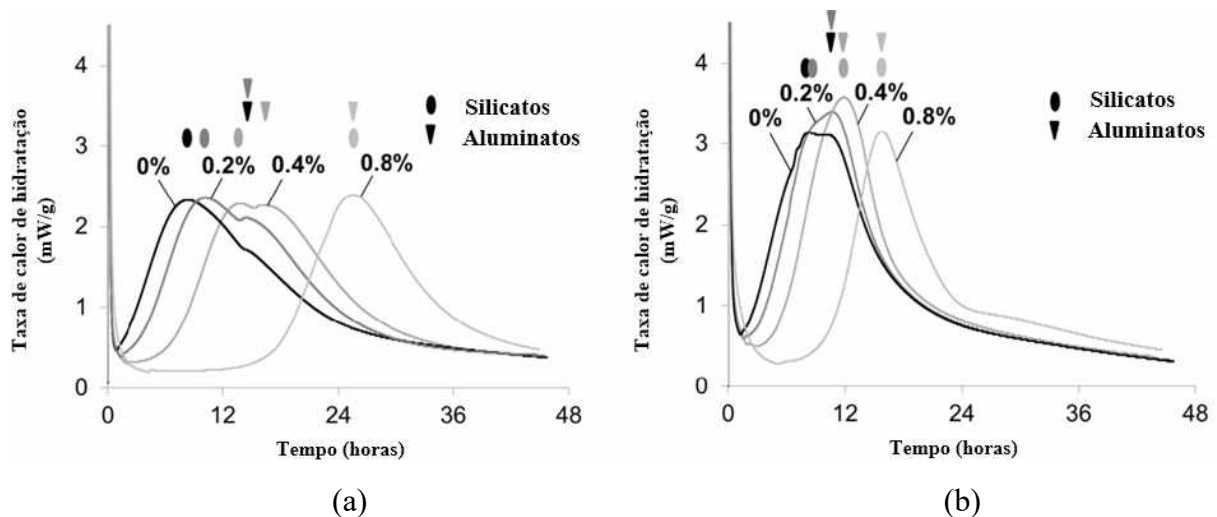
Segundo Mullick (1996) quando adicionados à mistura de cimento e água, os aditivos à base de lignossulfonato são rapidamente adsorvidos pela fase C₃A do cimento, sendo que grande parte desse processo ocorre nos primeiros segundos após a mistura. A adsorção ocorre de forma mais lenta na fase C₃S, começando entre 4 e 5 horas após o contato inicial, e continua acontecendo ao longo do tempo. Ao se adsorverem nas partículas de cimento, os aditivos formam uma película de água que pode dificultar ou impedir o avanço das reações de hidratação (MULLICK, 1996). Além disso, os açúcares naturais presentes em sua composição podem influenciar a hidratação do cimento, provocando um efeito retardante, assim como a área superficial específica do cimento utilizado (COLOMBO *et al.*, 2017a, b).

No geral, a estrutura dos lignossulfonatos apresentam ligações C-C fortes e C-O-C que podem ser identificados por análises de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e depende da origem da lignina e o tipo de madeira (BREILLY *et al.*, 2021).

Colombo *et al.* (2017b) analisaram os efeitos do aditivo lignossulfonato na reologia e tempo de pega de pastas de cimento Portland. Foram utilizados dois cimentos com diferentes áreas superficiais (890 m²/kg e 1330 m²/kg) para produção das pastas, e analisados os resultados

de calorimetria isotérmica, conforme Figura 1.

Figura 1: Curvas de calorimetria de pastas de cimento Portland com LS e diferentes áreas superficiais específicas: (a) 890 m²/kg e (b) 1330 m²/kg.



Fonte: Colombo *et al.* (2017b).

A análise dos ensaios de calorimetria evidenciou o efeito do aditivo lignossulfonato sobre a hidratação dos dois cimentos com diferentes áreas superficiais específicas. Observou-se que, para ambos os cimentos, o aumento da dosagem de lignossulfonato provocou o retardo das reações de hidratação, especialmente nas fases dos silicatos. O cimento de 890m²/kg apresentou um efeito de retardamento mais pronunciado em relação ao cimento de 1330 m²/kg.

Os superplastificantes a base de éter policarboxilato (PC) são conhecidos por apresentarem uma vasta gama de estruturas moleculares (GELARDI *et al.*, 2016a). O PC permite a modificação da sua estrutura para que se obtenha melhores desempenhos de fluidez (ZHANG *et al.*, 2019). Sua estrutura é constituída por uma cadeia principal, também chamada de espinha dorsal aniônica, que se ramifica em um grupo carboxila, responsável pela adsorção à partícula de cimento, e pela cadeia lateral, em que se encontra o éster e o éter, que funcionam como um espaçador entre as partículas e proporcionam o impedimento estérico (LEI *et al.*, 2022; STECHER; PLANK, 2020).

Nos últimos anos, os aditivos PC têm demonstrado maior eficácia na redução da demanda de água e na melhoria de fluidez e trabalhabilidade em materiais cimentícios, com ou sem adição mineral (LEI *et al.*, 2022). Estes aditivos foram criados na década de 1930, no Japão, pelo Dr. Tsuyoshi Hirata, e são chamados de aditivos de última geração.

A capacidade de modificação e sintetização do polímero PC permite que pesquisadores

criem maneiras e formas de modificar o superplastificante, seja para atender a critérios específicos, ou para permitir a compatibilização com outros aditivos químicos e adições minerais. Atualmente, é comercializado no mundo aditivos éter policarboxilato de diversas estruturas químicas. Lei *et al.* (2022) apresentou no seu estudo uma gama variada de estruturas químicas, conforme apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Tipos de PCs e suas características.

Molécula	Composição química	Desempenho
MPEG	metóxi polietileno glicol	menor propensão a causar segregação e exsudação
APEG	anidrido maleico e macromonômero de poli(etilenoglicol) alílico	redução de água e bom desempenho com escória ativada por álcalis
VPEG	anidrido maleico, macromonômero de éter vinílico e ácido acrílico	excelente redução de água
HPEG	macromonômero de éter metalílico	redução de água e retenção de abatimento
IPEG	macromonômero isoprenil oxi-poli(etilenoglicol)	redução de água pouco menor que dos HPEG e retenção de água melhor ou igual
PCs fosfatados	grupos fosfato no lugar de carboxilatos: éster fosfato, formaldeído, fenoletoxilato, fenol	maior adsorção e melhor dispersão em relações a/c baixas

Fonte: Lei *et al.* (2022).

Liu *et al.* (2017) investigaram o desempenho de dois superplastificantes à base de éter policarboxilato (PC) com estruturas moleculares distintas: um com configuração em forma de estrela e outro em forma de pente. Ambos os aditivos foram incorporados em argamassas, e os resultados demonstraram que a redução no teor de água foi proporcional ao aumento da dosagem dos superplastificantes. No ponto de saturação, a redução de água alcançou cerca de 24% para o PC em forma de estrela e 29% para o PC em forma de pente, evidenciando diferenças na eficiência de cada estrutura molecular.

O PC pode causar efeitos indesejáveis em pastas e argamassas, como incorporação de ar excessiva e retardo no tempo de pega (ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2014). A incorporação de ar dos policarboxilatos ocorre devido à presença de números elevados de grupos hidroxila, éter, carboxila e outros grupos polares em sua estrutura química, os quais impactam intensamente a interface líquido-ar (HU; XIONG; HE, 2024).

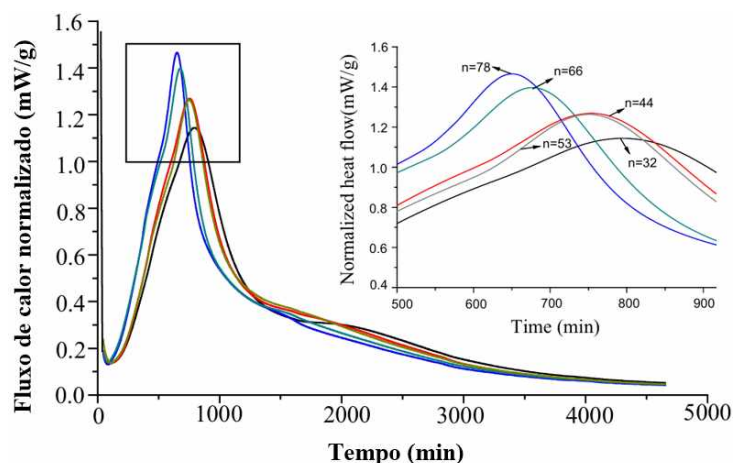
Estudos têm investigado o impacto do superplastificante PC na resistência à compressão e à flexão de argamassas, assim como na cinética de hidratação de pastas de cimento Portland (LIU, J. *et al.*, 2019; TIAN *et al.*, 2019; WEN *et al.*, 2019). Dentre esses, observa-se que a cinética de hidratação e o consequente retardo na hidratação está relacionada a diversos fatores,

entre eles: a formação de uma camada adsorvida sobre os grãos de cimento, que dificulta o contato com a água; a estrutura molecular do aditivo, incluindo a densidade e o comprimento das cadeias laterais; e o teor de aluminato tricálcico (C_3A) do cimento utilizado; a capacidade de adsorção e quantidade de grupos carboxilatos presente na estrutura do polímero (ROJAS; CINCOTTO, 2013; ZHANG *et al.*, 2019). Além disso, as demais características são afetadas de acordo com o tipo de molécula que é composto o aditivo.

De acordo com Hu *et al.* (2024), é possível modificar a estrutura do policarboxilato para reduzir o efeito de incorporação de ar. No entanto, essa adaptação enfrenta desafios, como os elevados custos de produção e métodos tecnológicos limitados. Além da diminuição da incorporação de ar, outros fatores importantes justificam a alteração da estrutura molecular do PC, incluindo a eficácia na dispersão em cimentos com substituições parciais por adições minerais, a compatibilidade entre o aditivo e o cimento Portland, e a necessidade de controlar o efeito retardador (HE *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2022; SCHMID; PLANK, 2020a; WANG; YIN; KONG, 2022; WANG *et al.*, 2024).

Dong *et al.* (2019) sintetizaram cinco superplastificantes PC com comprimentos de cadeia lateral variando entre: 32, 44, 53, 66 e 78 n/EO (número de unidades de óxido de etileno) para análise na influência dessa variação na cinética de hidratação por calorimetria de isotérmica, conforme Figura 2. Os resultados indicaram um atraso nas reações de hidratação das pastas de cimento com superplastificantes de menores cadeias laterais. Como a adsorção de polímeros policarboxilatos com cadeias laterais menores é maior nas partículas de cimento, o atraso da reação acontece com mais intensidade.

Figura 2: Efeito do comprimento da cadeia lateral dos PCs na cinética de hidratação das pastas de cimento.



Fonte: Dong *et al.* (2019).

Zhang *et al.* (2019) estudaram diversos PCs com densidade e comprimento de cadeias laterais variadas e diferentes estruturas moleculares. Os resultados demonstraram que PCs com cadeias laterais mais longas e maior densidade aumentam a resistência à compressão e a flexão inicial de argamassas, mantendo a relação água/cimento fixa. A cinética de hidratação apresentou retardado nas pastas de cimento indicado pelo calor acumulado total em dois dias e o atraso do pico principal de hidratação. Esse retardo foi independente da variação molecular dos polímeros, e foi atribuído a capacidade de adsorção do PCs nas pastas de cimento fresco.

A retenção de fluidez, que é a capacidade do material de manter sua trabalhabilidade ao longo do tempo, é aprimorada pelo uso de superplastificantes (BREILLY *et al.*, 2021). Aïtcin e Flatt (2016) explicam que a perda de fluidez está diretamente relacionada à quantidade de polímero disponível na solução e à sua capacidade de se adsorver nas superfícies de aluminatos e silicatos recém-formados.

No entanto, deve-se evitar efeitos indesejáveis na incorporação dos aditivos superplastificantes, como o retardo na hidratação e a baixa resistência em idades precoces (DE HITA; CRIADO, 2023; LIU, XIAO *et al.*, 2017). Para isso, uma das principais estratégias para minimizar esses efeitos é realizar a determinação do ponto de saturação (teor ótimo) de superplastificantes (DING; NG; OU, 2023). O ponto de saturação é a quantidade máxima de teor de aditivo que pode ser adicionado à mistura sem causar efeitos negativos no material, como perda de trabalhabilidade e segregação (HALLAL *et al.*, 2010).

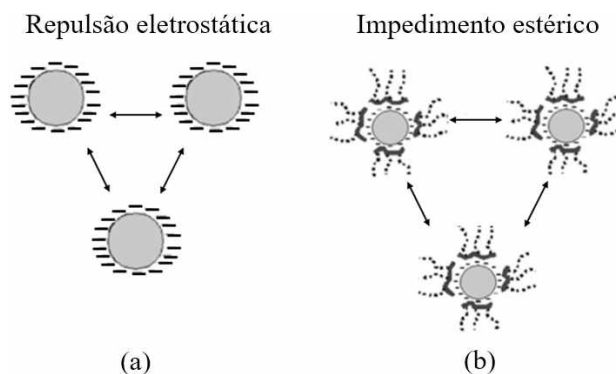
2.2.1 Mecanismos de ação dos aditivos superplastificantes

O aditivo superplastificante quando adicionado em materiais cimentícios são adsorvidos por partículas de cimento promovendo a redução das forças atrativas dessas partículas (FLATT *et al.*, 2012; LEI *et al.*, 2022). Os mecanismos de ação conhecidos são a repulsão eletrostática e o impedimento estérico.

Segundo Piekarczyk (2014), as partículas de cimento possuem cargas elétricas que as levam a se aglomerar em meio aquoso, o que compromete a dispersão do material. Esse fenômeno ocorre devido às forças de atração eletrostática entre as partículas. No entanto, essa tendência à aglomeração pode ser neutralizada pela adsorção de polímeros aniônicos, como os superplastificantes SNF, LS e SMF. Esses grupos se fixam na superfície das partículas de cimento, proporcionando uma carga negativa que gera repulsão eletrostática entre elas, resultando em um material mais fluido e trabalhável. Esse mecanismo está diretamente relacionado com a adsorção do aditivo (ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2014). A Figura 3

apresenta uma ilustração dos mecanismos de ação.

Figura 3: Representação dos mecanismos de ação dos aditivos superplastificantes.



Fonte: Lei *et al.* (2022).

Aditivos superplastificantes incluem vários grupos orgânicos carregados eletricamente como: grupos polares (OH^-); sulfonato $-\text{SO}_3^-$; carboxilato $-\text{COO}^-$ e amônio $-\text{NH}_4^+$. O mecanismo de repulsão eletrostática presente nos aditivos superplastificante está associada, principalmente, pela presença de grupos como sulfonato $-\text{SO}_3^-$ (KAPELUSZNA; CHRABĄSZCZ, 2023).

Os éteres policarboxilato (PCs) apresentam elevada capacidade de promover fluidez e reduzir o teor de água nas misturas cimentícias em comparação com outros superplastificantes, devido a um mecanismo duplo: 1) repulsão eletrostática; 2) impedimento estérico, causado por suas cadeias laterais alongadas (JANOWSKA-RENKAS, 2013). Esse efeito depende de fatores como: quantidade e comprimento das cadeias laterais, extensão da cadeia principal, densidade de carga, peso molecular e arquitetura molecular (GELARDI *et al.*, 2016b; JANOWSKA-RENKAS, 2013; ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2014). Esses polímeros com cadeias laterais ramificadas são os mais empregados na atualidade (DE HITA; CRIADO, 2023).

2.3 Aditivo incorporador de ar

O aditivo incorporador de ar (IA) é utilizado em argamassas de revestimento com o objetivo de criar bolhas no sistema para melhorar características específicas, em especial a trabalhabilidade (KONTIĆ *et al.*, 2023; ŞAHİN *et al.*, 2023). Os incorporadores de ar vão atuar principalmente no estado fresco, mas também podem alterar características no estado endurecido. No geral, esses aditivos podem reduzir a densidade do material, aumentar o teor de

ar incorporado e modificar a retenção de água da argamassa. Consequentemente, as propriedades no estado endurecido como resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, densidade de massa no estado endurecido, absorção por capilaridade são afetados devido ao aumento de bolhas de ar (BAPTISTA JUNIOR *et al.*, 2024).

Segundo Romano *et al.* (2018), em argamassas de revestimento, a incorporação de ar pode trazer melhorias na coesão, plasticidade, reduzir a exsudação da água e possibilita a redução da quantidade de água, o que diminuiria a retração plástica e por secagem. Em um estudo anterior, Romano *et al.* (2015) observaram que embora a incorporação de ar melhore a reologia das argamassas no estado fresco, ela impacta negativamente a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e a aderência.

O IA pode melhorar a trabalhabilidade; facilitar o espalhamento e o manuseio, aumentando a produtividade; diminuir cargas sobre estruturas (reduzindo a densidade); aumentar a resistência a ciclos de gelo-degelo e reduzir o consumo de cimento nas composições das argamassas (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

No Brasil, onde o congelamento não é um fator comum, utiliza-se o IA principalmente para alcançar as demais vantagens citadas. Contudo, o uso em dosagens excessivas do incorporador de ar, pode comprometer a resistência à compressão, devido ao aumento da quantidade de vazios no material no estado endurecido, e a resistência de aderência à tração entre o bloco cerâmico e a argamassa, resultando em um desempenho inferior do material (KONTIĆ *et al.*, 2023; SILVA, B. A. *et al.*, 2020).

No estudo realizado por Stolz *et al.* (2016), foi avaliado a influência da textura no substrato e das características reológicas das argamassas utilizando aditivos incorporadores de ar (0, 0,2 e 0,5%). Foi identificado que a reologia é o fator principal na aderência. As análises indicaram que a argamassa com IA apresentou resistência de aderência menor. Esse fator é justificado pela formação de bolhas de ar maiores na interface em relação à argamassa sem IA, que apresentou maior resistência à aderência.

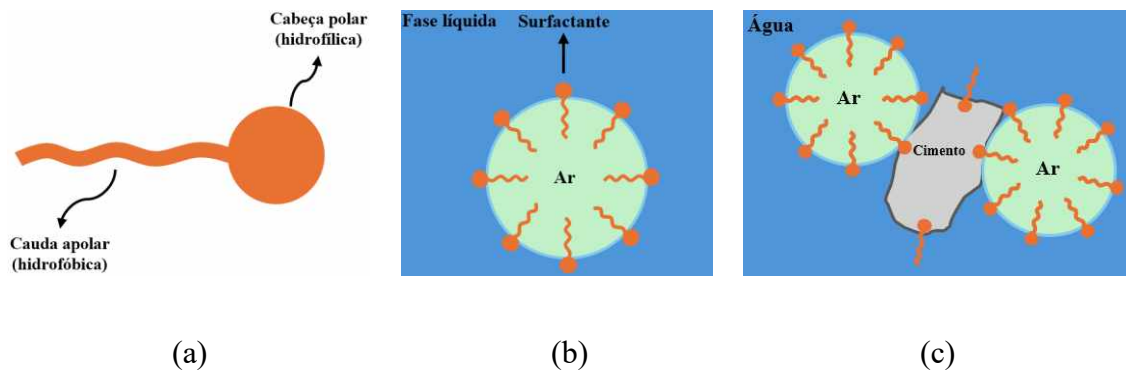
Os agentes incorporadores podem ser sintetizados a partir de resinas naturais, como as resinas de madeira (breu), e surfactantes sintéticos (éteres de alquil poliglicol, aquilsulfatos e alquil sulfonatos). Os aditivos obtidos a partir da resina de madeira possuem baixo custo e alta confiabilidade na sua utilização, e por isso são os mais utilizados atualmente. Esses tensoativos aniônicos são classificados como carboxilatos (COO^-), contendo ácido carboxílico neutralizado na sua composição (TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021).

A estrutura da molécula do surfactante é composta por duas extremidades: uma cabeça polar (hidrofílica) e uma cauda apolar (hidrofóbica) (Figura 4a), sendo chamados de compostos

anfífilos (KONTIĆ *et al.*, 2023; TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021). Além disso, é possível alterar o comprimento da cadeia hidrofóbica e introduzir ramificações ou ligações insaturadas para aumentar a solubilidade em água (GELARDI *et al.*, 2016b).

Na interface ar-água apresentada na Figura 4b, a molécula do surfactante é posicionada com a cauda apolar (hidrofóbica) voltada para o ar, enquanto a cabeça polar (hidrofílica) é voltada para água (GELARDI *et al.*, 2016b). Com isso a tensão superficial da água é reduzida e há a formação de bolhas de ar (SHAH; YUAN; ZUO, 2021). Quando analisado a molécula na interface sólido-água (Figura 4c), o grupo polar do surfactante interage com a partícula sólida, transformando as partículas de cimento em partículas hidrofóbicas, enquanto a cauda apolar é voltada para a água (TUNSTALL; SCHERER; PRUD'HOMME, 2017).

Figura 4: Representação esquemática do incorporador de ar.



Fonte: Adaptado de Sahin *et al.* (2023).

A estrutura e o mecanismo de ação da molécula do surfactante apresentada na Figura 4 são os mais comuns na literatura e o que foi utilizado para este estudo. No entanto, Chen *et al.* (2017) realizaram uma pesquisa sobre surfactantes gemini sulfonados. Esses surfactantes possuem uma estrutura de cadeia dupla, com duas caudas hidrofóbicas e duas cabeças hidrofílicas. Foram aplicados em argamassas e avaliados em relação aos parâmetros de formação de bolhas de ar em argamassas de cimento e comparados com incorporadores de ar de cadeia única. Os resultados mostraram que os surfactantes gemini apresentam maior atividade superficial e capacidade de incorporação de ar (CHEN *et al.*, 2017).

2.4 Requisitos normativos para aditivo superplastificante e incorporador de ar

A NBR 11768-3 (ABNT, 2019), a EN 934-2 (BS, 2012) e a (C494 (ASTM, 2005)

apresentam definições similares para os superplastificantes, designando-os como aditivos que permitem uma alta redução da demanda de água, sem influenciar a sua consistência; e, aditivos que possibilitam a adição de fluidez/trabalhabilidade na mistura sem afetar o teor de água. Os dois efeitos podem ocorrer de maneira individual ou em conjunto. Na Tabela 1 estão apresentadas a categoria dos superplastificantes e requisitos físicos propostos pelas três normas supracitadas.

Tabela 1: Requisitos físicos dos superplastificantes.

Norma técnica	NBR 11768-1	EN 934-2	ASTM C494
Categoria de Aditivos superplastificantes	Redutor de água - tipo 2 (RA2)	aditivo redutor/superplastificante de alta faixa de água	aditivo redutor de água, faixa alta (Tipo F)
Resistência à compressão em relação ao concreto de referência (%)			
1 dia	-	$\geq 1,4$	$\geq 1,4$
7 dias	$\geq 1,15$	-	$\geq 1,15$
28 dias	$\geq 1,20$	$\geq 1,15$	$\geq 1,10$
Redução de água comparado com a mistura de referência (%)	$\geq 15,0$	$\geq 12,0$	$\geq 12,0$
Ar incorporado no concreto fresco (%)	$\leq 2,0$	$\leq 2,0$	
Tempos de pega (Tp; h:min)			
Início	$\geq 00:30$		$01:00 < T_p \leq 03:30$
Fim	$\leq 01:30$		$\leq 03:30$

Fonte: Adaptado das normas NBR 11768-1, EN 934-2, ASTM C494.

Conforme as normas EN 934-2 (BS, 2012) e NBR 11768-3 (ABNT, 2019), o aditivo incorporador de ar facilita a adição controlada de microbolhas de ar, distribuídas uniformemente pela mistura, que permanecem estáveis após o material endurecer. Em comparação, a C260 (ASTM, 2001) define o incorporador de ar como um ingrediente adicionado ao concreto especificamente para introduzir ar, sem detalhar requisitos de distribuição ou estabilidade das bolhas após o endurecimento do material.

As normas brasileira e europeia apresentam requisitos idênticos para aditivos incorporadores, conforme Tabela 2.

A norma americana estabelece como requisitos físicos obrigatórios a resistência à compressão e o tempo de pega para aditivos incorporadores de ar. Esses aditivos devem assegurar que o concreto alcance 90% da resistência à compressão do concreto de referência

aos 3, 7 e 28 dias. Além disso, o tempo de pega inicial e final pode variar em até $\pm 1h15min$ em relação ao concreto de referência.

Tabela 2: Requisitos físicos do incorporador de ar.

Requisito	Propriedade
Teor de ar no concreto fresco	$\geq 2,5\%$ acima do concreto de referência; teor total entre 4% e 6%
Características dos poros no concreto endurecido (facultativo)	Fator de espaçamento $< 0,200$ mm
Resistência à compressão aos 28 dias	$\geq 75\%$ da resistência do concreto de referência

Fonte: Adaptado das normas NBR 11768-1, EM 934-2.

As especificações normativas a respeito das características químicas e físicas dos aditivos contribuem para a qualidade, segurança e eficácia desses na produção dos materiais cimentícios.

Ao analisar as normas existentes para regulamentação de aditivos químicos em materiais de construção, observa-se a ausência de diretrizes específicas para argamassas. Embora algumas normas, como a EN 934-2 (BS, 2012), aborde aspectos relacionados aos aditivos em argamassas, as normas brasileira e americana abordam os aditivos químicos em concreto. No sistema concreto (cimento: areia: brita: água), as propriedades mecânicas, como resistência à compressão e à tração, são essenciais e determinantes para a caracterização do material. No entanto, no caso das argamassas, esses parâmetros não são os fatores predominantes para garantir sua qualidade, visto que aspectos como trabalhabilidade, aderência, durabilidade e resistência à deformação são mais relevantes.

2.5 Dosagem de aditivos

Para a dosagem de aditivos superplastificantes, é importante observar os limites estabelecidos pelos fabricantes para evitar problemas como segregação e retardo no tempo de pega.

O ponto de saturação/teor ótimo de aditivo é a quantidade máxima de aditivo que pode ser utilizado sem comprometer as propriedades desejadas. Esse teor é essencial para garantir que o aditivo será otimizado ao ser incorporado no material, seja no estado fresco ou endurecido, além de ser um parâmetro fundamental na compatibilidade entre aditivo e cimento

(DING; NG; OU, 2023).

Em geral, à medida que se aumenta o teor do superplastificante, os efeitos de fluidez no material são melhorados. Contudo, a partir de um certo teor, o aditivo não irá alterar ou fará pouca alteração nas características de fluidez e trabalhabilidade da mistura, sendo este o ponto de saturação (DING; NG; OU, 2023). Caso não seja respeitado esse valor, o aditivo pode influenciar negativamente nas propriedades reológicas do material, como retardo no tempo de pega, comprometendo o desempenho final da mistura.

Alguns métodos são empregados para determinar o teor de saturação do SP, como ensaios de mini abatimento (ensaio de Kantro) e cone de Marsh. Adicionalmente, técnica como a reometria rotacional, no qual varia-se a taxa de cisalhamento em ciclos de aceleração e desaceleração tem sido utilizada (CECEL *et al.*, 2019). Hot *et al.* (2014) avaliando a viscosidade aparente de matrizes cimentícias com diferentes teores de PC verificaram que a partir de um determinado teor, o aditivo não tem o efeito superplastificante aumentado.

2.6 Uso combinado de aditivos superplastificantes e incorporador de ar

O uso combinado de aditivos superplastificantes e incorporadores de ar deve ser cautelosamente analisado. Wang *et al.* (2019) relatam que a estabilidade de bolhas formadas pelo incorporador de ar pode ser afetada quando utilizado aditivos superplastificantes em conjunto.

Segundo Tunstall *et al.* (2021) a influência do superplastificante sobre o agente incorporador de ar pode ser atribuída a dois fatores principais: i) modificação da viscosidade e ii) interação química com os agentes incorporadores de ar. A baixa viscosidade no material pode facilitar com que as bolhas de ar flutuem pela fase líquida, o que dificulta a sua retenção e permite que as bolhas de ar escapem. A interação química pode requerer dosagens mais altas de incorporador de ar se misturados com superplastificantes SMF, SNF. O PC pode causar a perda de ar ao longo do tempo e aumentar o tamanho da bolha de ar.

Bedard e Mailvaganam (2005), relataram que a utilização de incorporadores de ar com superplastificantes à base de lignossulfonatos ocasionam no aumento de bolhas de ar, principalmente se adicionados de forma tardia na mistura. Nesse caso, o aumento do teor de ar não representa uma melhora na qualidade do sistema de vazios, uma vez que a superfície específica das bolhas é reduzida. Isso pode ser explicado principalmente devido a presença de açúcares e impurezas nos lignossulfonatos.

Apesar da ampla utilização de superplastificantes e incorporadores de ar em sistemas

cimentícios, ainda são poucos os estudos que abordam de forma completa os efeitos da combinação desses aditivos especificamente em argamassas de revestimento.

2.7 Fíler calcário

No Brasil, o teor de materiais carbonáticos, como o fíler calcário, permitido no cimento Portland com função estrutural pode variar de 0 a 25%, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). Além dos cimentos comercializados contendo uma porcentagem de materiais carbonáticos, muitos pesquisadores investigam o efeito da mistura do cimento com fíler calcário, buscando entender como essa adição influencia as propriedades e o desempenho de materiais cimentícios. (BAHULAYAN; SANTHANAM, 2024; BRIKI *et al.*, 2021; DI SALVO BARSÍ *et al.*, 2020; LOTHENBACH *et al.*, 2008; NEHDI; MINDESS; ALTCIN, 1996b; VUK *et al.*, 2001).

Devido à baixa energia incorporada e à ampla disponibilidade na natureza, o fíler calcário é amplamente utilizado em matrizes cimentícias (MARCHETTI *et al.*, 2022). A sua utilização pode contribuir para a melhoria na hidratação do cimento, reduzindo o período de indução e acelerando o processo de hidratação devido ao aumento de pontos de nucleação na matriz, favorecendo a hidratação acelerada do C_3S e aluminatos (BAHULAYAN; SANTHANAM, 2024; DI SALVO BARSÍ *et al.*, 2020). O aumento dos pontos de nucleação na matriz e diminuição do espaço para produtos de hidratação é chamado de “efeito fíler”.

O calcário contribui também para a densificação da matriz cimentícia, reduzindo a porosidade e melhorando a compactação (DI SALVO BARSÍ *et al.*, 2020).

A trabalhabilidade e a resistência à compressão também podem ser afetados pelo fíler calcário. Foi relatado que, para argamassas, teores de substituição de cimento por calcário de até 5% melhoram a trabalhabilidade, permitindo a redução da relação a/c sem prejudicar esta propriedade (KWAN; MCKINLEY, 2014). A resistência à compressão é afetada de acordo com a finura do fíler calcário. Caso o fíler seja excessivamente fino, pode ocasionar em aglomeração de partículas e reduzir a resistência (BAHULAYAN; SANTHANAM, 2024).

Briki *et al.* (2021) estudaram os efeitos da finura do calcário sobre a resistência e a cinética de hidratação em pastas e argamassas de cimento Portland, substituindo 20% do cimento por fíler calcário com duas áreas superficiais distintas: 4,21 m²/g e 0,46 m²/g. O calcário com maior área superficial (4,21 m²/g) apresentou um efeito de diluição mais significativo, com pouco impacto na hidratação do C_3S . Por outro lado, o calcário com menor área superficial (0,46 m²/g) intensificou a hidratação do C_3S , compensando o efeito de diluição e resultando em uma resistência semelhante à do cimento Portland após 7 dias. Dhandapani *et*

al. (2021) relatam que quanto maior a finura do calcário, melhores são os efeitos no desempenho de argamassas, principalmente em relação à hidratação e ao desenvolvimento da resistência.

Vuk *et al.* (2001) investigaram a interação entre a adição de calcário em cimentos Portland com dois níveis distintos de fator de saturação de cal (FSC) e diferentes graus de finura do calcário. Os autores concluíram que os efeitos do filer calcário estão mais relacionados ao tipo de clínquer do que à finura do calcário.

Teores elevados de substituição de cimento por calcário podem intensificar os efeitos de diluição, como demonstrado por Costa *et al.* (2017), ao substituírem volumes de cimento por filer calcário em proporções de 30% e 60%. Os resultados indicaram que, à medida que o teor de substituição aumentava, os efeitos de diluição tornavam-se mais evidentes, levando à redução das propriedades mecânicas das argamassas. No entanto, mesmo com uma redução de 18% na resistência à tração, a resistência à aderência entre a argamassa e o substrato cerâmico foi 12% superior à referência. Esse aumento da resistência de aderência foi relacionado à presença de partículas finas de filer calcário, que contribuem para uma melhor acomodação da pasta na interface e favorecem o contato em nível molecular entre a pasta de cimento e o substrato.

2.8 Aditivos químicos e filer calcário na matriz cimentícia de argamassas de revestimento

O uso de aditivos químicos e filer calcário separadamente em argamassas de revestimento tem diversos benefícios que já foram citados nas seções anteriores. Porém, o uso em conjunto ainda traz alguns desafios de compatibilidade entre aditivo-cimento e como a adição mineral influencia nessa interação.

Segundo Alonso *et al.* (2013) a compatibilidade entre aditivo-cimento depende de fatores tanto da composição do cimento quanto do aditivo que está sendo utilizado. Os aditivos influenciam na sua dosagem, a forma e o momento como é incorporado durante o processo de mistura dos materiais, além da sua estrutura e composição química. O cimento pode influenciar nessa compatibilidade devido a sua finura, composição química e mineralógica e teor de C_3A . Com a substituição de parte do cimento por filer calcário, a compatibilidade do cimento com o aditivo pode ser afetada, principalmente devido a adição de área superficial na mistura que pode afetar a adsorção do superplastificante (ALONSO; PALACIOS; PUERTAS, 2013).

Montes *et al.* (2012) avaliaram a compatibilidade de aditivos superplastificantes do tipo

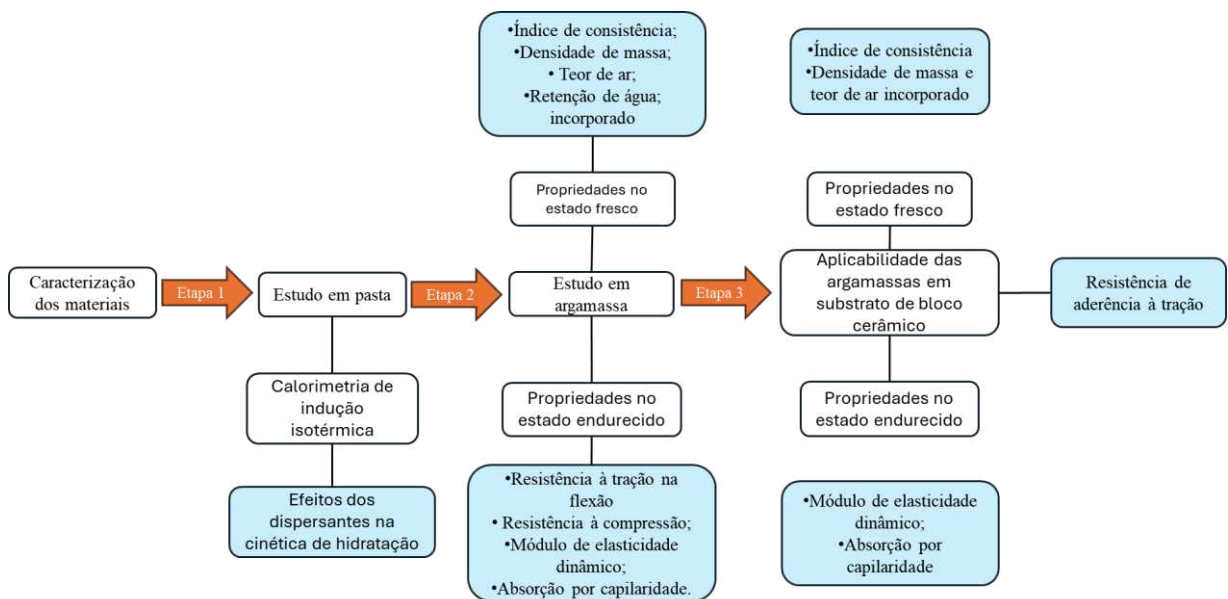
PC, LS, MS e NS em matrizes contendo 30% de fíler calcário. Os resultados apresentaram que os aditivos MS e LS em matrizes com calcário demonstraram melhor adsorção, o que indica uma maior afinidade desses aditivos com o cimento. Por outro lado, o PC e NS demonstraram comportamento semelhante tanto nas matrizes com quanto sem adição de calcário. A adição de fíler altera o comportamento do cimento influenciando na adsorção do superplastificante.

Montes *et al.* (2013) realizaram um estudo variando o teor de fíler calcário (10%, 30% e 50%) e utilizando superplastificantes PC, SMF e SNF. Os resultados indicaram que, para pastas com teor de fíler calcário inferior a 30%, não houve impacto significativo na reologia, em comparação com a pasta sem fíler calcário. A resistência à compressão, medida aos 2, 7 e 28 dias, mostrou um aumento com a incorporação de 10% de fíler calcário, mesmo sem a adição de superplastificantes. No entanto, para teores de 30% e 50% de fíler calcário, a resistência à compressão foi inferior quando os polímeros PC e NS foram adicionados, sugerindo que, apesar da redução na relação água/cimento, o fíler calcário não teve um efeito positivo no desempenho do material.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado para analisar o efeito de três aditivos superplastificantes na produção de argamassas de revestimento com filer calcário e incorporadores de ar. O estudo foi desenvolvido em três etapas: (1) um estudo em pasta para avaliar a influência dos aditivos superplastificantes na cinética de hidratação; (2) um estudo em argamassa para verificar o impacto dos aditivos nas propriedades no estado fresco e endurecido; e (3) um estudo da aplicabilidade das argamassas a fim de avaliar como os aditivos interferem nas etapas de execução do revestimento e nas propriedades do conjunto argamassa-substrato. Na Figura 5 está apresentado um fluxograma das etapas desenvolvidas destacando as variáveis e os métodos de ensaios que foram adotados em cada estudo.

Figura 5: Fluxograma das etapas a serem desenvolvidas.



Fonte: O autor.

Na seção seguinte, estão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, bem como um detalhamento de cada etapa do estudo.

3.1 Materiais

Na formulação das pastas e argamassas foram empregados cimento Portland, filer calcário, areia natural, dois aditivos incorporadores de ar, sendo um a base de breu saponificado

(PE) e outro a base de lauril éter sulfato de sódio (IA), ambos disponíveis no mercado e superplastificantes (A, B, C). A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento público. Na etapa de aplicabilidade, as argamassas foram aplicadas em painéis constituídos de blocos cerâmicos. A caracterização física e química dos materiais adotados está detalhada nos tópicos subsequentes.

3.1.1 Cimento e filer calcário

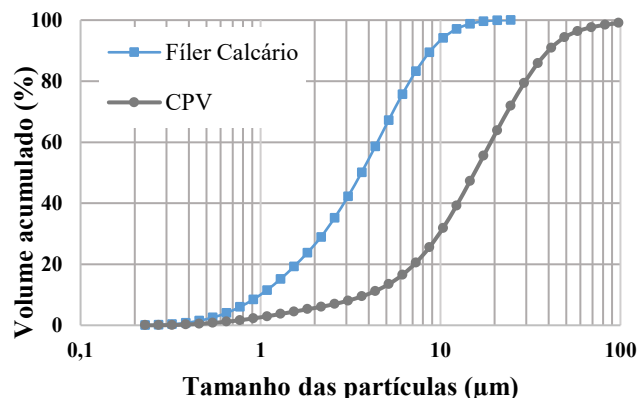
Para a elaboração das pastas e argamassas, utilizou-se um cimento Portland CPV – ARI e filer calcário (Profine 1 – Provale). Foram realizados ensaios de massa específica, área superficial específica (BET) e distribuição granulométrica. A massa específica foi determinada conforme NBR 16605 (ABNT, 2017) utilizando como reagente querosene e por picnometria de gás Hélio (Micromeritics, Accpyc 1340). A área superficial específica por BET das partículas foi obtida por ensaios de absorção/dessorção de nitrogênio, com equipamento MicrotracBEL (Belsorp). De acordo com Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), essa metodologia é mais aceita para essa medição, pois baseia-se na adsorção de moléculas de gás em camadas sobre o adsorvente. O ensaio de distribuição granulométrica dos materiais foi realizado em granulômetro a laser Helos KR (Sympatec) com sistema de dispersão (Sucell) e intervalo de análise de 0,1 a 350 μm . A massa de amostra ensaiada foi de 0,15 g, dispersa em solução de água e pirofosfato de sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3 e as curvas granulométricas do cimento e filer calcário, da qual foram obtidos os diâmetros equivalentes, estão apresentados na Figura 6.

Tabela 3: Propriedades físicas do cimento e filer calcário.

DADOS	Métodos de ensaio	Cimento	FC1
		CPV	Profine 1
Massa específica (g/cm^3)	NBR 16605:2017	$3,07 \pm 0,02$	$2,79 \pm 0,04$
	Picnometria de gás Hélio ¹	$3,11 \pm 0,03$	$2,83 \pm 0,04$
D10 (μm)	Difração a laser ¹	3,6	0,9
D50 (μm)		14,3	3,3
D90 (μm)		36,8	8,1
Área superficial específica (BET) (m^2/g)	Adsorção/dessorção de gás N ₂ ¹	1,49	4,01

¹ Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Figura 6: Curva granulométrica do cimento e filer calcário



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados de granulometria, nota-se que o filer calcário apresenta maior quantidade de finos em relação ao cimento. Este resultado é confirmado pela análise BET apresentado pela Tabela 3, no qual o filer calcário possui uma área superficial específica cerca de 2,7 vezes maior que a do cimento.

A composição química do cimento e filer calcário foi obtida pelos ensaios de fluorescência de raios X (FRX), conforme a NBR ISO 12677 (ABNT, 2014), e perda ao fogo, segundo a NBR NM 18 (ABNT, 2012). A composição química do cimento e do filer calcário estão apresentadas na Tabela 4. A quantificação dos óxidos foi realizada pelo software GeoQuant.

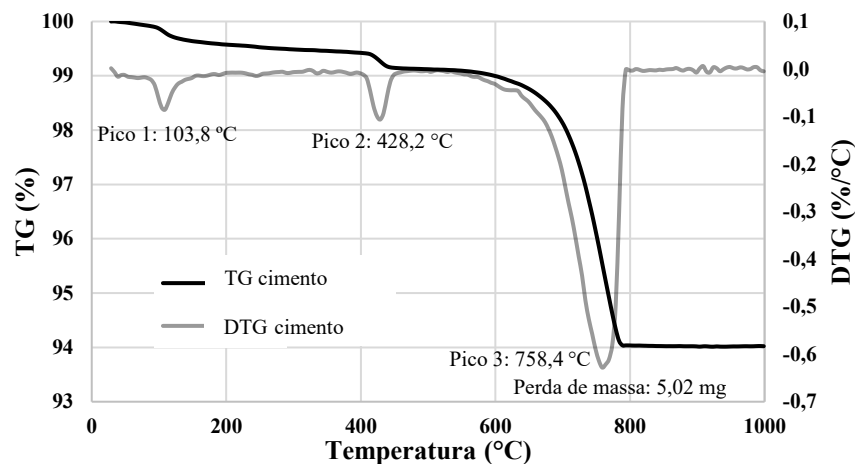
Tabela 4: Composição química do cimento e do filer calcário

ÓXIDOS	CONCENTRAÇÃO (%)	
	Cimento (CP-V)	Fíler Calcário
CaO	57,85	32,13
SiO ₂	17,16	1,17
Al ₂ O ₃	4,34	0,08
Fe ₂ O ₃	2,70	-
SO ₃	1,73	-
K ₂ O	0,95	0,01
Na ₂ O	0,13	0,02
MgO	2,62	5,46
P ₂ O ₅	0,18	0,03
TiO ₂	0,23	0,01
Mn ₂ O ₃	0,09	-
Outros	0,12	0,10
Perda ao fogo	5,88	37,80

Fonte: Próprio autor.

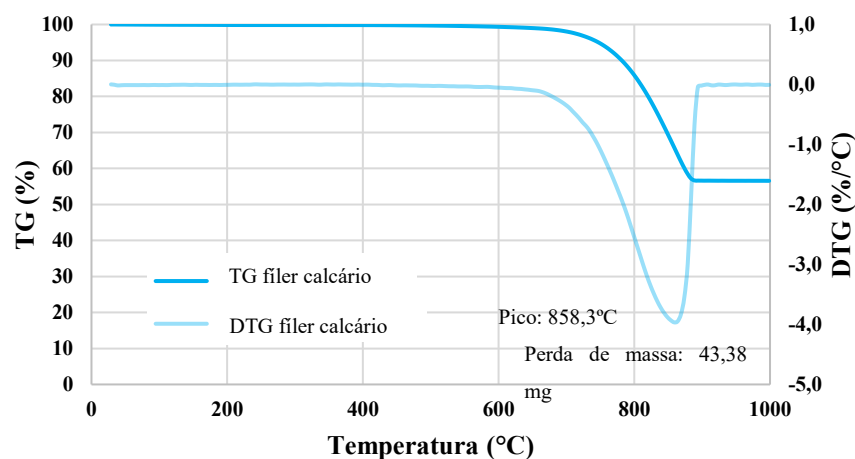
A análise termogravimétrica foi conduzida em um TA Instruments, série Discovery, modelo TGA 55, registrando-se a variação de massa do material em função do aumento de temperatura. Os ensaios ocorreram em atmosfera inerte, utilizando cadinho de alumina sem tampa, com taxa de aquecimento de 20 °C/min entre 25 °C e 900 °C e massa amostral de 50 mg. As Figura 7 e Figura 8 apresentam as curvas de termogravimetria do cimento Portland e do filer calcário, respectivamente.

Figura 7: Curva de termogravimetria obtida para o cimento Portland (CP-V)



Fonte: Próprio autor.

Figura 8: Curva de termogravimetria obtida para o filer calcário



Fonte: Próprio autor.

No cimento CP-V (Figura 7), foram observados três picos principais. Os picos 1 (103,8 °C) e 2 (428,2 °C) estão associados, respectivamente, à desidratação do C-S-H e à desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2) no cimento hidratado, indicando leve hidratação durante a estocagem. As perdas de massa nesses picos foram de 0,26 mg e 0,28 mg, e o teor de

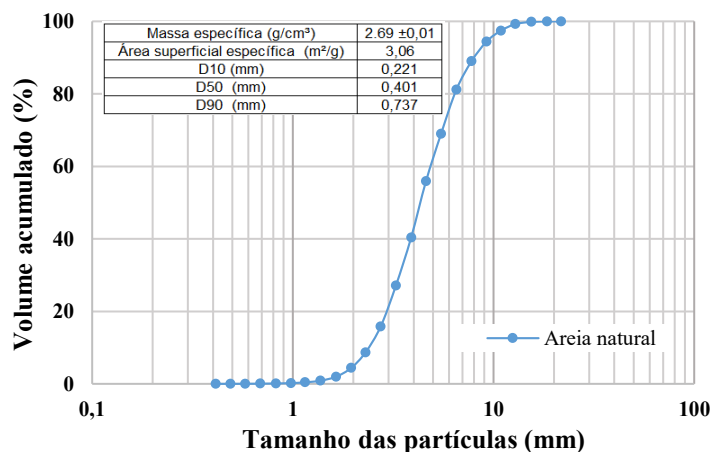
portlandita calculado foi de 1,15%. O pico 3 (758,4 °C) corresponde à descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3), com perda de massa de 5,02 mg. O teor de carbonato de cálcio calculado foi de 11,41%.

O filer calcário (Figura 8) apresentou um único pico entre 630 °C e 885 °C, relacionado à descarbonatação, com perda de massa de 43,38 mg. O teor de CaCO_3 calculado foi de 98,59%, atendendo ao requisito da ABNT NBR 16697:2018 para materiais carbonáticos (> 75%).

3.1.2 Areia natural

Na produção das argamassas, foi utilizada uma areia natural quartzosa adquirida comercialmente no município de Uberlândia – MG. A distribuição granulométrica da areia foi obtida pela técnica de análise dinâmica de imagem para determinar o tamanho das partículas, utilizando equipamento QicPic (Sympatec), sistema de dispersão a seco (Gradis) e massa da amostra de 329,15 g. A massa específica foi determinada por picnometria de gás Hélio (Micromeritics, Accpyc 1340) e área superficial específica pelo método BET. A distribuição granulométrica da areia está apresentada na Figura 9, juntamente com os valores de massa específica, área superficial específica e diâmetros característicos da areia.

Figura 9: Curva granulométrica areia natural



Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Caracterização dos aditivos químicos

Os aditivos superplastificantes utilizados no estudo foram caracterizados quanto ao pH,

teor de sólidos, massa específica, concentração de íons cloreto, conforme NBR 11768-3 (ABNT, 2019). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os dados de pH, massa específica e base química referentes aos aditivos incorporador de ar e plastificante e estabilizador foram obtidos junto ao fabricante. Os resultados da caracterização dos aditivos químicos estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Caracterização dos aditivos químicos segundo NBR 11768-3 (ABNT, 2019)

Aditivos	pH	Teor de sólidos (%)	Massa específica (g/cm³)	Cl⁻ (%)	Base química
A	8,19	95,08	1,26	0,028	Lignossulfonato
B	8,49	51,12	1,10	0,004	Policarboxilato
C	5,28	57,37	1,10	0,084	Policarboxilato
Incorporador de ar (IA)	10,5	-	1,05	-	Lauril éter sulfato de sódio
Plastificante e estabilizador (PE)	12,0	-	1,00	-	Breu saponificado

Fonte: Próprio autor.

O superplastificante A, em pó, é composto por lignossulfonato, e os aditivos B e C, ambos em forma líquida, têm como base o éter policarboxilato. Todos os superplastificantes apresentam teor de cloretos inferior a 0,15%, sendo, portanto, classificados como isentos de íons cloreto conforme estabelece a NBR 11768-1 (ABNT, 2019).

O incorporador de ar possui base de lauril éter sulfato de sódio, um tensoativo aniônico. Esse aditivo é eficaz na redução da tensão superficial da água, permitindo a incorporação de ar e conferindo fluidez à mistura cimentícia no estado fresco. O teor recomendado pelo fabricante é de 0,1% em relação à massa de cimento. O aditivo PE, definido pelo fabricante como plastificante estabilizador, tem como base química o breu saponificado, e exerce a função de incorporador de ar, sendo recomendado para uso em argamassas para revestimentos internos e externos, bem como para assentamento de alvenarias. A dosagem especificada pelo fabricante é de 0,2% em relação a massa de cimento.

Para identificar a composição química e os grupos funcionais dos aditivos foram realizados os ensaios de fluorescência de raios X (FRX), conforme a NBR ISO 12677 (ABNT,

2014) e espectroscopia de infravermelho por tomada de Fourier (FT-IR). A análise FRX foi realizada no equipamento Bruker modelo S8 Tiger. As amostras foram preparadas na forma de pastilhas prensadas, com massa entre 2 g e 8 g. A quantificação elementar foi realizada pelo método QuantExpress e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos aditivos químicos.

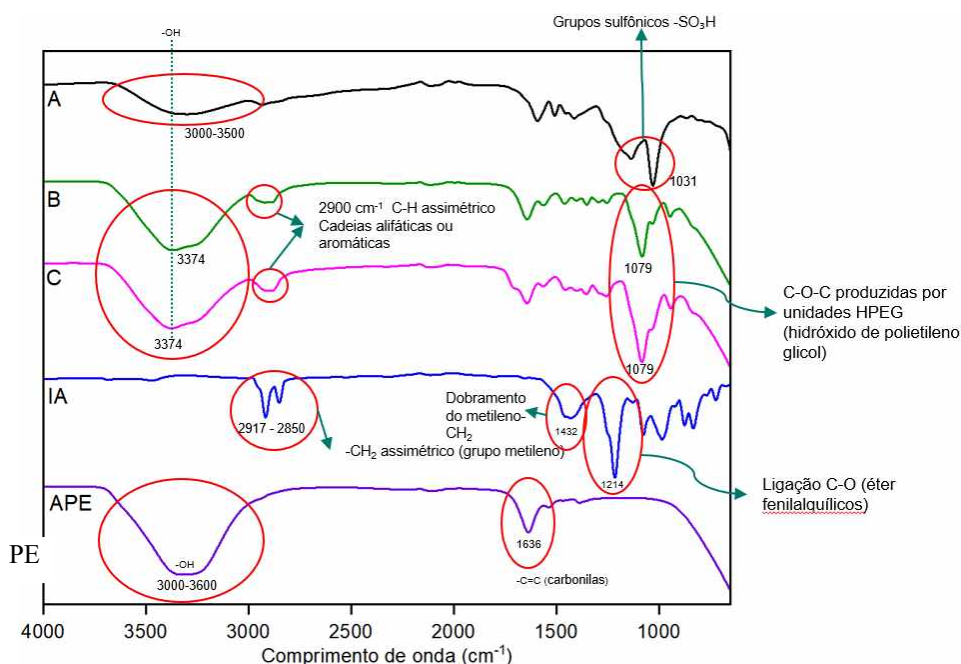
Elementos	Concentração (%)				
	A	B	C	IA	PE
CH ₂	99,10	97,20	99,60	96,90	99,60
Ca	0,02	-	-	1,41	-
S	0,54	0,02	0,02	0,76	-
Na	0,26	-	0,18	0,39	-
Mg	67 ppm	-	-	0,31	-
Si	0,02	-	-	0,22	90 ppm
P	-	2,76	0,18	79 ppm	-
Cl	0,01	-	0,05	-	45 ppm
K	82 ppm	67 ppm	-	-	0,41

Fonte: Próprio autor.

A elevada concentração de CH₂ presente nos aditivos analisados confirma sua natureza predominantemente orgânica.

A análise por FT-IR foi realizada no espectrômetro FT-IR Cary 630 da Agilent, com resolução de 4 cm⁻¹, utilizando um cristal de seleneto de zinco (ZnSe) e configurado para operar na faixa de comprimentos de onda entre 4000 e 650 cm⁻¹. A técnica foi utilizada em todos os aditivos químicos do programa experimental para caracterizar os compostos químicos presentes nos polímeros. A análise FT-IR foi realizada no Laboratório de Química de Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (Campus Pontal). A Figura 10 apresenta os espectros dos aditivos A, B, C, IA e PE.

Figura 10: Espectros FT-IR dos aditivos químicos.



Fonte: Próprio autor.

Como apresentado na Figura 10, o pico característico em 3374 cm^{-1} indica a ligação de -OH presente nos polímeros (A, B e C). A absorção em 2900 cm^{-1} é produzida pela vibração de estiramento assimétrico de C-H (SHA *et al.*, 2021), enquanto em 2105 cm^{-1} é observado uma absorção fraca de $\text{C}\equiv\text{C}$ (PAVIA *et al.*, 2015). Em 1450 e 1252 cm^{-1} as absorções correspondem à vibração de estiramento e de deformação das bandas características do -CH (SHA *et al.*, 2021). O pico em 1079 cm^{-1} é associado ao estiramento de C-O-C, geralmente produzidas por unidades HPEG em polímeros policarboxilatos (ZHANG *et al.*, 2019, ZHANG *et al.*, 2021). A vibração fora do plano aparece em 943 cm^{-1} (SHA *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2019).

O espectro do IA, apresenta picos característicos em 2917 e 2850 cm^{-1} correspondentes à vibração de estiramento assimétrico do grupo metileno -CH₂ e vibração de estiramento simétrico -CH₂, respectivamente (PAVIA *et al.*, 2015). Em 1432 cm^{-1} ocorre dobramento do metileno (CH₂). Os picos em 1214 e 1076 cm^{-1} indicam ligação simples de C-O presentes em éteres fenilalquílicos. Em 720 , 831 , 875 e 982 cm^{-1} ocorre o dobramento fora do plano de OH (SHA *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2019).

O espectro do PE apresenta pico característico em 3328 cm^{-1} que ocorre pela vibração de estiramento de O-H (ZHANG *et al.*, 2019; PAVIA *et al.*, 2015). A absorção em 1636 cm^{-1} indica ligação dupla insaturada -C=C (PAVIA *et al.*, 2015). Em 1394 cm^{-1} ocorre o dobramento do grupo metila CH₃ (PAVIA *et al.*, 2015).

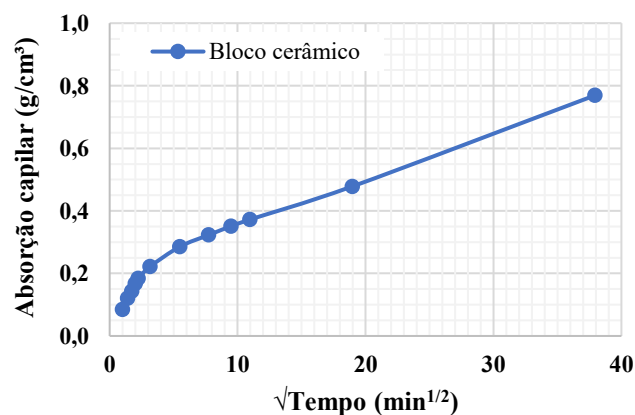
3.1.4 Bloco cerâmico

Os painéis utilizados para avaliação da aplicabilidade das argamassas foram construídos com blocos cerâmicos de dimensões 9 x 19 x 29 (cm), obtidos comercialmente na cidade de Uberlândia. Esses foram submetidos a ensaios de índice de absorção de água e capilaridade.

A determinação da absorção de água foi realizada conforme a NBR 15270-2 (ABNT, 2023), adotando-se seis corpos de prova. De acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2023) o índice de absorção de água especificado para blocos cerâmicos com oito furos deve estar entre 8% e 25%. O valor médio de índice de absorção de água foi de 21,14%.

O ensaio de capilaridade foi realizado conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram utilizados três blocos cerâmicos previamente secos em estufa a 105°C por 24 horas. Após a retirada dos corpos de prova da estufa, estes foram colocados em uma sala com temperatura e umidade controladas para que atingisse a temperatura ambiente. Os blocos foram colocados em um recipiente com uma lâmina de água de 20 mm. A fim de obter a absorção de água por capilaridade apenas pela face do bloco em contato com a água, as laterais foram impermeabilizadas com tinta acrílica a uma altura de 40 mm. Foi utilizado um suporte metálico para que os blocos não ficassem em contato com a base do recipiente, e para que ficassem submersos por no máximo 3 mm de lâmina de água. Foram executadas leituras nos tempos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 30, 60, 90 e 120 minutos, e após 6 e 24 horas. A Figura 11 apresenta a curva média de absorção de água por capilaridade dos blocos cerâmicos.

Figura 11: Curva média de absorção de água por capilaridade dos blocos cerâmicos.



Fonte: Próprio autor.

O coeficiente de capilaridade foi determinado a partir do coeficiente angular da reta de regressão, resultando em um valor de 0,0183 g/cm²·min^{1/2}.

3.2 Definição do teor de aditivo superplastificante

A determinação do teor de aditivo superplastificante foi realizada pelo ensaio de fluxo em cilíndrico concêntrico no reômetro (Thermo Scientific™ HAAKE™ MARST™), adotando-se dois ciclos de aceleração e desaceleração entre 0 e 100 s⁻¹ em um tempo de 21 s., no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Para esse ensaio, foram produzidas pastas com 100 g de cimento e relação água/cimento igual a 0,48. A mistura foi executada de forma manual por 30 s e, posteriormente, submetida a um agitador mecânico com velocidade de 10000 rpm durante 90 s. Após a mistura, foi realizado ensaios O ponto de saturação de cada aditivo coincide com o ponto de estabilização da tensão de escoamento. Os teores obtidos para os aditivos superplastificantes estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Teor de saturação de aditivo superplastificante.

Superplastificante	Teor de aditivo (%)
A	1,4
B	0,5
C	1,0

Fonte: Próprio autor.

3.3 Estudo em pasta

O objetivo desta etapa é avaliar o efeito do aditivo superplastificante na cinética de hidratação das misturas, e como ele reage na presença do fíler calcário, IA e PE por meio do ensaio de calorimetria isotérmica.

Foram avaliadas dezesseis pastas cimentícias, sendo: quatro sem a presença do aditivo superplastificante (C10, C40, IA, PE), e doze com a adição dos aditivos superplastificantes (A; B e C). O teor de aditivo superplastificante foi mantido constante para todas as misturas. As misturas com adição do superplastificante foram identificadas pela sigla do traço sem aditivo superplastificante seguida da letra correspondente ao aditivo utilizado. No Quadro 5, estão apresentados o quantitativo dos materiais para cada pasta estudada.

Quadro 5: Formulação das pastas utilizadas no ensaio de calorimetria isotérmica.

Pastas	Massa (g)							
	Cimento	Água	Filer calcário	IA	PE	A	B	C
C10	50	25	-	-	-	-	-	-
C10-A	50	25	-	-	-	0,7	-	-
C10-B	50	25	-	-	-	-	0,25	-
C10-C	50	25	-	-	-	-	-	0,5
PE	50	25	-	-	0,1	-	-	-
PE-A	50	25	-	-	0,1	0,7	-	-
PE-B	50	25	-	-	0,1	-	0,25	-
PE-C	50	25	-	-	0,1	-	-	0,5
IA	50	25	-	0,05	-	-	-	-
IA-A	50	25	-	0,05	-	0,7	-	-
IA-B	50	25	-	0,05	-	-	0,25	-
IA-C	50	25	-	0,05	-	-	-	0,5
C40	40	26	12	-	-	-	-	-
C40-A	40	26	12	-	-	0,73	-	-
C40-B	40	26	12	-	-	-	0,26	-
C40-C	40	26	12	-	-	-	-	0,52

Fonte: Próprio autor.

A pasta C10 (aproximadamente 10% de CaCO_3) foi preparada adotando-se 50 g de cimento e 25 g de água. Para as pastas com aditivo superplastificante (C10-A; C10-B; C10-C) foram adicionados utilizando os teores de: 1,4% para o aditivo A, 0,5% para o B e 1% para o C, todos calculados em relação à massa de cimento. Este teor de aditivo corresponde ao teor de saturação, conforme descrito na seção 3.2.

As pastas IA e PE seguiram as mesmas proporções de cimento e água da pasta C10, diferenciando-se apenas pela incorporação dos aditivos IA (0,1%) e PE (0,2%), e foram adicionados os superplastificantes A, B e C a elas. A mistura C40 (C10 + 30% de filer calcário) foi formulada substituindo 30% do volume de cimento por filer calcário e utilizou 40 g de cimento, 12 g de filer calcário e 26 g de água. O teor do aditivo foi adicionado em relação a massa de finos (cimento + filer calcário).

O ensaio de calorimetria isotérmica foi realizado no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

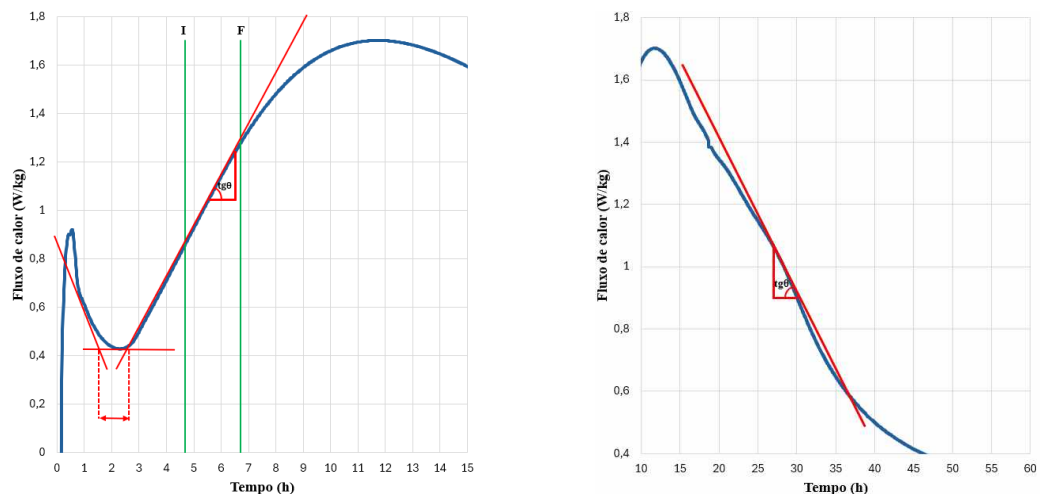
A cinética de hidratação das pastas foi avaliada por ensaios de calorimetria isotérmica. Segundo Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), a calorimetria isotérmica é ideal para a

análise de como os aditivos podem alterar a taxa de hidratação do material. O ensaio foi realizado em equipamento da marca CALMETRIX (modelo I-CAL 8000HPC), de oito canais.

Para a realização do ensaio de calorimetria isotérmica, os materiais foram armazenados em ambiente controlado a 23°C por duas horas antes da mistura, para minimizar a variação entre a temperatura dos materiais e do equipamento. A mistura seguiu as recomendações da ASTM C1679 (ASTM, 2017), tal como segue: (i) adição de água e aditivo em cinco segundos; e (ii) mistura manual com espátula por 45 segundos. O ensaio foi realizado a uma temperatura constante de 23°C durante 72 horas.

Para a avaliação dos dados, foram utilizados os critérios estabelecidos pela ASTM C1679-17 (ASTM, 2023) e a nota de aplicação da AN-C06 (CALMETRIX, 2015). O tempo de pega foi estimado dividindo a curva de aceleração em três partes: o primeiro terço corresponde ao tempo de início de pega, e o segundo terço ao tempo de fim de pega. O período de indução, taxa de aceleração e desaceleração da hidratação são calculados pelas retas tangentes à curva da cinética de hidratação. A Figura 12a apresenta uma representação esquemática da forma de obtenção dos tempos de início (I) e fim de pega (F) marcado pela intersecção das retas verticais com a curva de calor, assim como o período de indução e a taxa de aceleração de hidratação. A Figura 12b indica como a taxa de desaceleração da hidratação foi obtida.

Figura 12: Tempo de início e fim de pega do CPV.



(a) Período de indução, início e fim de pega e taxa de aceleração de hidratação. (b) Taxa de desaceleração da hidratação.

Fonte: Próprio autor.

3.4 Estudo em argamassa

A formulação das argamassas seguiu o mesmo princípio das pastas do estudo, com adição

do agregado miúdo (areia natural). Para as argamassas C10, IA e PE foi adotado o traço em massa 1:3,46:0,71 (cimento: areia: relação a/c). A mistura C40, resultou no traço em massa de 1:0,39:4,94:1,01 (cimento: filer calcário: areia: relação a/c). A Tabela 7 apresenta a composição das argamassas sem superplastificante.

Tabela 7: Composição das argamassas estudadas.

Materiais	Argamassas			
	C10	C40	PE	IA
Cimento (g)	560,56	394,80	560,56	560,56
Filer Calcário (g)	-	153,96	-	-
Areia (g)	1939,43	1951,25	1939,43	1939,43
a/c	0,71	1,01	0,71	0,71
Plastificante e estabilizador (g)	-	-	1,12	-
Incorporador de ar (g)	-	-	-	0,56

Fonte: Próprio autor.

As argamassas com os aditivos superplastificantes, A, B e C receberam a mesma nomenclatura definida para as pastas.

As argamassas foram preparadas e misturadas em laboratório a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade de $(60 \pm 5)\%$, utilizando uma argamassadeira Pavitest, modelo C3010, conforme as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016).

Para a mistura das argamassas, os materiais secos foram pré-homogeneizados. Os superplastificantes na forma líquida previamente diluídos em parte da água da mistura, enquanto o aditivo em pó foi misturado junto com os finos e a areia. A mistura foi realizada colocando todo o material anidro no misturador (2,5 kg), acionando o misturador por 30 s em velocidade baixa e adicionando nos primeiros 10 s aproximadamente 75% da água. Nesta etapa, os superplastificantes foram adicionados juntamente com a água. Posteriormente, a mistura prosseguiu por mais 60 s em alta velocidade, seguido pela retirada da pá e a raspagem do fundo e das laterais da cuba do misturador em um período de 90 s. Por fim, misturou-se por mais 30 s em velocidade baixa adicionando o restante da água.

3.4.1 Ensaios no estado fresco

O índice de consistência foi realizado para definição do teor de água das argamassas sendo mantido constante a 260 ± 5 mm, em conformidade com NBR 13276 (ABNT,

2016). Após a determinação da quantidade de água para cada argamassa, foi realizado o ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado, seguindo a NBR 13278 (ABNT, 2005). O procedimento consiste no preenchimento de um recipiente cilíndrico em três camadas, com vinte golpes aplicados em cada uma, seguido da pesagem do conjunto.

O ensaio de retenção de água foi realizado utilizando funil de Buchner acoplado a uma bomba de vácuo, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13277 (ABNT, 2005). Inicialmente, procedeu-se à pesagem do papel filtro previamente umedecido juntamente com o prato de suporte. Em seguida, o conjunto foi posicionado de modo a garantir a estanqueidade entre o funil e o prato. Após esse preparo, o prato foi preenchido com argamassa, e foi feito o adensamento com o auxílio de um soquete, aplicando-se 37 golpes. O excesso de material foi removido e o conjunto (prato, papel e argamassa) foi novamente pesado. Na sequência, o equipamento foi acionado, promovendo a sucção sob vácuo por um período de 15 min. Ao término desse intervalo, realizou-se a pesagem final do conjunto, permitindo a determinação da retenção de água da argamassa.

A classificação quanto a retenção de água das argamassas foi realizada conforme os critérios estabelecidos pela NBR 13281-1 (2023), que define quatro faixas de desempenho: U0, para retenção de água inferior a 70%; U1, entre 70% e 80%; U2, de 80% a 90%; e U3, para valores superiores a 90%.

3.4.2 Ensaio no estado endurecido

Para os ensaios no estado endurecido foram produzidos corpos de prova prismáticos em moldes metálicos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm (altura x largura x comprimento), conforme NBR 13279 (ABNT, 2005). O adensamento foi realizado em uma mesa de adensamento, aplicando-se duas camadas com trinta golpes por camada.

Após 24h de moldagem, as argamassas foram retiradas dos moldes e armazenadas em condições de laboratório com temperatura do ar de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5)\%$, por 48 h. Em seguida, foram imersos em uma solução de água saturada com cal por 28 dias. No Quadro 6 estão listados os ensaios realizados no estado endurecido.

Quadro 6: Ensaios realizados para avaliação das argamassas no estado endurecido.

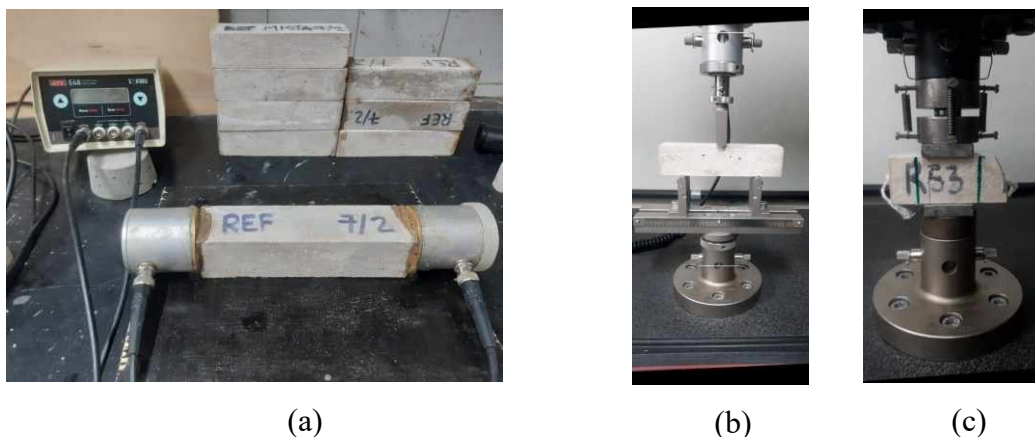
Propriedade	Métodos de ensaio
Resistência à tração na flexão e à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2009)
Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)

O módulo de elasticidade dinâmico foi medido utilizando o equipamento de ultrassom Controls, modelo 58E-48, com transdutores de 50 mm de diâmetro, frequência de 54 kHz e resolução de 0,01 μ s (Figura 13a). Um gel à base de água foi aplicado nas extremidades dos corpos de prova prismáticos para transmitir as ondas ultrassônicas entre os transdutores e o material.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram realizados utilizando a máquina de ensaios Instron, modelo 5982 (Figura 13b e Figura 13c). A máquina foi equipada com célula de carga de 5 kN para os ensaios de tração na flexão e de 100 kN para os ensaios de compressão. Para estes ensaios, foram utilizados os mesmos corpos de prova do módulo de elasticidade.

A absorção de água por capilaridade foi medida nos tempos de 10, 30, 60, 90, 120, 180 minutos e após 24 horas. Após 28 dias de cura, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 45°C até atingirem massa constante. Em seguida, as laterais foram vedadas com resina acrílica para assegurar um fluxo unidirecional de água durante o ensaio.

Figura 13: Módulo de elasticidade dinâmico (a); resistência à tração na flexão (b) e compressão (c).



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios no estado endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU).

3.5 Estudo da aplicabilidade das argamassas em painéis de blocos cerâmicos

A etapa de aplicação das argamassas nos painéis teve como objetivo principal avaliar a interação entre a argamassa e o substrato, além de identificar possíveis alterações nas propriedades das argamassas devido ao uso de diferentes aditivos superplastificantes nas composições estudadas.

O estudo foi realizado no ambiente externo do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Uberlândia (LabMAT-UFU). Ao todo, foram utilizados três painéis localizados no LabMAT-UFU, cada um com dimensões de 1,65 m x 2,64 m (altura x largura), conforme apresentado na Figura 14. Inicialmente, cada painel foi dividido em três partes iguais, medindo 1,65 m x 0,88 m cada.

Foram selecionadas para aplicação as argamassas com fíler calcário, tanto sem adição de aditivo superplastificante quanto com os aditivos A, B e C, para avaliar o efeito dessa substituição e o impacto dos superplastificantes na resistência de aderência do revestimento. Além dessas, também foram aplicadas argamassas contendo os incorporadores de ar (IA e PE) em formulações com e sem o aditivo B, totalizando oito traços avaliados. A escolha das combinações com o aditivo B foi devido ao comportamento de hidratação mais próximo ao observado nas amostras de referência.

Figura 14: Painel de bloco cerâmico.



Fonte: O autor.

3.5.1 Preparo, mistura e aplicação das argamassas

A mistura e a aplicação das argamassas foram realizadas por um oficial-pedreiro experiente. Os materiais anidros foram previamente pesados e homogeneizados e colocados em sacos plásticos para posterior preparo em betoneira. A produção das argamassas foi realizada em betoneira com capacidade de 250 litros, sendo utilizado 80,56 kg de materiais sólidos nas formulações com incorporadores de ar e 80,07 kg nas formulações com filer calcário.

A determinação da quantidade de água necessária para atingir a consistência adequada ficou sob responsabilidade do aplicador, com base na sua experiência prática.

Durante o processo de mistura, baldes contendo volumes conhecidos de água previamente pesados foram disponibilizados. O aplicador selecionou a quantidade desejada e, ao final do processo, era registrado o volume remanescente no balde, permitindo o cálculo da quantidade efetivamente utilizada. Após a homogeneização completa da argamassa, a mistura era transferida para um carrinho de mão para aplicação nos painéis. A aplicação da argamassa foi feita em camada única, com espessura aproximada de 40 mm, seguida pelo sarrafeamento e desempeno para a regularização da superfície conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15: Argamassas aplicadas nos painéis.



Fonte: O autor.

3.5.2 Ensaios das argamassas aplicadas nos painéis

À medida que a argamassa era misturada, retirada da betoneira e transferida ao carrinho de mão para aplicação, coletavam-se amostras para os ensaios no estado fresco. Também foram moldados corpos de prova prismáticos de dimensões 4 x 4 x 16 cm (altura x largura x comprimento) para ensaios no estado endurecido aos 28 dias. Os procedimentos de ensaios no

estado fresco e endurecido foram os mesmos adotados nas seções 3.4.2 e 3.4.3, conforme Quadro 7.

Quadro 7: Ensaios das argamassas aplicadas nos painéis.

Estado fresco	Índice de consistência	NBR 13276:2016
	Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13278:2005
Estado endurecido	Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2009)
	Absorção por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Revestimento	Resistência de aderência à tração	NBR 15258 (ABNT, 2021)

Os revestimentos aplicados foram ensaiados quanto a resistência de aderência à tração aos 28 dias. Para esta avaliação, inicialmente foram realizados furos circulares na argamassa aplicada, utilizando serra copo diamantada de 50 mm acoplada a uma furadeira. Em seguida, procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas de mesmo diâmetro sobre a superfície utilizando massa plástica. Para garantir o posicionamento adequado e estável das pastilhas durante o processo de cura da massa, foram empregados suportes com papel ondulado, que mantiveram o contato uniforme com o substrato até a secagem. Após o intervalo de uma hora da colagem, foi realizado o ensaio, conforme os procedimentos da ABNT NBR 15258:2021, utilizando equipamento de arrancamento equipado com manômetro digital devidamente calibrado, com capacidade máxima de 1500 kgf e resolução de 1 kgf (Figura 16b). O acionamento do equipamento foi feito por meio de manivela de forma constante.

Figura 16: Colagem das pastilhas metálicas (a); ensaio de resistência potencial de aderência à tração do revestimento (b); corpos de prova extraídos (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio autor.

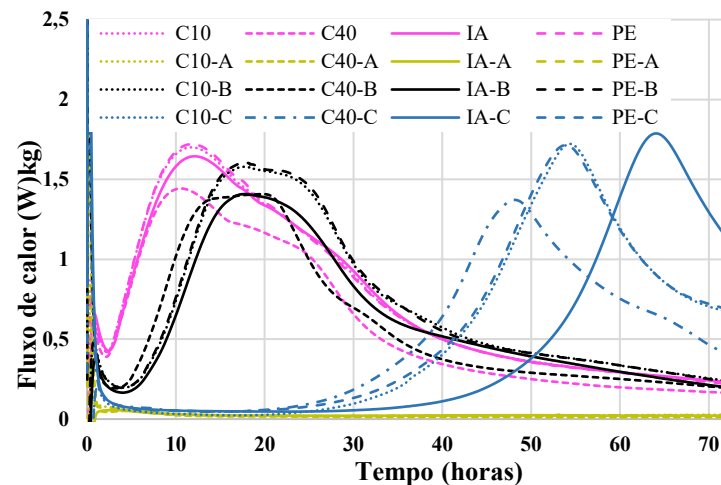
Para cada revestimento, foram extraídos doze corpos de prova. Ao término do ensaio, avaliou-se o local da ruptura (bloco ou junta de assentamento), tipo de ruptura apresentada e umidade do revestimento. Para o tratamento de dados, registrou-se a tensão de ruptura de cada ensaio de arrancamento e, em seguida, excluíram-se os corpos de prova cujo rompimento ocorreu na interface argamassa-pastilha por indicar problema de colagem e não representar a aderência do revestimento ao substrato. Com os resultados válidos, foi calculado a média e o desvio-padrão da amostragem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

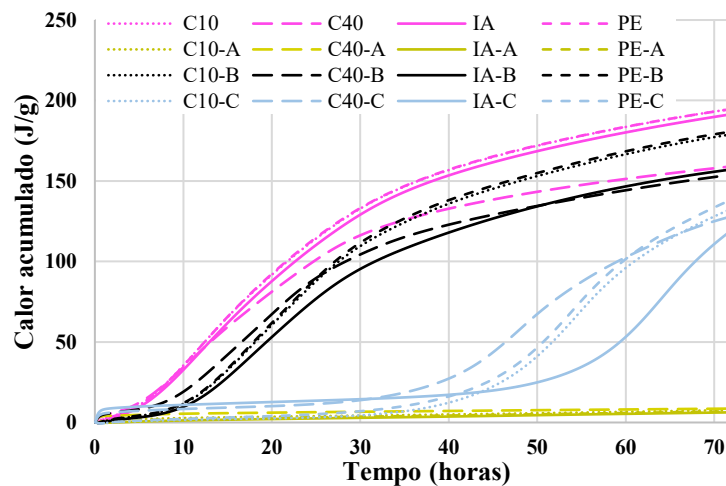
4.1 Estudo em pasta

Os efeitos dos superplastificantes na cinética de hidratação foram analisados pelas curvas de calorimetria isotérmica. As Figura 17a e Figura 17b apresentam, respectivamente, o fluxo de calor e o calor acumulado ao longo de 72 horas para todas as amostras analisadas. Para facilitar a interpretação gráfica, foram utilizadas cores padronizadas: a curva rosa representa as amostras sem aditivos superplastificantes; as amostras com aditivos, foram atribuídas cores específicas conforme o tipo de aditivo empregado, sendo amarelo para o aditivo A, preto para o aditivo B e azul para o aditivo C.

Figura 17: (a) Curvas de cinética de hidratação em função do tempo; (b) liberação de calor acumulado em função do tempo.



(a)



(b)

Observa-se que a presença dos aditivos superplastificantes nas pastas C10, C40, IA e PE provocou o deslocamento de todas as curvas para a direita devido ao aumento do período de indução e, conseqüentemente, o atraso no processo de hidratação do cimento.

O retardo acontece com mais intensidade nas pastas com o aditivo A (lignossulfonato) apresentados pelas curvas em amarelo. Nessas pastas, o período de dormência permaneceu durante as 72 horas do ensaio. Esse comportamento pode ser observado em aditivos à base de lignosulfatos devido aos açúcares naturais presentes na sua composição que podem afetar a hidratação do C_3S e C_3A e prolongar o tempo de pega da mistura (COLOMBO *et al.*, 2017a). Mullick (1996) destaca que, além dos açúcares não refinados presentes nos lignossulfonatos, a adsorção desses aditivos pode resultar na formação de uma película aquosa ao redor das partículas de cimento, o que pode restringir ou até mesmo inibir as reações de hidratação.

O retardo no tempo de pega dos aditivos éteres policarboxilato está associado a capacidade de adsorção dos polímeros na superfície das partículas de cimento (ZHANG *et al.*, 2019). Esta capacidade está relacionada a características estruturais do polímero, como menor tamanho, quantidade de cadeias laterais ou maior densidade molecular, favorecendo uma interação mais intensa com a superfície das partículas cimentícias (ALONSO; PALACIOS; PUERTAS, 2013; ROJAS; CINCOTTO, 2013). Cadeias laterais mais curtas aumentam ainda mais a adsorção do polímero sobre as partículas de cimento (WEN *et al.*, 2019; WINNEFELD *et al.*, 2007).

Zhang *et al.* (2019) avaliaram diferentes aditivos éteres policarboxilato em argamassas de cimento, variando a densidade e o tamanho das cadeias laterais. Por meio do método de depleção para quantificação da adsorção do superplastificante e de análises de calorimetria isotérmica, os autores demonstraram que a quantidade adsorvida de policarboxilato pode ser relacionada de forma aproximadamente linear ao atraso do pico de hidratação principal.

Resultado semelhante foi apresentado por Lu *et al.* (2022), que avaliou a compatibilidade de três superplastificantes éteres policarboxilato com diferentes estruturas de cadeias laterais em pastas de cimento Portland. Os autores observaram que cadeias laterais menores e maior densidade de carga favoreceram um maior retardo no processo de hidratação das pastas de cimento.

Sugere-se que o aditivo C, possua uma estrutura molecular com cadeias laterais mais curtas ou em menor quantidade. Essa característica favorece uma maior adsorção do aditivo sobre as partículas de cimento, resultando no prolongamento do período de indução observado nas curvas de calorimetria. Observações semelhantes foram relatadas na literatura (KONG *et al.*, 2016; RIBERO *et al.*, 2020; WINNEFELD *et al.*, 2007).

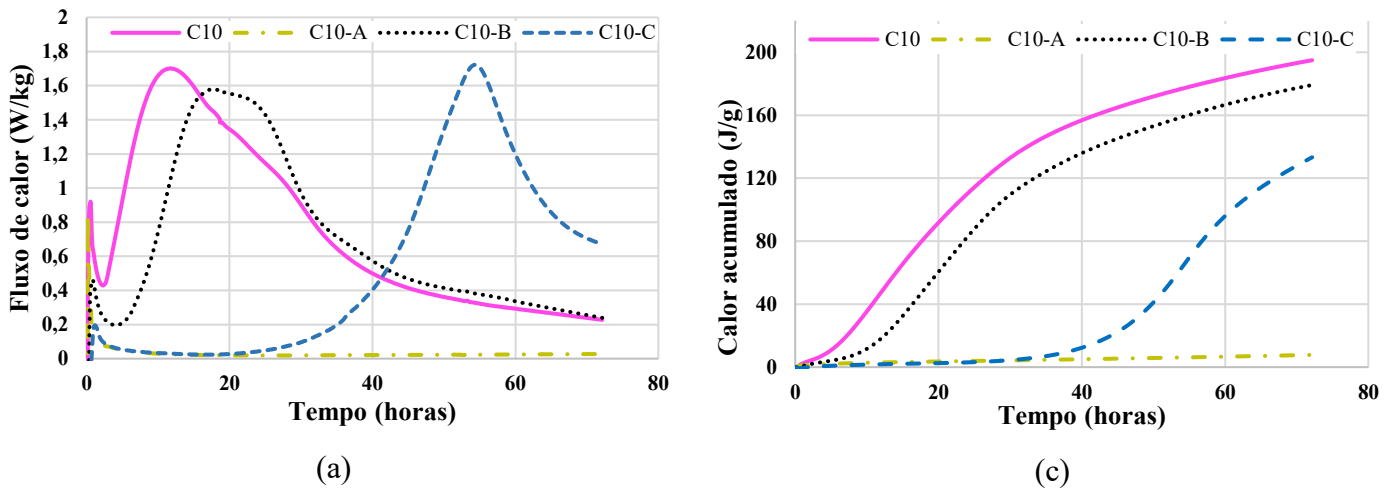
Apesar de ambos os aditivos B e C promoverem retardo no tempo de pega, o aditivo B resultou em pastas com comportamento mais próximo das misturas de referência, sem superplastificante. É provável que o aditivo B se diferencie do aditivo C por possuir cadeias laterais de maior comprimento ou em maior quantidade, o que pode explicar as diferenças observadas no desempenho.

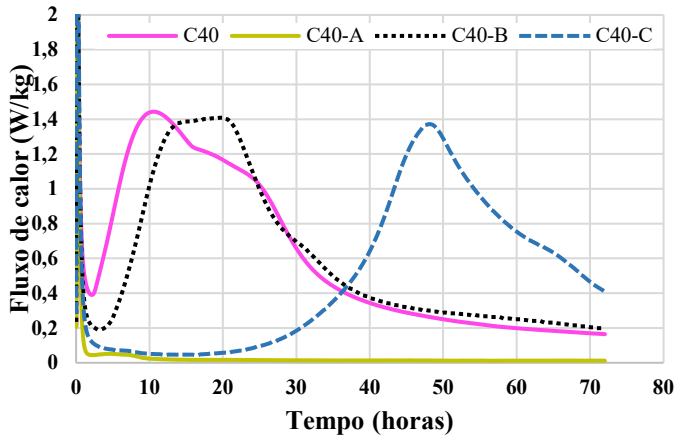
Nas seções seguintes, são apresentadas a análise e discussão dos dados de cinética de hidratação para as pastas i) C10 e C40 e ii) IA e PE, respectivamente.

4.1.1 Efeito dos superplastificantes nas matrizes C10 e C40

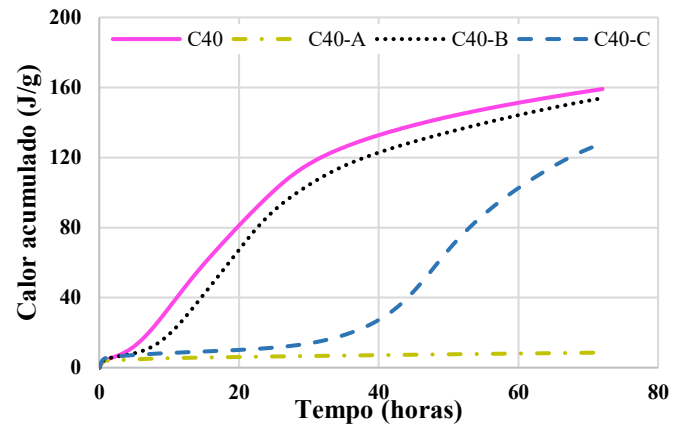
Na Figura 18 são apresentadas as curvas de fluxo de calor e calor acumulado para as pastas C10 e C40 sem e com o uso de aditivos superplastificantes. Além das curvas de cinética de hidratação, foram calculados os seguintes parâmetros calorimétricos: período de indução, tempo de início e fim de pega, taxa de aceleração e desaceleração e calor acumulado total (Quadro 8).

Figura 18: Curvas de fluxo de calor (a) e (b) e de calor acumulado (c) e (d) em função do tempo para as pastas C10 e C40.





(b)



(d)

Quadro 8: Parâmetros calculados do ensaio de calorimetria de indução isotérmica das pastas.

Amostra	Período de indução (h:min)	Tempo de início de pega (h:min)	Taxa de aceleração (mW/h)	Tempo de fim de pega (h:min)	Taxa de desaceleração (mW/h)	Calor acumulado total (J/g)
C10	00:53	04:58	0,220	07:21	0,056	194
C10-A*	-					8
C10-B	04:12	08:45	0,179	12:53	0,073	179
C10-C	35:34	35:36	0,121	44:57	0,079	133
C40	01:06	04:32	0,184	06:32	0,078	160
C40-A*	-					9
C40-B	03:51	06:56	0,173	09:48	0,070	154
C40-C	28:53	34:30	0,116	42:41	0,061	128

*Amostras permaneceram no período de dormência durante todo o período do ensaio, impossibilitando os cálculos dos parâmetros do ensaio de calorimetria de indução isotérmica.

A substituição de 30% do cimento por filer calcário (C40), apresentou diminuição do pico máximo de calor e menor calor acumulado. Esse comportamento é atribuído ao efeito de diluição: a reatividade diminui ao substituir parte do cimento, material reativo, por filer calcário, material predominantemente inerte.

Embora os tempos de início de pega tenham sido, em geral, mais longos, as pastas C40-B e C40-C indicaram que a presença de filer calcário contribuiu para redução do atraso em comparação às formulações C10-B e C10-C. Essas misturas apresentaram início de pega antecipado entre todas as avaliadas, sugerindo um efeito positivo do filer calcário em combinação com os superplastificantes.

Tanto a finura quanto o teor de substituição do filer podem afetar a hidratação de pastas e argamassas cimentícias. Segundo Wang *et al.* (2018), quando o filer calcário apresenta granulometria mais fina do que as partículas de cimento, ele preenche os vazios entre essas partículas e aumenta a densidade de empacotamento do sistema. Por outro lado, a utilização de altos teores de filer calcário reduz a fração de clínquer na mistura, diminuindo a quantidade de produtos de hidratação formados (WANG, DEHUI *et al.*, 2018). Esse comportamento pode ser

observado nas argamassas C40 (sem e com superplastificantes), que apresentaram picos máximos de hidratação inferiores aos observados para as pastas C10 (também sem e com superplastificantes).

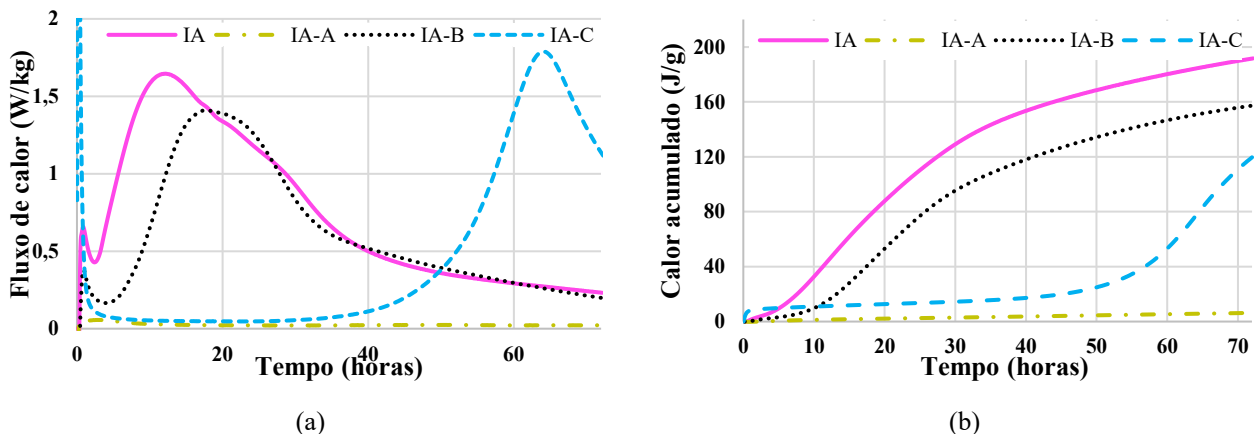
Os aditivos de éter policarboxilato (B e C) prolongaram o tempo de indução e retardaram o início de pega das pastas, sendo mais evidente nas pastas C10-C e C40-C. Esse comportamento é atribuído à adsorção dos aditivos sobre as partículas de cimento, formando uma camada em volta da partícula que dificulta o contato com a água e, conseqüentemente, retarda a dissolução dos compostos anidros, atrasando o início da formação dos produtos de hidratação nas idades iniciais (ROJAS; CINCOTTO, 2013; ZHANG *et al.*, 2019).

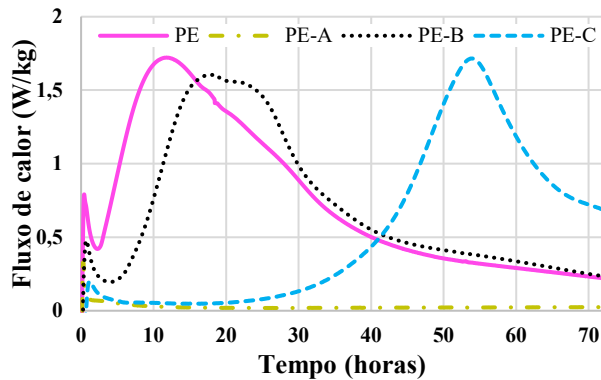
O aditivo A promoveu um retardo excessivo no tempo de pega das amostras, de modo que nenhum parâmetro calorimétrico pôde ser obtido durante as 72 horas de ensaio, por permanecerem no período de dormência. Embora não tenham sido realizados ensaios específicos de adsorção dos aditivos no cimento CP-V, acredita-se que o prolongamento do período de dormência à formação de uma película de água ao redor das partículas de cimento, a qual dificulta o desenvolvimento das reações de hidratação, como relatado por Mullick (1996).

4.1.2 Efeito sinérgico dos superplastificantes e incorporadores de ar

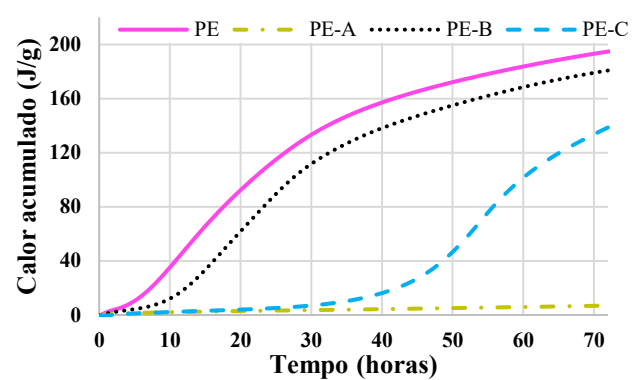
Na Figura 19 são apresentadas as curvas de fluxo de calor e calor acumulado para as pastas IA e PE sem e com o uso de aditivos superplastificantes e os parâmetros calorimétricos estão apresentados no Quadro 9.

Figura 19: Curvas de fluxo de calor (a) e (b) e de calor acumulado (c) e (d) em função do tempo para as pastas IA e PE.





(c)



(d)

Quadro 9: Parâmetros calculados do ensaio de calorimetria de indução isotérmica das pastas.

Amostra	Período de indução (h:min)	Tempo de início de pega (h:min)	Taxa de aceleração (mW/h)	Tempo de fim de pega (h:min)	Taxa de desaceleração (mW/h)	Calor acumulado total (J/g)
IA	00:49	05:35	0,180	08:44	0,041	191
IA-A*	-					6
IA-B	04:12	08:49	0,158	12:51	0,081	157
IA-C	48:43	54:29	0,133	58:57	0,078	220
PE	01:11	05:25	0,222	08:35	0,046	194
PE-A*	-					7
PE-B	04:09	08:42	0,179	13:10	0,052	180
PE-C	34:55	35:41	0,114	44:47	0,078	139

*Amostras permaneceram no período de dormência durante todo o período do ensaio, impossibilitando os cálculos dos parâmetros do ensaio de calorimetria de indução isotérmica.

As pastas sem aditivo superplastificante (IA e PE) apresentaram uma diferença de 22 minutos no período de indução, sendo este mais prolongado na amostra PE. Além disso, a aceleração dos produtos de hidratação ocorreu de forma mais rápida nesta mesma pasta (0,222 mW/h) em comparação à pasta IA (0,180 mW/h). Esse comportamento pode ser atribuído a uma dispersão mais eficiente das partículas de cimento, favorecendo a reação com a água. No entanto, o calor acumulado ao final de 72 horas foi semelhante entre as amostras (IA: 191 J/g; PE: 194 J/g), o que sugere um grau de hidratação equivalente ao término do ensaio.

Com a incorporação do aditivo B, observou-se um aumento no período de indução e um retardo no início de pega para ambas as pastas (IA-B: 08:49 h; PE-B: 08:42 h). A adição do aditivo C intensificou ainda mais esse efeito (IA-C: 48:43 h; PE-C: 34:55 h).

O adiamento do início de pega pode ser explicado pelo mesmo fato discutido na seção 4.1.1, relacionado à formação de uma camada de adsorção ao redor das partículas de cimento, dificultando seu contato com a água. Apesar disso, a pasta IA-C apresentou o maior valor de calor acumulado entre todas as amostras, sugerindo que, embora tenha apresentado o maior período de indução e início de pega tardio, ocorreu uma maior quantidade de reações de

hidratação ao longo do tempo, o que pode favorecer o desenvolvimento da resistência mecânica dos materiais.

A sinergia entre o incorporador de ar (IA) e os aditivos superplastificantes resultou em um aumento maior tanto do período de indução quanto do tempo de início de pega das pastas, quando comparado às pastas contendo o aditivo PE. Destaca-se a pasta IA-C, que apresentou início de pega 18 horas e 48 minutos após a PE-C.

Nas pastas PE-B e IA-B, observou-se que o período de indução e o tempo de início de pega apresentaram valores bastante próximos, indicando que ambos os sistemas foram influenciados de maneira semelhante na presença do superplastificante B em termos de cinética inicial de hidratação. Contudo, o calor acumulado total e a taxa de aceleração de hidratação foram maiores para a pasta PE-B, sugerindo que, embora o início das reações de hidratação tenha ocorrido de forma semelhante, o desenvolvimento e a extensão das reações ocorreram de maneiras distintas.

O aditivo A, assim como observado nas pastas C10-A e C40-A, as misturas permaneceram em período de dormência, impossibilitando a avaliação da sinergia entre os aditivos PE e IA em combinação com o superplastificante A. O fator de adsorção provavelmente foi responsável para o prolongado período de dormência das pastas.

4.2 Estudo das argamassas - laboratório

4.2.1 Propriedades no estado fresco.

Ao analisar o teor de água das argamassas C10 e C40, observa-se que ambas apresentaram reduções após a adição dos superplastificantes. A argamassa C40, que contém 30% de filer calcário, inicialmente demandou um teor de água superior (17%) em comparação à C10 (16%) para atingir a mesma consistência. O filer calcário, por apresentar maior área superficial e granulometria mais fina do que o próprio cimento, tende a demandar maior quantidade de água para atingir uma mesma fluidez (HAN *et al.*, 2025).

Tabela 8 apresenta o índice de consistência, o teor de água em função da massa total de sólidos, a densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas estudadas.

Ao analisar o teor de água das argamassas C10 e C40, observa-se que ambas

apresentaram reduções após a adição dos superplastificantes. A argamassa C40, que contém 30% de filer calcário, inicialmente demandou um teor de água superior (17%) em comparação à C10 (16%) para atingir a mesma consistência. O filer calcário, por apresentar maior área superficial e granulometria mais fina do que o próprio cimento, tende a demandar maior quantidade de água para atingir uma mesma fluidez (HAN *et al.*, 2025).

Tabela 8: Resultados de índice de consistência, teor de água em função da massa total de sólidos, densidade de massa e o teor de ar incorporado.

Amostra	Espalhamento (mm)	Teor de água (%)	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
C10	260 ± 4,62	16	2034	9
C10-A	259 ± 3,61	15	1909	15
C10-B	264 ± 3,06	15	2013	11
C10-C	258 ± 1,15	14	2017	12
C40	263 ± 1,53	17	2025	8
C40-A	265 ± 0,58	14	1904	16
C40-B	264 ± 1,15	15	2093	7
C40-C	259 ± 4,93	14	2137	5
IA	262 ± 1,15	16	1838	21
IA-A	264 ± 1,53	13	1681	27
IA-B	261 ± 0,58	13	1748	24
IA-C	261 ± 0,58	13	1622	30
PE	264 ± 1,73	16	1814	20
PE-A	260 ± 1,15	14	1723	20
PE-B	262 ± 0,58	14	1746	20
PE-C	259 ± 0,58	14	1837	13

A perda de fluidez com a adição de elevados teores de filer calcário foi relatada por Han *et al.* (2025), os quais investigaram o efeito de dois filer calcário, com diferentes finuras, sobre as propriedades reológicas de pastas de cimento Portland, avaliando teores de substituição variando de 10% a 40%. O estudo demonstrou que o filer de menor granulometria resultou em maior perda de fluidez à medida que o teor de cimento foi substituído por filer calcário, mantendo-se constante a relação a/c.

Para as argamassas C10, em relação à mistura sem superplastificante, os aditivos A e B

proporcionaram uma redução de 6,7% no teor de água, enquanto o aditivo C resultou em uma diminuição de 14,3%. Nas argamassas C40, as reduções foram de 21,4% com os aditivos A e C, e 13,3% com o B.

As reduções mais expressivas observadas nas argamassas C40 podem ser atribuídas à maior afinidade entre os aditivos e a matriz contendo filer calcário, quando comparada à argamassa composta apenas por cimento (C10). Montes *et al.* (2012) relataram em seu estudo que as partículas de filer calcário apresentam afinidade com superplastificantes à base de éter policarboxilato, porém, destacam que essa afinidade é maior no caso dos lignosulfonatos.

As argamassas IA e PE, apresentaram o mesmo teor de água. No entanto, observou-se o efeito sinérgico ao combinar os superplastificantes nas argamassas com o incorporador de ar (IA), resultando na maior redução do teor de água entre todas as amostras estudadas, no qual foram obtidos teores de 13%. Por outro lado, embora a combinação do PE com superplastificantes também tenha reduzido o teor de água, os valores foram menos expressivos em relação ao incorporador de ar. Isso sugere que o mecanismo do IA, baseado na redução da tensão superficial e formação de microbolhas potencializou os efeitos de dispersão dos aditivos superplastificantes. Essa sinergia possibilitou alcançar a mesma consistência desejada nas argamassas com menor teor de água.

O teor de ar incorporado se comportou de maneira distinta a depender da composição da argamassa. Observa-se nas argamassas C10 que houve aumento desse teor quando utilizados os superplastificantes, o mesmo ocorre na argamassa C40-A, em que esse parâmetro aumentou duas vezes em relação à C40. Por outro lado, para as argamassas com os aditivos B e C, o teor de ar foi reduzido de 8% para 7% (C40-B) e 5% (C40-C). A diminuição pode ser atribuída à capacidade de dispersão das partículas de cimento por parte dos aditivos superplastificantes e o preenchimento do filer nos vazios de ar disponíveis.

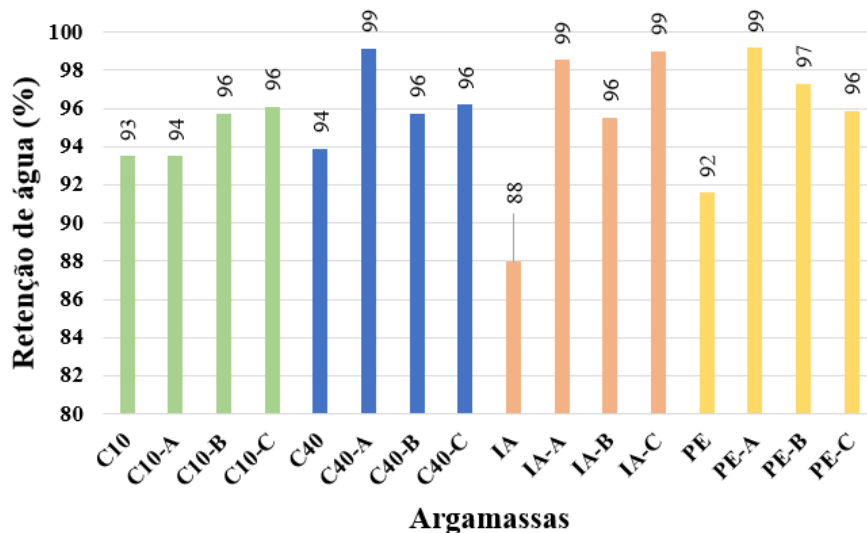
As argamassas IA e PE apresentaram comportamentos opostos quanto à adição de superplastificantes. No caso das argamassas com incorporador de ar (IA), a introdução dos superplastificantes promoveu um aumento no teor de ar incorporado em todas as formulações. Em contrapartida, as argamassas contendo o aditivo plastificante estabilizador (PE) mostraram redução do teor de ar incorporado após a adição dos superplastificantes, sugerindo que o efeito dispersante desses aditivos pode comprometer a estabilização das bolhas de ar promovida pelo PE.

O aumento do teor de ar incorporado nas argamassas com incorporador de ar após a adição dos superplastificantes pode ser atribuído à redução da viscosidade e à maior fluidez da mistura proporcionado pelo superplastificante, o que facilita o aprisionamento e a estabilidade

das bolhas de ar geradas durante a mistura (TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021). Segundo Aitcin *et al.* (2016) este aumento é favorável para a melhoria da trabalhabilidade do material. No entanto, é necessário analisar se a interação química do superplastificante com o incorporador de ar não alterou a estabilidade das bolhas na mistura (WANG, XIN *et al.*, 2019).

A Figura 20 apresenta os resultados de retenção de água das argamassas avaliadas. Com base nos resultados obtidos, observa-se que a adição de superplastificantes promoveu aumento na retenção de água para todas as argamassas. Este aumento é benéfico para a hidratação das partículas de cimento na matriz. Além disso, a maior retenção dificulta a sucção da água pelo substrato cerâmico durante a aplicação, o que resulta em melhor aderência da argamassa ao bloco e contribui para um desempenho superior do revestimento.

Figura 20: Retenção de água das argamassas.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Propriedades no estado endurecido

Os coeficientes de capilaridade das argamassas foram calculados a partir da reta de regressão das curvas de capilaridade e de acordo com a ISO 15148 (2002). A Figura 21 apresenta as curvas médias de absorção de água por capilaridade e Tabela 9 os coeficientes de capilaridade.

Figura 21: Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.

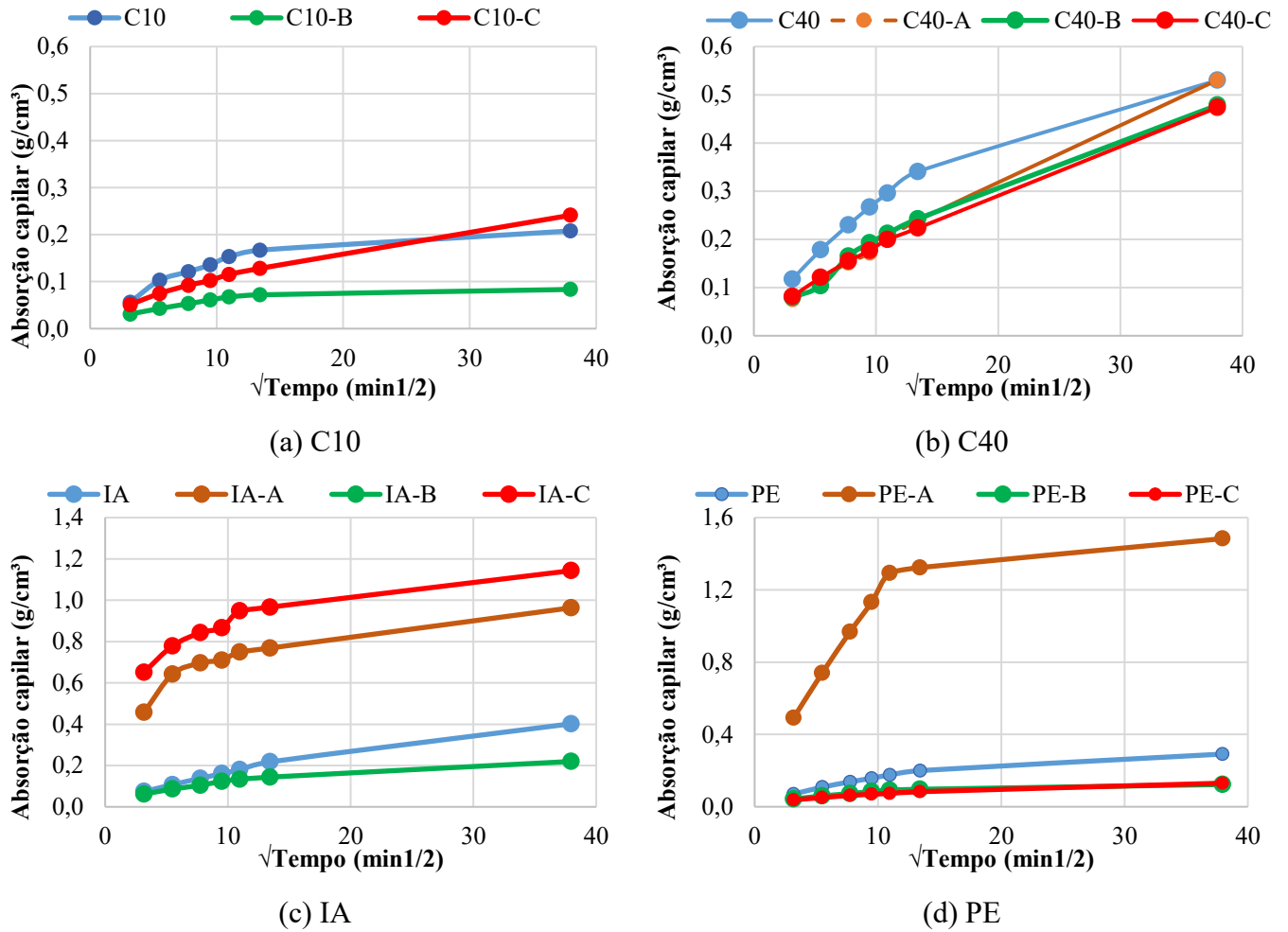


Tabela 9: Coeficiente de capilaridade (C) das argamassas aos 28 dias.

Argamassa	Coeficiente de capilaridade	
	Reta de regressão (g/cm ² .min ^{0,5})	ISO 15148 (kg m ⁻² s ^{-0,5})
C10	0,0035	14,2
C10-A	-	-
C10-B	0,0012	6,25
C10-C	0,0052	11,32
C40	0,0109	31,16
C40-A	0,0128	20,65
C40-B	0,0111	19,15
C40-C	0,0109	17,90
IA	0,0091	26,10
IA-A	0,0114	32,60

IA-B	0,0041	11,70
IA-C	0,0119	34,00
PE	0,0057	16,20
PE-A	0,0225	48,00
PE-B	0,0020	6,40
PE-C	0,0025	8,10

Fonte: Próprio autor.

As curvas de absorção de água por capilaridade e os coeficientes de absorção capilar mostram que o uso de aditivos superplastificantes reduziu a permeabilidade das argamassas C10 e C40, independente do aditivo utilizado. Porém, em combinação com os incorporadores de ar (IA e PE), observou-se um acréscimo com o uso dos lignossulfonatos e, com o uso do aditivo C, para a argamassa IA-C.

As argamassas do grupo C40 apresentaram valores coeficiente de absorção de água superiores aos do grupo C10. Esse comportamento indica que a substituição do cimento por filer calcário influenciou na formação de poros conectados na matriz. No entanto, a adição de superplastificantes reduziu a capacidade de absorção em relação à argamassa sem o aditivo. A adição dos superplastificantes a base de policarboxilatos B e C à argamassa C40 resultou em valores de capilaridade semelhantes.

Apesar das variações nos coeficientes de absorção capilar, foi possível identificar um padrão de comportamento para os aditivos A e B entre os diferentes grupos de argamassa. O aditivo A promoveu um aumento na absorção capilar, enquanto o aditivo B foi responsável por reduzir ou manter esse parâmetro. Isso sugere que o aditivo A favoreceu o aumento da conectividade dos poros na matriz, enquanto o aditivo B contribuiu para a sua redução.

A incorporação do superplastificante B promoveu redução da ascensão capilar nas argamassas C10-B, IA-B e PE-B, enquanto na C40-B a variação foi inferior a 2% em relação à C40. Esses resultados sugerem que o aditivo B atua modificando a microestrutura das argamassas, tornando os poros mais refinados e menos interligados, o que dificulta o transporte de água por capilaridade. Em contrapartida, o uso do aditivo A resultou em aumento da absorção capilar em todas as argamassas, indicando uma maior quantidade de poros interconectados na matriz.

O aditivo C apresentou efeitos distintos sobre a capilaridade, dependendo do traço avaliado. Nas argamassas C10-C e IA-C, observou-se um aumento da capilaridade, sugerindo maior formação de poros interconectados. Por outro lado, na argamassa PE-C, houve redução

desse parâmetro, indicando boa compatibilidade entre os aditivos e menor comunicação entre os poros. Para argamassa C40-C, o coeficiente de capilaridade foi semelhante ao da referência C40, sugerindo que o aditivo C não modifica os poros intercomunicados na presença do filer calcário.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade para todas as argamassas aos 28 dias.

Tabela 10: Propriedades mecânicas das argamassas aos 28 dias.

Argamassas estudadas	Resistência à Compressão (MPa)	CV (%)	Resistência à tração na flexão (MPa)	CV (%)	E (MPa)	CV (%)
C10	20,95 ± 2,28	11	5,42 ± 0,30	6	20788 ± 1719	8
C10-A	5,59 ± 0,71	13	4,51 ± 1,20	27	12255 ± 3029	25
C10-B	28,64 ± 2,70	9	10,49 ± 0,40	4	21334 ± 2010	9
C10-C	27,79 ± 2,28	8	8,51 ± 0,30	4	22841 ± 1143	5
C40	13,78 ± 1,65	12	4,04 ± 0,40	11	15064 ± 913	6
C40-A	1,91 ± 1,00	53	1,58 ± 0,20	5	2536 ± 224	9
C40-B	20,86 ± 2,67	13	7,66 ± 0,50	6	11895 ± 489	4
C40-C	21,04 ± 1,64	8	8,64 ± 0,40	11	10862 ± 1017	9
IA	9,51 ± 1,26	13	3,74 ± 0,20	7	9332 ± 481	5
IA-A*	-	-	-	-	-	-
IA-B	8,81 ± 1,43	16	7,01 ± 0,4	5	16092 ± 461	3
IA-C	15,99 ± 1,58	10	5,65 ± 0,6	11	13909 ± 744	5
PE	13,48 ± 2,91	22	5,42 ± 0,60	11	15067 ± 540	4
PE-A	6,42 ± 2,15	33	3,66 ± 1,20	28	11178 ± 386	3
PE-B	24,09 ± 6,36	26	10,06 ± 0,80	7	24828 ± 396	2
PE-C	5,59 ± 1,21	22	6,90 ± 0,40	7	17199 ± 429	2

* Os corpos de prova foram fraturados ao serem retirados dos moldes prismáticos, impossibilitando a realização dos ensaios.

Para avaliar o efeito dos superplastificantes, foi realizada a análise de variância (ANOVA) para cada grupo de argamassa (C10, C40, IA e PE) separadamente, considerando as variantes com e sem aditivo. A análise foi realizada para um intervalo de confiança de 95% e variância de 5%. Dessa forma, é possível identificar se a adição dos superplastificantes resultou em diferenças estatisticamente significativas nas propriedades mecânicas de cada sistema. A análise está apresentada na Tabela 11.

Observa-se que, para todos os grupos analisados (C10, C40, IA e PE), a introdução dos aditivos resultou em diferenças estatisticamente significativas nas propriedades avaliadas. Isso indica que a presença dos aditivos influenciou o desempenho mecânico das argamassas em todos os sistemas estudados, demonstrando o impacto dos diferentes tipos de aditivos sobre as propriedades mecânicas dos traços analisados.

Tabela 11: Análise de variância da influência dos aditivos superplastificantes nas propriedades mecânicas das argamassas estudadas.

Argamassa	Propriedade	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
C10	Rc	1708,81	3	569,60	133,13	3,19	S
	Rt	114,76	3	38,25	86,04	3,19	S
	E	342,62	3	114,21	27,78	3,19	S
C40	Rc	736,10	3	245,37	149,31	3,86	S
	Rt	93,07	3	31,02	550,3	3,86	S
	E	243,93	3	81,31	286,52	3,86	S
IA	Rc	87,11	2	43,55	28,08	3,80	S
	Rt	26,71	2	13,36	102,83	3,80	S
	E	114,82	2	57,41	182,15	3,80	S
PE	Rc	86,98	3	28,99	52,62	3,41	S
	Rt	114,82	2	57,41	182,15	3,80	S
	E	393,49	3	131,16	714,03	3,41	S

Legenda: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; S: significativo; NS: não significativo; Rc: resistência à compressão; Rt: resistência à tração na flexão; E: módulo de elasticidade.

4.2.2.1 Argamassas C10 e C40

As propriedades mecânicas das argamassas apresentaram valores inferiores para as argamassas C40 sem e com aditivos superplastificantes em relação às argamassas C10. Essa diminuição está relacionada ao efeito de diluição causado pelo elevado teor de substituição de

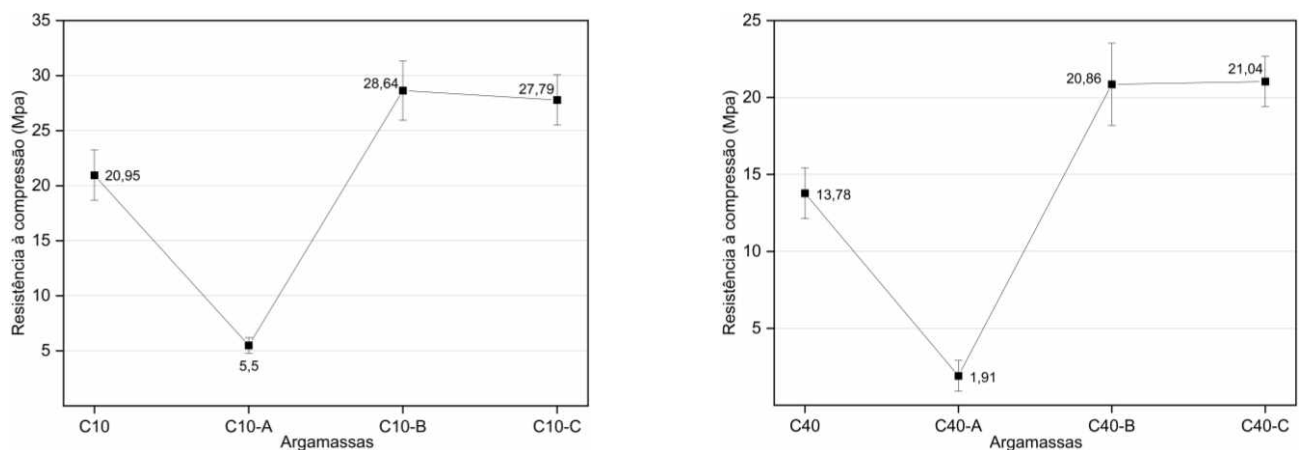
30% de filer calcário na matriz, que ao substituir o cimento reduz o volume de produtos hidratados (CYR *et al.*, 2005). A diminuição da reatividade do material e o menor teor de clínquer, reduz a quantidade de componentes de hidratação como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e consequentemente, afetam as propriedades mecânicas. Efeitos de diluição com elevados teores de filer calcário foram abordados na literatura (BRIKI *et al.*, 2021; COSTA ; CARDOSO; JOHN, 2017).

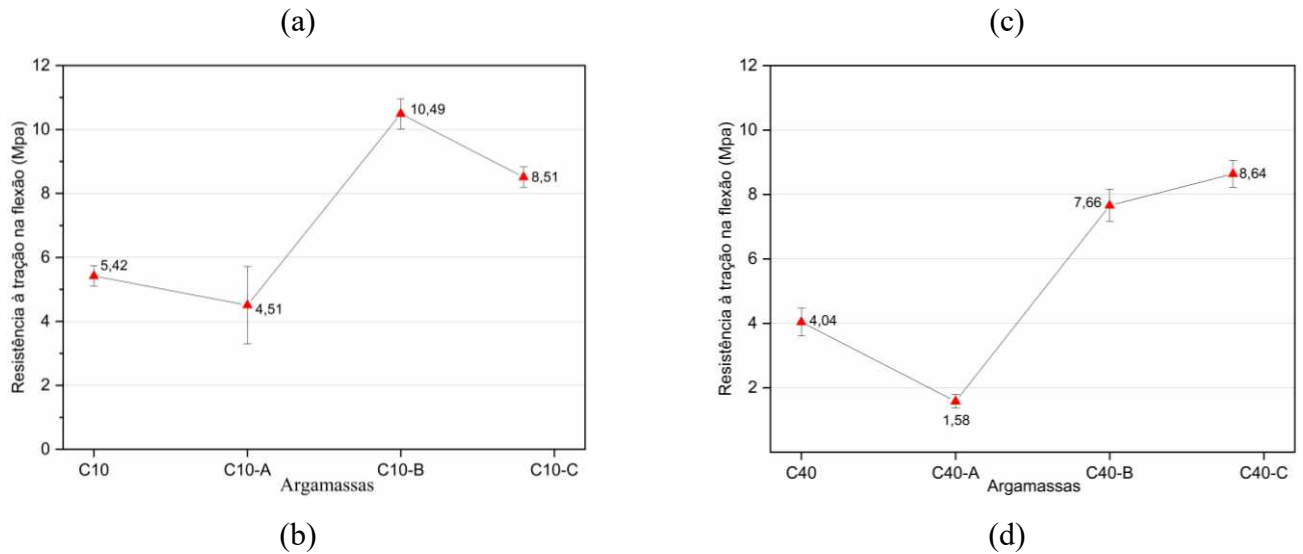
Dentro do mesmo grupo de argamassas (C10 e C40), observou-se aumento das propriedades mecânicas com os superplastificantes a bases de policarboxilatos, B e C. A resistência à compressão teve aumento de 37% (C10-B) e 33% (C10-C) em relação à C10; e de 51% (C40-B) e 53% (C40-C) em relação à C40. O mesmo aumento ocorreu na resistência à tração na flexão, com incrementos de 94% (C10-B) e 57 % (C10-C); 89% (C40-B) e 113% (C40-C) em relação as argamassas sem superplastificantes.

Esses aumentos para as argamassas com os aditivos B e C foram atribuídos a dois fatores principais, como: i) redução da relação a/c; ii) dispersão mais eficiente das partículas de cimento, favorecendo a reação com a água e contribuindo para a formação de produtos de hidratação.

Em contrapartida, mesmo com a redução do fator a/c, as argamassas contendo o aditivo A apresentaram valores inferiores em comparação às argamassas de referência (sem aditivos). Esse decréscimo no desempenho é atribuído ao efeito retardador promovido pelo aditivo A. Como resultado, mesmo aos 28 dias, as argamassas ainda apresentaram valores de resistência à compressão e tração na flexão inferiores, sugerindo que o sistema não foi capaz de compensar o atraso inicial na hidratação evidenciado nos resultados de calorimetria. A Figura 22 apresenta a resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas C10 e C40.

Figura 22: Resistência à compressão (a; c) e à tração na flexão (b; d) das argamassas C10 e C40.



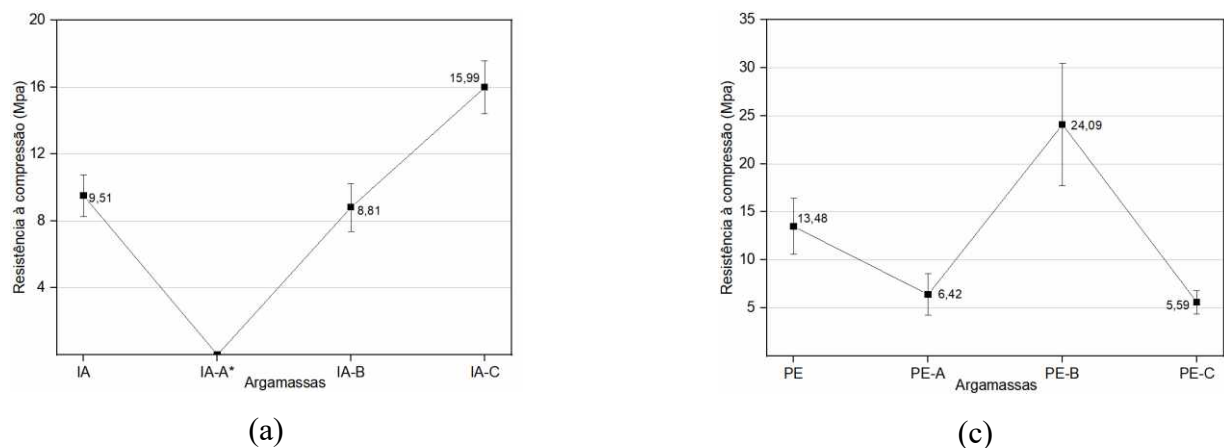


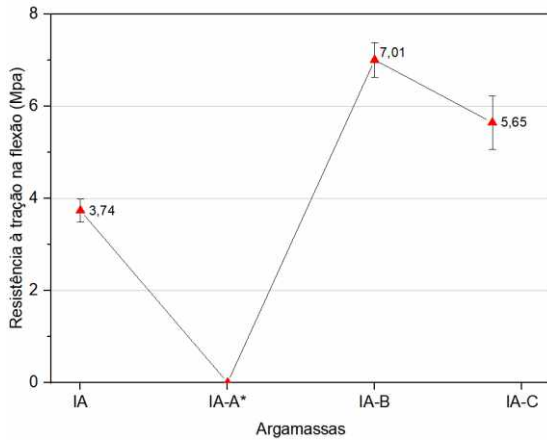
A incorporação de aditivos superplastificantes influenciou o módulo de elasticidade das argamassas. No traço C10, os aditivos B e C promoveram o aumento no módulo, enquanto o aditivo A resultou em uma redução de 59%. As argamassas contendo fíler calcário apresentaram redução no módulo de elasticidade em todos os traços quando incorporados os superplastificantes, destacando-se o traço FC30-A, que registrou uma queda de 83%.

4.2.2.2 Argamassas IA e PE

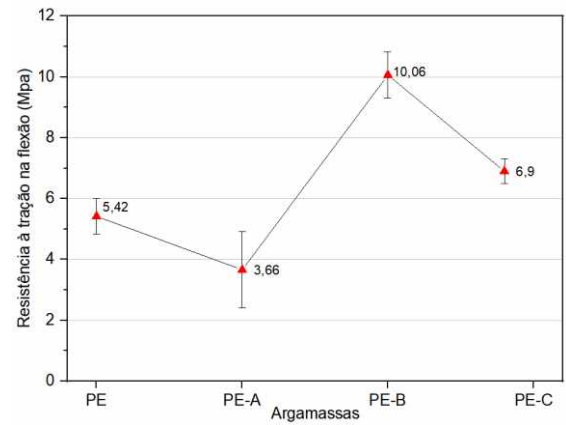
A análise dos resultados das propriedades mecânicas das argamassas IA e PE, após a adição dos superplastificantes, apresentou comportamentos distintos. A Figura 23 apresenta os gráficos de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas.

Figura 23: Resistência à compressão (a; c) e à tração na flexão (b; d) das argamassas IA e PE.





(b)



(d)

As argamassas IA e PE apresentaram resistência mecânica inferiores à argamassa C10, devido a incorporação de ar proporcionada pelos aditivos incorporadores de ar. A partir da Tabela 10 e Figura 23, observa-se que as argamassas com o dispersante A apresentaram propriedades mecânicas inferiores às demais, destacando-se a amostra IA-A, cujos dados não puderam ser obtidos devido ao fraturamento dos cinco corpos de prova durante a desmoldagem. Esse desempenho pode ser atribuído ao retardo no processo de hidratação, o que resultou em resistência insuficiente para a desmoldagem dos corpos de prova. Os resultados da calorimetria isotérmica indicaram que, durante as primeiras 72 horas, as pastas permaneceram no período de dormência, evidenciando um desenvolvimento limitado de resistência nesse período.

Esse comportamento indica que, além da natureza química do aditivo, as condições nas quais os corpos de prova foram submetidos em laboratório, não foram favoráveis para o desenvolvimento das propriedades mecânicas.

Nas argamassas IA, o aditivo B aumentou as resistências à tração na flexão e o módulo de elasticidade, enquanto a resistência à compressão permaneceu próxima ao valor da referência, com uma variação menor que 8%. Nas argamassas PE, o aditivo B elevou os valores de resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade em relação ao traço sem aditivo.

A incorporação do aditivo C resultou em aumento da resistência à compressão, resistência à tração na flexão e do módulo de elasticidade nas argamassas com incorporador de ar (IA). Nas argamassas com plastificante estabilizador (PE), o aditivo C reduziu a resistência à compressão, mas elevou os valores de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade em relação ao traço sem aditivo.

De forma geral, os dados mostram que o aditivo B resultou em aumento das propriedades mecânicas, exceto na resistência à compressão das argamassas IA, onde o valor ficou abaixo do traço de referência. O aditivo C também contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade e da resistência à tração na flexão, mas redução nos valores de resistência à compressão nas argamassas PE. Os resultados indicam que o aditivo B apresenta compatibilidade com as formulações estudadas, enquanto o aditivo C apresenta comportamento que varia conforme a composição da matriz e a presença dos demais aditivos, em especial no que se refere à resistência à compressão.

4.3 Estudo das argamassas aplicadas em painéis

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação prática das argamassas selecionadas em painéis de blocos cerâmicos, visando comparar o desempenho das formulações em condições de campo com os dados obtidos em laboratório.

Durante o processo de mistura e aplicação, foram monitorados o tempo de mistura e eventuais necessidades de ajuste, sendo, o único ajuste o aumento do tempo de mistura, a fim de garantir a aplicabilidade adequada das argamassas. A Tabela 12 apresenta os dados obtidos durante a mistura e aplicação das argamassas.

Tabela 12: Tempo de mistura para aplicação e sarrafeamento/desempenho dos revestimentos.

Argamassa	Tempo de mistura (min)			Tempo até o sarrafeamento/ desempenho (min)
	1ª aplicação	2ª aplicação	3ª aplicação	
C40	7	12	17	40
C40-A	8	13	18	55
C40-B	5	15	20	44
C40-C	5	11	22	35
PE	5	12	-	40
PE-B*	6	15	20	90
IA	5	16	-	64
IA-B*	6	13	18	46

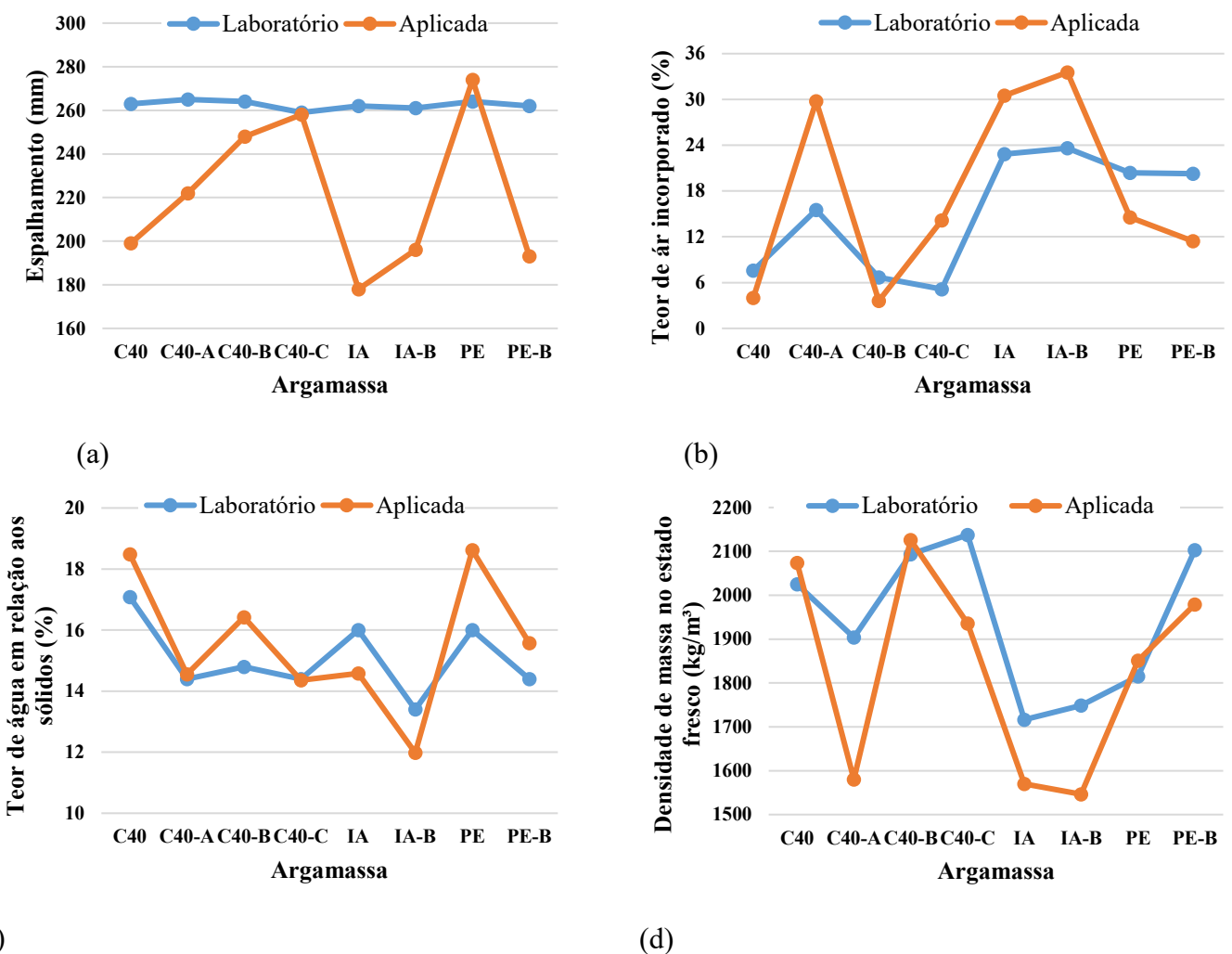
* Para essas argamassas, o tempo de mistura para primeira aplicação foi insuficiente para aplicação nos painéis; nesse caso foi necessário retornar a argamassa à betoneira sendo aplicada no tempo da segunda aplicação.

O tempo inicial de mistura e a primeira tentativa de aplicação variaram entre 5 e 8 minutos. A argamassa IA-B, mesmo após o ajuste do tempo de mistura, continuou apresentando dificuldades de aderência ao substrato durante todas as aplicações.

4.3.1 Estado fresco

A Figura 24 apresenta curvas de teor de água em relação aos sólidos, teor de ar incorporado, densidade de massa no estado fresco e espalhamento para as argamassas aplicadas e produzidas em laboratório.

Figura 24: Parâmetros obtidos das argamassas de laboratório e aplicadas em painéis.



Analisando as curvas de espalhamento da Figura 24a, com exceção da argamassa PE, que apresentou aumento no espalhamento após aplicação, todas as demais argamassas

demonstraram redução nessa propriedade quando avaliadas em campo. Essas diferenças são atribuídas principalmente à variação no método e tempo de mistura entre laboratório e campo que afetam diretamente a consistência da argamassa.

Ao comparar o teor de água em relação aos sólidos das argamassas produzidas em laboratório e aquelas aplicadas em campo, observa-se que as variações foram pequenas para os traços avaliados. A argamassa C40 apresentou teor de água de 17% no laboratório e 18% na aplicação, enquanto a C40-A manteve valores semelhantes próximos a 14%. Esses resultados indicam que o controle da quantidade de água durante o preparo em obra se manteve próximo ao estabelecido em laboratório.

O teor de ar incorporado e a densidade de massa se comportaram como grandezas inversamente proporcionais. Argamassas que apresentaram aumento no teor de ar incorporado após a aplicação mostraram redução em sua densidade de massa, enquanto aquelas em que o teor de ar diminuiu tiveram ganho de densidade.

4.3.2 Estado endurecido

A representação gráfica das curvas médias de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova das argamassas aplicadas em painéis está apresentada na Figura 25, e o coeficiente de capilaridade (C) na

Tabela 13.

Figura 25: Absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas aplicadas em painéis.

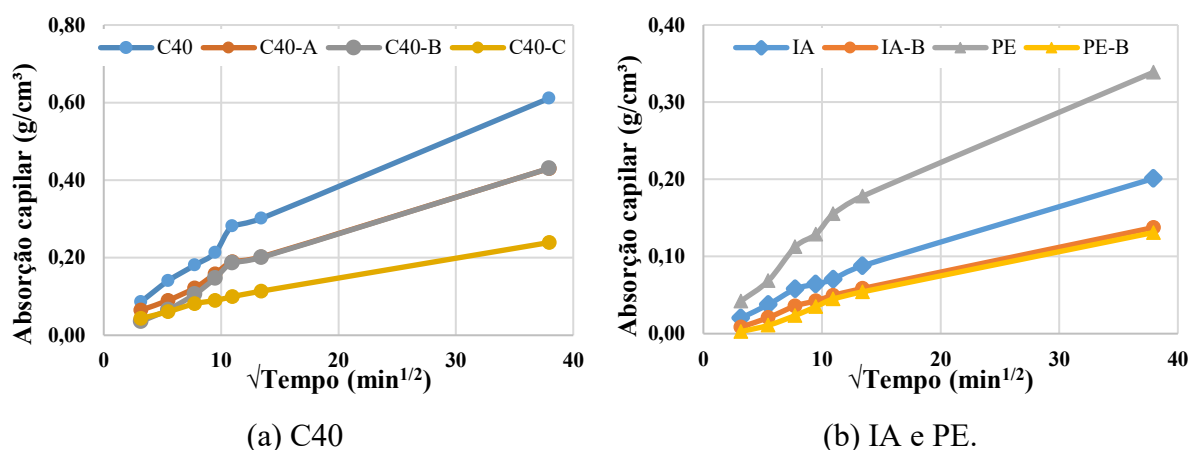


Tabela 13: Coeficiente de capilaridade (C) das argamassas aplicadas em painéis.

Argamassa	Reta de regressão (g/cm ² .min ^{0,5})	ISO 15148 (kg m ⁻² s ^{-0,5})
C40	0,0146	40,57
C40-A	0,0103	28,62
C40-B	0,0110	30,57
C40-C	0,0055	15,28
PE	0,0081	22,51
PE-B	0,0036	10,05
IA	0,0050	13,89
IA-B	0,0036	10,05

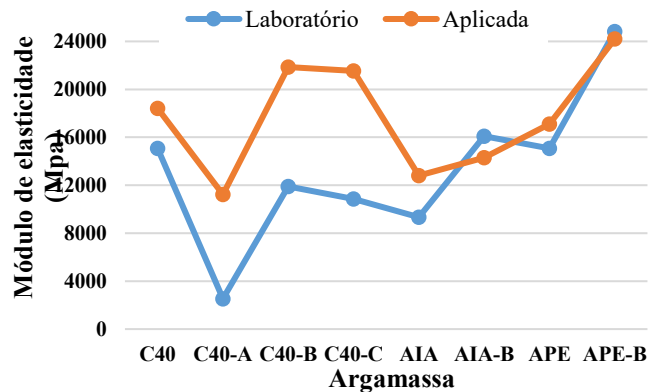
As argamassas C40 apresentaram redução dos coeficientes de capilaridade ao adicionar aditivos superplastificantes nas amostras aplicadas, em comparação às respectivas argamassas sem aditivo (C40). A redução mais evidente ocorreu para a argamassa C40-C (62%), indicando que o aditivo C contribuiu para redução dos canais capilares. Em laboratório, o coeficiente de capilaridade para essa amostra se manteve semelhante à sua referência sem aditivo superplastificante (C40). Os aditivos A e B se comportaram de maneiras distintas quando comparados os coeficientes em campo e em laboratório. Enquanto a adição dos superplastificantes nas argamassas laboratoriais apresentaram acréscimo do coeficiente de capilaridade, em campo esse parâmetro foi reduzido.

O aditivo B contribuiu, tanto em laboratório quanto em campo, para a redução da ascensão capilar para as argamassas C40, IA, PE. Isso pode indicar que o aditivo B contribuiu com a refinação dos poros, diminuindo a intercomunicação entre eles e dificultando o transporte por capilaridade. Além disso, indica que o aditivo B apresenta boa compatibilidade em sistemas com fíler calcário e os aditivos IA e PE.

4.3.2.1 Módulo de elasticidade

A Figura 26 apresenta o módulo de elasticidade para as argamassas preparadas em laboratório e as aplicadas nos painéis.

Figura 26: Módulo de elasticidade das argamassas.



O módulo de elasticidade está diretamente relacionado à qualidade e durabilidade do revestimento, pois determina a capacidade do sistema em absorver deformações sem apresentar danos (SILVA, NARCISO; CAMPITELI, 2008).

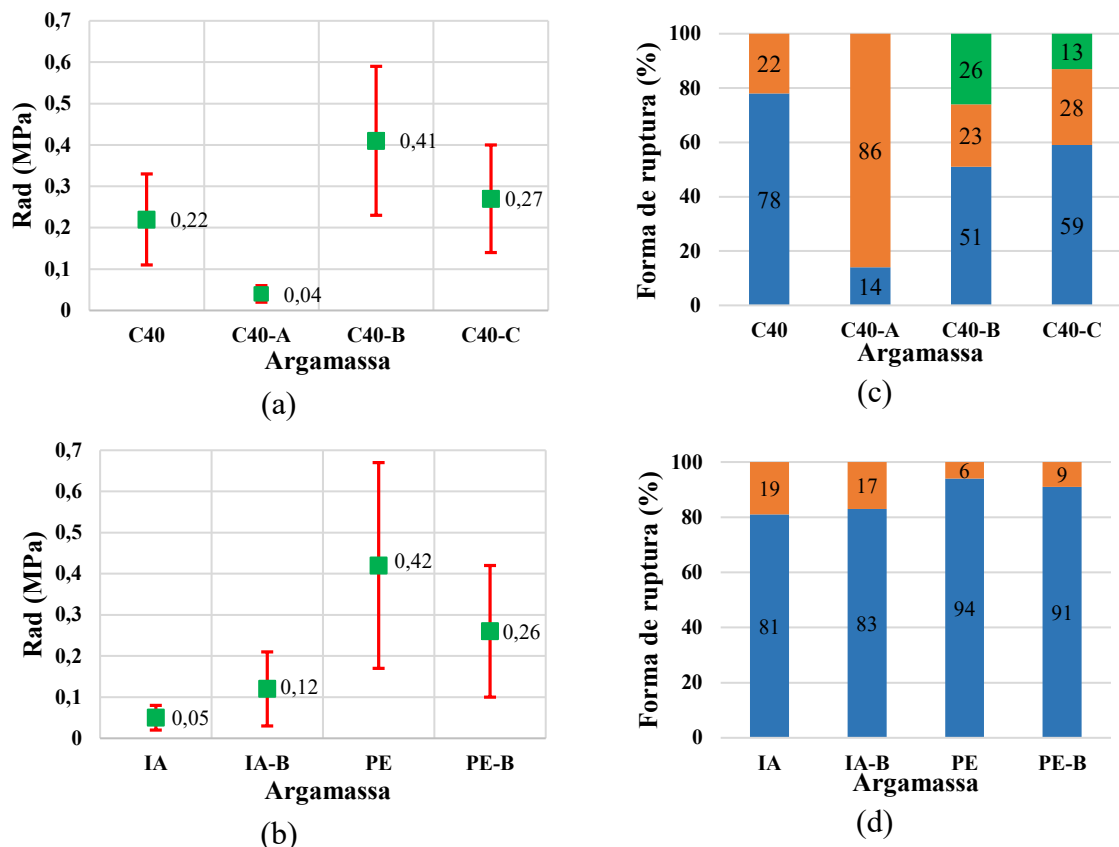
No entanto, valores elevados do módulo de elasticidade indicam maior rigidez da argamassa, o que pode favorecer o aparecimento de fissuras e, conseqüentemente, comprometer a durabilidade do revestimento (ROMANO *et al.*, 2018). Segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), argamassas com módulo de elasticidade superior a 14000 MPa não são recomendadas para uso em revestimentos, o que sugere que a substituição do cimento por filer calcário poderia ser aumentada.

4.3.2.2 Resistência de aderência à tração

A

Figura 27 apresenta os resultados médios de resistência de aderência à tração e os tipos de ruptura das argamassas aplicadas.

Figura 27: Resultados médios de resistência de aderência à tração e formas de ruptura das argamassas aplicadas (a) e (c) (C40); (b) e (d) IA e PE.



Fonte: Próprio autor.

De modo geral, observa-se que o uso dos superplastificantes B e C propiciaram um aumento da resistência de aderência à tração, o que pode ser atribuído ao aumento do contato interfacial argamassa-bloco cerâmico devido a dispersão das partículas finas (COSTA *et al*, 2017).

A adição do aditivo B apresentou ganhos de aderência para as argamassas C40-B e IA-B. Os resultados obtidos com o aditivo B podem ser explicados pela sua capacidade dispersante, evidenciada pela redução do teor de água em relação à referência e o ganho de consistência, permitindo que a argamassa seja aplicada de forma uniforme preenchendo todos os espaços no substrato. Além disso, a maior densidade, associada a menor quantidade de bolhas de ar (redução do teor de ar incorporado observado na argamassa), favoreceu a interface argamassa-substrato, proporcionando maior aderência.

As argamassas PE (0,42 MPa) e C40-B (0,41 MPa) apresentaram os maiores valores de aderência à tração, sendo as únicas que atenderam ao valor mínimo de 0,30 MPa estabelecido pela NBR 13281-1 (2023) para aplicação de como revestimento externo. As argamassas C40, C40-C e PE_B apresentaram valores superiores à 0,20 MPa, sendo satisfatórios para revestimentos internos.

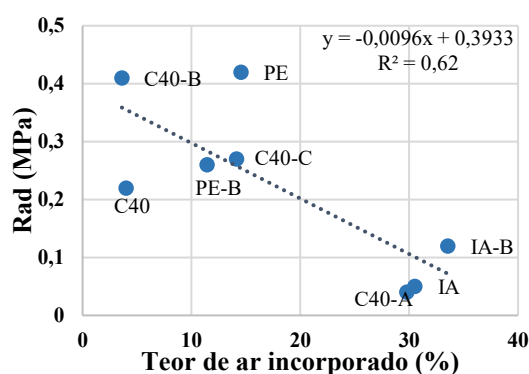
A redução da resistência de aderência observada na argamassa PE-B pode ser atribuída à sinergia entre o aditivo PE e o superplastificante B. Como destaca Bedard e Mailvaganam (2005), a combinação de superplastificantes com incorporadores de ar pode afetar a superfície específica das bolhas geradas por esses aditivos. Bolhas de ar maiores tendem a reduzir a área de contato da argamassa com o substrato.

Outro fator que pode ter contribuído para essa redução é a menor fluidez apresentada pela argamassa PE-B em comparação à PE. Essa menor consistência pode ter prejudicado o recobrimento dos poros e das rugosidades do bloco reduzindo a aderência do revestimento.

A resistência de aderência do revestimento está diretamente relacionada ao teor de ar incorporado nas argamassas. Carasek (2010) ressalta que é necessário cautela ao utilizar aditivos incorporadores de ar, pois teores superiores a 20% podem comprometer a aderência da argamassa ao substrato, uma vez que a presença excessiva de bolhas reduz a superfície efetiva de contato. Por outro lado, teores inferiores a esse limite podem ser benéficos, pois melhoram a molhabilidade da superfície do substrato e ampliam a extensão da ligação (CARASEK, 2010; VAZ *et al.*, 2019). O mesmo estudo indica ainda que, além do teor de ar incorporado, o tamanho das bolhas também exerce influência significativa sobre a resistência de aderência.

A Figura 28 apresenta a relação da resistência de aderência à tração e o teor de ar incorporado das argamassas aplicadas nos painéis.

Figura 28: Relação entre a resistência de aderência à tração (Rad) e o teor de ar incorporado das argamassas aplicadas em painéis.



Fonte: Próprio autor.

As argamassas com incorporador de ar apresentaram, em geral, os menores valores de aderência, o que pode estar diretamente associado à elevada incorporação de ar nas misturas (>20%). O traço IA, sem superplastificante, apresentou baixa aderência (0,05 MPa),

possivelmente devido ao elevado teor de ar incorporado e à menor densidade, reduzindo a resistência da interface com o substrato. Este fato é comprovado pela forma de ruptura da argamassa IA apresentada na

Figura 27d, no qual a ruptura predominante foi na interface substrato/argamassa (81%).

O mesmo pode ser atribuído à argamassa IA-B, que apresentou 83% da sua forma de ruptura no sub/arg. O ganho de aderência (0,07 MPa) pode ser atribuído a sinergia entre o incorporador de ar e o superplastificante B. Ainda assim, mesmo com a melhora proporcionada pelo aditivo B, a elevada incorporação de ar limitou a aderência dessa argamassa, mantendo-a abaixo dos requisitos normativos.

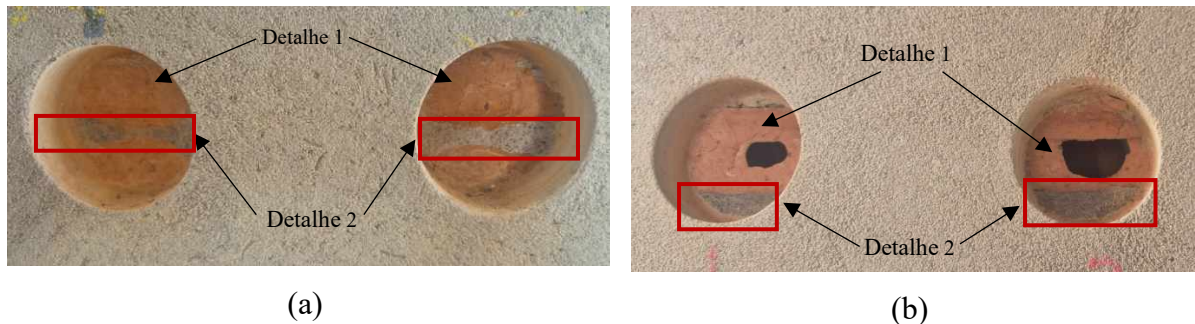
A utilização dos superplastificantes B e C promoveu ganho de aderência das argamassas com filer calcário, elevando a resistência de 0,22 MPa no traço de referência (C40) para 0,41 MPa em C40-B e 0,27 MPa em C40-C. Esses resultados correspondem a acréscimos de 86% e 23%, respectivamente. Por outro lado, a adição do aditivo superplastificante A, houve uma queda na média de resistência de aderência das argamassas de 82%. Embora o aditivo A tenha promovido maior fluidez à argamassa em comparação à C40, favorecendo o recobrimento da superfície do substrato, o elevado teor de ar incorporado foi suficiente para reduzir a resistência de aderência à tração.

Quanto a argamassa C40-C, apesar de apresentar desempenho inferior ao aditivo B (C40-B), houve um ganho de aderência em relação à C40, provavelmente devido à capacidade dispersante do aditivo, que proporcionou maior superfície de contato entre a argamassa e o substrato.

A análise da forma de ruptura das argamassas C40-B e C40-C (

Figura 27c), demonstra que houve ruptura parcial no substrato. Essa característica pode ser visualizada na Figura 29, em que o detalhe 1 evidencia a fratura do bloco cerâmico provocada pelo arrancamento do corpo de prova, enquanto o detalhe 2 mostra a permanência de parte da argamassa aderida ao bloco cerâmico após o ensaio. Esse comportamento indica que a aderência desenvolvida entre a argamassa e o bloco cerâmico superou a resistência do próprio substrato, de modo que a interface argamassa/bloco não representou o elo mais fraco do sistema. Destaca-se, ainda, que o detalhe 2 refere-se a uma rugosidade de aproximadamente 10 mm presente na superfície do bloco cerâmico, a qual foi completamente preenchida pela argamassa.

Figura 29: Aspectos da superfície de ruptura do revestimento após ensaio de aderência à tração (a) C40-B; (b) C40-C.

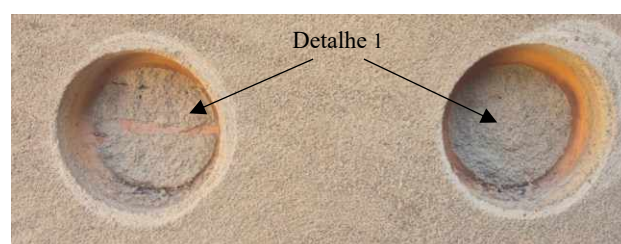


Fonte: Próprio autor.

As argamassas com lignossulfonatos (aditivo A) apresentaram valores de aderência inferiores às misturas de referência, sem aditivos. Tal comportamento pode ser associado ao efeito de retardamento da pega e a baixa resistência mecânica da argamassa. Este fato é comprovado pela forma de ruptura no qual foi observado durante os ensaios de resistência de aderência à tração (

Figura 27c). Para a argamassa C40-A, 86% da área rompida ocorreu na própria matriz da argamassa (Figura 30), enquanto apenas 14% foram atribuídas ao substrato. Esse comportamento e o baixo valor médio de aderência obtido para esse traço (0,04 MPa), indica resistência mecânica inferior da argamassa em relação ao substrato. Sugere que a resistência de aderência entre a argamassa e o substrato não é, necessariamente, limitada, uma vez que a ruptura ocorreu inicialmente na argamassa, evidenciando que este foi o elemento de menor resistência no sistema. O Detalhe 1 da Figura 30 evidencia a argamassa completamente aderida ao substrato, comportamento que predominou nos demais pontos de extração dos corpos de prova.

Figura 30: Aspectos da superfície de ruptura do revestimento C40-A após ensaio de aderência à tração.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos da adição de superplastificantes na aplicabilidade de argamassas de revestimento. Foram analisados o efeito de três superplastificantes (A – a base de lignossulfonatos; B e C – a base policarboxilatos) em quatro composições: C10, com 10% de fíler calcário; C40 - com substituição de 30% do volume de cimento por fíler calcário; IA, com uso de incorporador de ar a base de lauril sulfato de sódio; e PE, com incorporador de ar a base de breu saponificado, comercialmente disponível como com plastificante estabilizador.

No estudo em pasta, verificou-se que os superplastificantes exercem influência na cinética de hidratação, impactando tanto o período de indução quanto nos tempos de pega. De modo geral, o uso desses aditivos causou um retardo na hidratação, sendo esse superior à 72h para o aditivo a base de lignossulfonato utilizado. O superplastificante B apresentou menor retardo no tempo de pega, apresentando maior afinidade e compatibilidade com as composições avaliadas, seja na presença de fíler calcário, seja em combinação com o incorporador de ar (IA) e o plastificante estabilizador (PE). O retardo acentuado promovido pelo lignossulfonatos pode estar associado à presença de açúcares, enquanto as diferenças observadas entre os policarboxilatos (B e C) às diferenças na estrutura molecular, em particular ao tamanho e à densidade das cadeias laterais, conforme discutido na literatura.

O uso combinado de superplastificantes e incorporadores de ar (IA e PE) afetou significativamente a cinética de hidratação das pastas cimentícia, sendo o efeito mais pronunciado no incorporador a base de lauril éter sulfato de sódio (IA). A combinação do IA_C promoveu um retardo de pega mais acentuado em comparação ao PE_C. Por outro lado, o uso do aditivo B demonstrou comportamento semelhante nas misturas com IA e PE, indicando maior compatibilidade desse superplastificante com ambos os aditivos.

No estudo em argamassas, observou-se que os superplastificantes a base de policarboxilato (B e C) apresentaram desempenho superior ao lignossulfonato (A). Enquanto, os policarboxilatos promoveram redução no teor de água, melhor dispersão das partículas e, conseqüente melhoria das propriedades mecânicas comprometida pelo elevado teor de fíler calcário, o aditivo A teve seu efeito limitado pelo forte caráter retardador e incorporação de ar. Em combinação com os aditivos incorporadores de ar, observou-se que o uso do aditivo a base lauril sulfato de sódio (IA) propiciou maior incorporação de ar e fluidez das argamassas em comparação ao PE, a base de breu saponificado. Tal comportamento sugere que o superplastificante, em presença do aditivo PE, pode ter alterado a estrutura das bolhas de ar no

sistema, dificultando sua estabilização. Por outro lado, o aumento do ar incorporado nas misturas com IA foi atribuído à maior fluidez proporcionada pelo superplastificante, favorecendo tanto a incorporação quanto a estabilidade das bolhas de ar durante o processo de mistura. No que se refere às propriedades mecânicas, houve uma redução com uso combinado dos aditivos, porém observou-se que os superplastificantes à base de policarboxilatos (B e C) atenuaram a diminuição, incrementando o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à flexão.

Em relação à permeabilidade, avaliada pela absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, os policarboxilatos também se mostraram eficientes, reduzindo o coeficiente de capilaridade das argamassas em comparação às misturas sem aditivos. O aditivo B apresentou os menores valores, enquanto o comportamento do aditivo C mostrou-se dependente da formulação da argamassa, apresentando boa compatibilidade com as misturas C10; C40 e PE.

A aplicação das argamassas em painéis cerâmicos confirmou os dados do laboratório. Não foram detectados problemas de adesão inicial e escorrimento com o uso dos superplastificantes. Os superplastificantes reduziram o tempo de mistura, indicando ganhos potenciais de produtividade. Os policarboxilatos aumentaram significativamente a resistência de aderência à tração, com as formulações C40_B, C40_C e PE_B atendendo ou superando requisitos normativos para ambientes internos e externos. Embora o PE_B, tenha apresentado valor de aderência superior a 0,20 MPa, esse valor foi inferior ao da argamassa PE_0, sem o uso de policarboxilato, evidenciando a sinergia entre os aditivos.

No caso do policarboxilato B, observou-se um aumento na porcentagem de rupturas coesivas indicou que a interface argamassa-substrato se tornou mais resistente que os próprios materiais constituintes.

Os resultados mostraram que o uso de superplastificante em argamassas pode otimizar as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas, inclusive a aderência, compensando os efeitos da substituição do cimento. Entretanto, deve ser feita uma seleção criteriosa a fim de evitar retardo excessivo e problemas de incompatibilidade quando em combinação com outros aditivos presentes na formulação.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Apesar dos avanços obtidos neste trabalho, ainda permanecem lacunas importantes para o entendimento aprofundado do impacto dos aditivos superplastificantes em argamassas de revestimento, especialmente considerando diferentes composições e suas interações com

incorporadores de ar e fíler calcário. Recomenda-se, para pesquisas futuras:

- Analisar o efeito de diferentes teores do aditivo lignossulfonato utilizado nas propriedades das argamassas;
- Ampliar as tipologias de lignossulfonatos e incorporadores de ar utilizados;
- Realizar ensaios de termogravimetria para quantificação de compostos hidratados formados;
- Analisar formulações de argamassas com maiores proporções cimento: agregado e na presença de cal hidratada;
- Avaliar o comportamento reológico das argamassas a fim de avaliar a dispersão das partículas no sistema e a incorporação de ar.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 11768-1. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de janeiro, 2019.

ABNT NBR 11768-3. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de caracterização. Rio de janeiro, 2019.

ABNT NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de janeiro, 2016.

ABNT NBR 13278. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de janeiro, 2005.

ABNT NBR 13281-1. Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de janeiro, 2023.

ABNT NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de janeiro, 2005.

ABNT NBR 15270-1. Componentes cerâmicos — Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de janeiro, 2023.

ABNT NBR 15270-2. Componentes cerâmicos — Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de janeiro, 2023.

ABNT NBR 16541. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de janeiro, 2016.

ABNT NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de janeiro, 2017.

ABNT NBR 16697. Cimento Portland — Requisitos. Rio de janeiro, 2018.

ABNT NBR ISO 12677. Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF) — Método do corpo de prova fundido. Rio de janeiro, 2014.

ABNT NBR NM 18. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de janeiro, 2012.

AITCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert. **Science and Technology of Concrete Admixtures.** Civil and Structural Engineering. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. ii.

ALONSO, M. M.; PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 151–162, jan. 2013. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020

ANTUNES, Rubiane P. Nascimento; JOHN, Vanderley; PILEGGI, Rafael Giuliano.

Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por squeeze-flow. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 2005.**

ARAGÓN, Guillermo *et al.* Analysis of the static and dynamic elastic moduli of a one-coat rendering mortar with laboratory and in situ samples. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 1 jul. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02868

ARAGÓN, Guillermo *et al.* Physical and mechanical characterization of a commercial rendering mortar using destructive and non-destructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 835–849, 10 nov. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.034

BAHULAYAN, Asha; SANTHANAM, Manu. Hydration, phase assemblage and microstructure of cementitious blends with low-grade limestone. **Construction and Building Materials**, v. 438, 9 ago. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137044

BAPTISTA JUNIOR, Gercyr *et al.* Durability for coating mortars: Review of methodologies. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 657–671, 1 maio 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.020

BHANDARI, Ishan *et al.* A systematic study on sustainable low carbon cement – Superplasticizer interaction: Fresh, mechanical, microstructural and durability characteristics. **Helion**. Elsevier Ltd. 1 set. 2023 DOI: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19176

BREILLY, Damien *et al.* Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete. **Construction and Building Materials**. 27 set. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124065

BRIKI, Yosra *et al.* Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 147, 1 set. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106515

C260 (ASTM, 2001). Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete 1. . [S.l: s.n.], 2001. Disponível em: <www.astm.org>.

C494 (ASTM, 2005). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete 1, 2005. Disponível em: <www.astm.org>.

C1679-17 (ASTM, 2017). Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry, 2023

CALMETRIX AN-C06 (2015). Setting time estimation and prediction using isothermal calorimetry. **Application Note AN-C06**, 2015.

CARASEK, H. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. **Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, p. 863–904, 2007.

CASALI, Juliana Machado *et al.* Propriedades mecânicas das argamassas estabilizadas: evolução com a idade e o grau de hidratação. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 263–283, jul. 2020. DOI: doi.org/10.1590/s1678-86212020000300428

- CECEL, R. T. *et al.* Consumption of superplasticizer admixture for different cements and their binder efficiency. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 6, p. 1260–1287, dez. 2019. DOI: doi.org/10.1590/s1983-41952019000600003
- CHEN, Jian *et al.* Sulfonic gemini surfactants: Synthesis, properties and applications as novel air entraining agents for concrete. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 522, p. 593–600, 5 jun. 2017. DOI: doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.052
- COELHO, Vinícius Almeida; SILVA, Francisco Gabriel Santos. The influence of mesh reinforcement in mortar coatings exposed to cyclic thermal loads. **Engineering Structures**, v. 320, 1 dez. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118861
- COLOMBO, A. *et al.* On the effect of calcium lignosulfonate on the rheology and setting time of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 435–444, 1 out. 2017a.
- COLOMBO, A. *et al.* On the mechanisms of consumption of calcium lignosulfonate by cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 1–9, 1 ago. 2017b. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.026
- COSTA, E. B.C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Influence of high contents of limestone fines on rheological behaviour and bond strength of cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1114–1126, 15 dez. 2017. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.029
- COSTA, Eliane Betânia Carvalho; CARDOSO, Fábio Alonso; JOHN, Vanderley Moacyr. Efeito do teor e da dispersão de fino calcário na aderência substrato-matriz cimentícia. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 21–34, jun. 2016. DOI: doi.org/10.1590/s1678-86212016000200077
- CYR, Martin; LAWRENCE, Philippe; RINGOT, Erick. Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 719–730, abr. 2005. DOI: doi.org/10.1016/S0008-8846(04)00233-9
- DE AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez *et al.* Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**, v. 12, n. 9, 2019. DOI: doi.org/10.3390/ma12091449
- DE HITA, María Jimena; CRIADO, María. Influence of superplasticizers on the workability and mechanical development of binary and ternary blended cement and alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, v. 366, 22 fev. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130272
- DHANDAPANI, Yuvaraj; SANTHANAM, Manu; KALADHARAN, Gopakumar; RAMANATHAN, Sivakumar. Towards ternary binders involving limestone additions — A review. **Cement and Concrete Research**, 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396
- DI SALVO BARSI, Antonela *et al.* Carbonate rocks as fillers in blended cements: Physical and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 248, 10 jul. 2020. DOI:

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118697

DING, Bo; NG, Serina; OU, Zhihua. Effect of sulfate on the compatibility between polycarboxylate superplasticizer and cement-based materials with or without silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 405, p. 133256, nov. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133256

EN 934-2 (BS, 2012). Admixtures for concrete, mortar and grout Part 2: Concrete admixtures-Definitions, requirements, conformity, marking and labelling 2012.

FLATT, R.; SCHOBER, I. Superplasticizers and the rheology of concrete. **Understanding the Rheology of Concrete**, p. 144–208, 1 jan. 2012. Acesso em: 17 mar. 2025. DOI: doi.org/10.1533/9780857095282.2.144

FLORES-COLEN, I. *et al.* Drying index for in-service physical performance assessment of renders. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd. 1 jun. 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.034

GE, Haosheng *et al.* Influence and mechanism analysis of different types of water reducing agents on volume shrinkage of cement mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 82, 1 abr. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108204

GELARDI, G. *et al.* Chemistry of chemical admixtures. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Elsevier Inc., 2016a. p. 149–218. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6

GELARDI, G. *et al.* Chemistry of chemical admixtures. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Elsevier Inc., 2016b. p. 149–218. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6

HADDAD, Lucimar Dias de Oliveira *et al.* Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299–9314, 1 jul. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068

HALLAL, A. *et al.* Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 8, p. 1418–1423, ago. 2010. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.015

HAN, Fanghui *et al.* Effect of ultrafine limestone powder on the hydration heat and rheological properties of Portland cement paste. **Powder Technology**, v. 454, 31 mar. 2025. DOI: doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120717

HE, Yan *et al.* Effects of polycarboxylate superplasticisers with various functional groups on the pore structure of cement mortar. **Advances in Cement Research**, v. 32, n. 11, p. 510–518, 1 nov. 2020. DOI: doi.org/10.1680/jadcr.18.00239

HU, Yanyan; XIONG, Qian; HE, Tingshu. Influence of defoamer on mechanical performance and pore structure of steam-cured mortar containing polycarboxylate superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 425, 26 abr. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136118

INCE, C. *et al.* The influence of supplementary cementing materials on water retaining characteristics of hydrated lime and cement mortars in masonry construction. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 3, p. 493–501, 2014. DOI: doi.org/10.1617/s11527-013-0074-9

JANOWSKA-RENKAS, Elzbieta. The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1204–1210, 2013. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.032

KAPELUSZNA, Ewa; CHRABĄSZCZ, Katarzyna. Mutual compatibility of superplasticizers (PC, SNF), grinding aids (TEA, glycol) and C3A in Portland cement systems – Hydration, rheology, physical properties and air void characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 373, 10 abr. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130877

KONG, Fan Rong *et al.* Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 545–553, 15 fev. 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

KONTIĆ, Ana *et al.* Influence of air entrainers on the properties of hydrated lime mortars''. **Construction and Building Materials**, v. 403, 3 nov. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132968

KWAN, A. K.H.; MCKINLEY, M. Effects of limestone fines on water film thickness, paste film thickness and performance of mortar. **Powder Technology**, v. 261, p. 33–41, 2014. DOI: doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.027

ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, Beata. The methodology for assessing the impact of new generation superplasticizers on air content in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 488–502, 28 fev. 2014. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.092

LEI, Lei *et al.* Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 154, 1 abr. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106717

LEI, Lei; HIRATA, Tsuyoshi; PLANK, Johann. 40 years of PC superplasticizers - History, current state-of-the-art and an outlook. **Cement and Concrete Research**, v. 157, 1 jul. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106826

LI, Ran *et al.* Effectiveness of PC superplasticizers in calcined clay blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 141, 1 mar. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106334

LIU, J. *et al.* Recent advance of chemical admixtures in concrete. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. 1 out. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105834

LIU, Xiao *et al.* Performances and working mechanism of a novel polycarboxylate superplasticizer synthesized through changing molecular topological structure. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 504, p. 12–24, 15 out. 2017. DOI:

doi.org/10.1016/j.jcis.2017.05.025

LOTHENBACH, Barbara *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848–860, jun. 2008. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002

LU, Zichen *et al.* Influence of water to cement ratio on the compatibility of polycarboxylate superplasticizer with Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 341, 25 jul. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127846

MARCHETTI, Guillermina *et al.* Tools for designing the early-age properties of fly ash and limestone filler ternary systems. **Construction and Building Materials**, v. 347, 12 set. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128552

MARTINS, Letícia Matias *et al.* Behavior of cement-based coating mortars under fire or high temperatures: A systematic literature review. **Construction and Building Materials**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 13 set. 2024 DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137661

MULLICK, Ajoy Kumar. Use of lignin-based products in concrete. **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**, p. 352–429, 1 jan. 1996. DOI: doi.org/10.1016/B978-081551393-3.50010-7

NEHDI, Moncef; MINDESS, Sidney; ALTCIN, Pierre-Claude. OPTIMIZATION OF HIGH STRENGTH LESTONE FILLER CEMENT MORTARS. **Cement and Concrete Research**. 1996a. DOI: doi.org/10.1016/0008-8846(96)00071-3

NEHDI, Moncef; MINDESS, Sidney; ALTCIN, Pierre-Claude. OPTIMIZATION OF HIGH STRENGTH LESTONE FILLER CEMENT MORTARS. **Cement and Concrete Research**. 1996b. DOI: doi.org/10.1016/0008-8846(96)00071-3

OLIVEIRA, Alexandre Lima *et al.* Influência do uso de aditivo retentor de água à base de éter de celulose nas propriedades das argamassas de assentamento em alvenaria estrutural de blocos de concreto. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 57–69, set. 2015. DOI: doi.org/10.1590/s1678-86212015000300026

PAVIA, Donald L *et al.* Introdução à espectroscopia. Bellingham, Washington: [s.n.], 2015.

PULIDO-ARCAS, Jesús Alberto; FLORES-ALÉS, Vicente; PÉREZ-FARGALLO, Alexis. Coating mortars with improved physical properties, economic cost, and carbon footprint. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 1 jun. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01095

RIBERO, André Valmir Saugo *et al.* Performance evaluation of commercial superplasticizing additives based on polycarboxylate on the mechanical and microstructural properties of portland cement pastes. **Revista Materia**, v. 25, n. 4, p. 1–18, 2020.

ROJAS, Carolina Martínez; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland influence of polycarboxylate molecular structure on Portland cement hydration. **Ambiente Construído**, p. 267–283, jul. 2013. DOI: doi.org/10.1590/S1678-86212013000300016

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira; CINCOTTO, Maria Alba; PILEGGI, Rafael Giuliano. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 289–308, abr. 2018. DOI: doi.org/10.1590/s1678-86212018000200255

ŞAHİN, Hatice Gizem *et al.* Utilization of high-range water reducing admixture having air-entraining agents in cementitious systems. **Journal of Building Engineering**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 abr. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105565

SAMAD, S.; SHAH, A. Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 663–674, 1 dez. 2017. Acesso em: 16 mar. 2025. DOI: doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.07.003

SATHYAN, Dhanya; ANAND, Kalpathy Balakrishnan. Influence of superplasticizer family on the durability characteristics of fly ash incorporated cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 864–874, 20 abr. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.171

SCHIEFER, Christopher; PLANK, Johann. On the CO₂ footprint of polycarboxylate superplasticizers (PCs) and its impact on the eco balance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 409, 15 dez. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133944

SCHMID, Marlene; PLANK, Johann. Dispersing performance of different kinds of polycarboxylate (PC) superplasticizers in cement blended with a calcined clay. **Construction and Building Materials**, v. 258, 20 out. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119576

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis 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, 1 dez. 2018. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015

SHA, Shengnan *et al.* Effect of molecular structure of maleic anhydride, fumaric acid – Isopentenyl polyoxyethylene ether based polycarboxylate superplasticizer on its properties in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 308, 15 nov. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125143

SHA, Shengnan *et al.* Influence of the structures of polycarboxylate superplasticizer on its performance in cement-based materials-A review. **Construction and Building Materials**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 10 fev. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117257

SHAH, Hammad Ahmed; YUAN, Qiang; ZUO, Shenghao. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete-a review. **Construction and Building Materials**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 8 mar. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121835

SILVA ANDRADE NETO, José DA; SILVEIRA SILVA, Vanessa. Influência da sequência de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. **XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2017**. DOI:

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118986

SILVA, B. A. *et al.* Suitability of different surfactants as air-entraining admixtures for lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 256, 30 set. 2020.

SILVA, Narciso; CAMPITELI, Vicente. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. . [S.l: s.n.], 2008.

SOUZA, Alessandra; CARVALHAIS, Catharina; DOS SANTOS, White Jose. Analysis of chemical admixtures combination on coating mortar using Simplex network method. **Construction and Building Materials**, v. 239, 10 abr. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117796

STECHER, Johannes; PLANK, Johann. Adsorbed layer thickness of polycarboxylate and polyphosphate superplasticizers on polystyrene nanoparticles measured via dynamic light scattering. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 562, p. 204–212, 7 mar. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.jcis.2019.11.108

STOLZ, Carina M. *et al.* Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 298–307, 15 dez. 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.097

TIAN, Hongwei *et al.* Comparative study of two PC superplasticizers with varied charge density in Portland cement and sulfoaluminate cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 43–58, 1 jan. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.003

TUNSTALL, Lori E.; LEY, M. Tyler; SCHERER, George W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. **Cement and Concrete Research**, v. 150, 1 dez. 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106557

TUNSTALL, Lori E.; SCHERER, George W.; PRUD'HOMME, Robert K. Studying AEA interaction in cement systems using tensiometry. **Cement and Concrete Research**, v. 92, p. 29–36, 1 fev. 2017. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.005

VAZ, F. H.B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. *Cerâmica*, v. 65, n. 374, p. 303–318, 2019. DOI: doi.org/10.1590/0366-69132019653742508

VUK, T *et al.* The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement. . [S.l: s.n.], 2001. DOI: [doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00427-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00427-0)

WANG, Dehui *et al.* A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 30 ago. 2018. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075

WANG, Jian; YIN, Jianhao; KONG, Xiangming. Influences of PC superplasticizers with varied architectures on the formation and morphology of calcium hydroxide crystals. **Cement and Concrete Research**, v. 152, 1 fev. 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106670

WANG, Shunxiang *et al.* Effect of defoaming agent on the properties of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose through adjusting air content gradient. **Cement and Concrete Composites**, v. 139, p. 105024, 1 maio 2023. Disponível em: <DOI: [www-sciencedirect-com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0958946523000987](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105024)>. Acesso em: 27 abr. 2025. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105024

WANG, Xin *et al.* A modified foam drainage test protocol for assessing incompatibility of admixture combinations and stability of air structure in cementitious systems. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 174–184, 30 jun. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.142

WANG, Yanhai *et al.* Influences of admixture combinations on the formation and stability of air bubbles in fresh cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, v. 76, 1 out. 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107264

WANG, Yuming *et al.* What are the mechanisms of functional monomers' effect on air entrainment of polycarboxylate superplasticizers in cement paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 442, 6 set. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137038

WEN, Xiao dong *et al.* Effect of side-chain length in polycarboxylic superplasticizer on the early-age performance of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 26–32, 30 jun. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.124

WINNEFELD, Frank *et al.* Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 4, p. 251–262, abr. 2007. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.006

YANG, M; JENNINGS, H M. Influences of Mixing Methods on the Microstructure and Rheological Behavior of Cement Paste. 1995. DOI: [doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90027-6](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90027-6)

YAZIGI, Walid. *A técnica de edificar*, 2009.

ZHANG, L. *et al.* Retardation effect of PC superplasticizers with different architectures and their impacts on early strength of cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 1 nov. 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103369