



Efeito de aditivos superplastificantes em argamassas de revestimento mistas e com fíler calcário: da cinética de hidratação à aderência em substratos cerâmicos

Effect of superplasticizer admixtures on renderings mortars with cement-lime and limestone filler: from hydration kinetics to adhesion on ceramic bricks

Resumo

Este estudo investigou o efeito de diferentes tipos de superplastificantes nas propriedades de argamassas com elevados teores de substituição de cimento por cal hidratada e fíler calcário (> 30%). Foram avaliados três superplastificantes, um lignossulfonato (LS) e dois policarboxilatos (PCA e PCB). O teor de superplastificante foi determinado por reometria rotacional. Foram feitos ensaios em pastas para análise da cinética de hidratação; em argamassas para avaliação do teor de água, trabalhabilidade e desempenho mecânico; e em painéis para verificação da aplicabilidade das argamassas em bloco cerâmico, incluindo ensaios de aderência. O tipo de superplastificante é determinante para as propriedades e aplicação das argamassas. Os policarboxilatos promoveram melhor dispersão das partículas finas, produzindo uma matriz com maior resistência e menor permeabilidade. As argamassas com PCA apresentaram ganhos superiores a 85% na resistência de aderência à tração, atendendo os requisitos normativos para aplicação como revestimento externo (C40_PCA). No teor de saturação, o LS causou um retardo excessivo (> 72h) e maior incorporação de ar, comprometendo as propriedades mecânicas das argamassas e a aderência ao bloco cerâmico.

Palavras-chave: Argamassas. Revestimento. Aditivos dispersantes. Aderência. Cimento. Fíler calcário.

Abstract

This study investigated the effect of different types of superplasticizers on the properties of mortars with high levels of cement replacement (> 30%) by hydrated lime and limestone filler. Three superplasticizers were evaluated: one lignosulfonate (LS) and two polycarboxylates (PCA and PCB). The superplasticizer content was determined by rotational rheometry. Tests were performed on pastes to analyze hydration kinetics; on mortars to evaluate water content, workability, and mechanical performance; and on walls to verify the applicability of the mortars on ceramic blocks, including bond strength. The type of superplasticizer is crucial for the properties and applications of mortars. The polycarboxylates promoted better dispersion of fine particles, resulting in a matrix with higher strength and lower permeability. The mortars with PCA exhibited gains of over 85% in tensile bond strength, meeting the normative requirements for applications as an external rendering (C40_PCA). The LS saturation content caused excessive retardation (> 72h) and higher air entrainment, compromising the mechanical properties of the mortars and the bond to the ceramic blocks.

Keywords: Mortars. Rendering. Dispersing admixtures. Bond strength. Cement. Limestone filler.

¹Thiago Ranilson Caixeta
Silva

¹Universidade Federal de
Uberlândia
Uberlândia - MG - Brasil

²Pedro Cesar Rodrigues
Alves Abrão

²Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

³Marco Quattrone

³Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

⁴Eliane Betânia Carvalho
Costa

⁴Universidade Federal de
Uberlândia
Uberlândia - MG - Brasil
Corresponding author:
elianeбетания@ufu.br

⁵Vanderley Moacyr John

⁵Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 04/11/25
Revisado em 15/01/26
Aceito em 22/02/26

1 Introdução

As argamassas de revestimento, além de regularizar as imperfeições dos substratos, melhorar o desempenho térmico e acústico e servir como base para aplicação de acabamentos estéticos, desempenham um papel importante na durabilidade das edificações, protegendo as superfícies contra agentes externos (Pulido-Arcas; Flores-Alés; Pérez-Fargallo, 2022). Tradicionalmente, essas argamassas são constituídas por cimento, agregado miúdo, água e aditivos químicos. Nas argamassas mistas, a cal é incorporada para melhorar a plasticidade, a capacidade de retenção de água, a flexibilidade e a aderência ao substrato (Guimarães, 2002).

No Brasil, estima-se que 40% da produção de cimento é destinada a argamassas (Scrivener; John; Gartner, 2018; Reis *et al.*, 2021). Sabe-se que a indústria do cimento responde por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono. Nesse cenário, a substituição parcial do cimento por materiais com menor impacto configura-se como uma estratégia relevante. A cal hidratada, embora exija um processo de calcinação em sua produção, apresenta potencial de sequestro de CO₂ através de reações de carbonatação ao longo do ciclo de vida (Apostolopoulou; Bakolas; Kotsainas, 2021). O filer calcário destaca-se em relação a outras adições minerais devido à sua disponibilidade e baixo custo, além da pegada de carbono significativamente inferior à do cimento Portland. Suas emissões variam de 0,0006 a 0,007 kgCO₂/kg em comparação com 0,23 a 0,99 kgCO₂/kg do cimento (SIDAC, 2025).

O calcário possui menor dureza em relação ao clínquer, desta forma durante a moagem concomitante, irá apresentar granulometria mais fina (Tsivilis; Voglis; Photou, 1999; Hooton; Nokken; Thomas, 2007). Do ponto de vista técnico, a substituição de cimento por filer calcário em teores de até 5% geralmente melhora as propriedades mecânicas, enquanto teores superiores a 20% tendem a reduzir a resistência de matrizes cimentícias devido ao efeito de diluição (Briki *et al.*, 2021). Este efeito é mais pronunciado na presença de partículas com menor área superficial. Partículas mais finas, além de contribuírem para o empacotamento de partículas, atuam como agentes de nucleação, intensificando a hidratação da alita e a formação de compostos hidratados, o que consequentemente reduz a porosidade do sistema.

A substituição do cimento por partículas finas exige aumento da relação água/materiais finos para manter a trabalhabilidade, o que pode prejudicar a resistência mecânica, a hidratação inicial e aumentar a fissuração por retração. O uso de aditivos superplastificantes é uma prática consolidada na tecnologia do concreto, sendo empregado para reduzir o teor de água sem comprometer a trabalhabilidade, o que resulta em maior resistência. Existem diferentes classes de aditivos: lignossulfonatos (LS), sulfonados de melamina (SMF) e de naftaleno (SNF), que atuam principalmente por repulsão eletrostática, e os policarboxilatos (PCE), que atuam por impedimento estérico (Aitcin; Flatt, 2016; Lei; Hirata; Plank, 2022). Cada tipo de aditivo apresenta desafios específicos: os PCE podem causar excessiva incorporação de ar e retardar a pega, enquanto os LS, por conterem açúcares naturais, têm efeito retardante na hidratação (Aitcin; Flatt, 2016).

Aitcin e Flatt (2016) destacam que os superplastificantes exercem papel fundamental na formulação de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental, ao possibilitar o uso de elevados teores de substituição de cimento por adições minerais sem comprometer seu desempenho. Porém, a interação entre o superplastificante e as partículas de cimento pode ser influenciada pelo uso combinado com outros ligantes e/ou adições minerais (Mikanovic; Jolicouer, 2008; Fernández *et al.*, 2013; Burgos-Montes; Alonso; Puertas, 2013; Aitcin; Flatt, 2016).

Mikanovic e Jolicoeur (2008) avaliaram o efeito de dois aditivos superplastificantes, um a base de naftaleno sulfonato (NS) e outro de policarboxilato (PC), nas propriedades reológicas e estabilidade de pastas de filer calcário e cimento. Os resultados mostraram que ambos os aditivos propiciaram redução significativa na tensão de escoamento e na viscosidade, aumentando a fluidez das pastas. No entanto, a eficiência desses aditivos foi afetada pelo pH e pela concentração de íons cálcio (Ca⁺²) da solução. O PC apresentou maior eficiência, isso porque suas cadeias laterais mantiveram a conformação estável, mesmo em condições de pH elevado (>12) e elevada concentração de Ca⁺², garantindo uma barreira física eficiente e menor susceptibilidade ao mecanismo de floculação induzidos pelos íons cálcio.

Burgos-Montes Alonso e Puertas (2013) avaliaram a compatibilidade de superplastificantes de éter-policarboxilato (PCE), éter melamina sulfonado (SMF) e naftaleno sulfonado (NS) e diferentes teores de filer calcário (10%, 30% e 50%). O filer calcário apresentou elevada afinidade pelas moléculas de polímero, adsorvendo aditivos à base de PCE mais intensamente que outras adições. Maiores reduções na tensão de escoamento foram observadas com uso de PCE e NS. Para teores de até 30% de filer, não foram observadas alterações significativas na reologia das pastas. Contudo, em teores de 30% e 50%, verificou-se uma redução na resistência à compressão com o uso de PCE e NS, indicando que, embora esses aditivos tenham reduzido a relação água/cimento, elevados teores de filer comprometeram o desempenho mecânico.

Apesar da redução das propriedades mecânicas, pesquisas mostram que o uso de filer calcário com granulometria inferior à do cimento, em substituições de até 30%, não compromete a aderência de argamassas a substratos cerâmicos. Para teores de substituição mais elevados, torna-se necessária a incorporação de aditivos dispersantes para promover a desaglomeração das partículas e favorecer o aumento da área de contato na interface argamassa-substrato (Costa; Cardoso; John, 2016, 2017). No entanto, sua aplicação em argamassas de revestimento ainda é pouco investigada, principalmente quando associada a elevados teores de substituição do cimento por filer calcário e cal hidratada. Uma das principais preocupações está relacionada à adesão inicial da argamassa ao substrato, uma vez que a redução da viscosidade pode favorecer o escorrimento e, conseqüentemente, o deslocamento da camada aplicada.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de três aditivos superplastificantes na cinética de hidratação, na trabalhabilidade e na aderência a um substrato cerâmico de argamassas de revestimento com elevado teor de substituição do cimento (> 30%) por filer calcário e cal hidratada.

2 Programa experimental

Para avaliar o efeito de superplastificantes em argamassas de revestimento, foram selecionados três aditivos: um a base de lignossulfonato (LS) e dois policarboxilatos (PCA e PCB). Estes foram incorporados em três matrizes distintas:

- (a) C10 (referência) – não foi adicionado material carbonático, o teor presente no cimento estimado pela termogravimetria foi de 11%;
- (b) C40 – 40% de filer calcário (30% de substituição + 10% oriundo do cimento), com granulometria inferior ao cimento; e
- (c) M60 – 60% de substituição do cimento (50% por cal hidratada + 10% de filer calcário oriundo do cimento).

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas sequenciais: (1) um estudo em pasta, para analisar a influência dos aditivos superplastificantes na cinética de hidratação por calorimetria isotérmica; (2) um estudo em argamassas, desenvolvido em laboratório, para determinar a demanda de água na presença dos aditivos superplastificante e caracterizar as propriedades no estado fresco e endurecido; e (3) um estudo em painéis, elaborado para avaliar a aplicação das argamassas como revestimento. Nesta última etapa, as argamassas foram aplicadas por um oficial-pedreiro em paredes de bloco cerâmico. Foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido, bem como a aderência argamassa-substrato aos 28 dias.

3 Materiais

Para a produção das pastas e argamassas, foram utilizados cimento Portland de alta resistência inicial (CPV – ARI), cal hidratada (CH I), filer calcário (*Profine I – Provale*), areia natural quartzosa, aditivos superplastificantes e água da rede de abastecimento público.

3.1 Materiais particulados

A composição química dos materiais particulados, obtida por ensaios de espectrometria de raios X conforme NBR ISO 12677 (ABNT, 2014), estão apresentadas na Tabela 1. O ensaio foi realizado em amostras de pérola fundida 1 g em espectrômetro de fluorescência de raios-X da marca Bruker modelo S8 Tiger, com teor de óxidos quantificados pelo método GeoQuant. A perda ao fogo foi determinada a partir dos dados da termogravimetria. O ensaio de termogravimetria foi realizado utilizando a termobalança TG 209 F1 Libra, NETZSCH, em amostras de 50 mg colocadas em cadinho de alumina sem tampa; o conjunto foi aquecido a partir da temperatura ambiente até 1000°C com uma taxa de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio.

Tabela 1 - Composição química do cimento, filer calcário e cal hidratada do estudo (em porcentagem de óxidos, na base de voláteis)

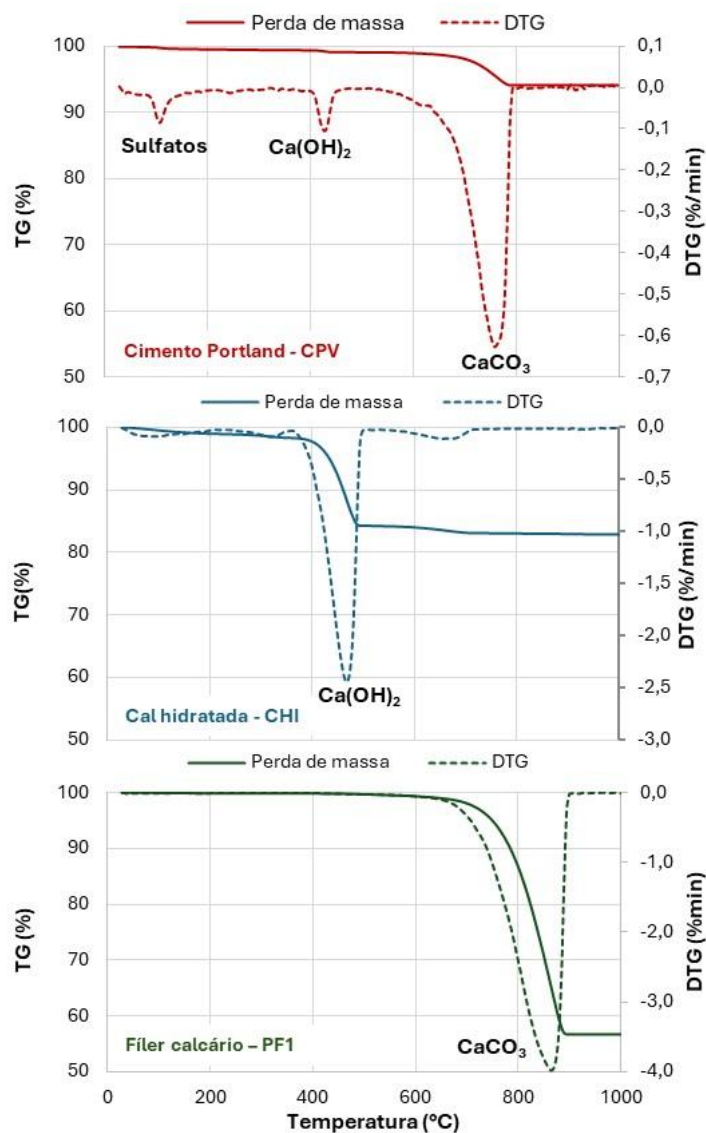
Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Outros	PF
Cimento	61,79	18,33	4,64	2,88	1,85	1,01	0,14	2,80	0,19	0,25	0,22	5,9
Cal	68,02	2,48	0,17	-	-	0,02	0,04	11,59	0,06	0,02	0,21	17,2
Calcário	47,01	1,72	0,14	0,18	0,12	0,14	-	7,15	0,03	0,04	0,03	43,3

Na Figura 1 estão apresentadas as curvas de perda de massa e DTG do cimento, da cal hidratada e do filer calcário anidros em função da temperatura.

Na curva DTG do cimento, observa-se três picos característicos: o primeiro, próximo a 110 °C referente a decomposição dos sulfatos; o segundo a 430 °C correspondente desidroxilação da portlandita; e o terceiro, a 760 °C equivalente a decomposição do carbonato de cálcio. A partir dos dados de perda de massa, estimou-se um teor de portlandita de 0,93% e teor de material carbonático de 11%.

A curva de DTG da cal hidratada evidencia três picos: o primeiro, de pequena intensidade próximo a 320 °C referente a desidroxilação da brucita; o segundo a 469 °C correspondente desidroxilação da portlandita; e o terceiro, a 680 °C equivalente a decomposição do carbonato de cálcio. Os teores estimados, a partir da perda de massa, de brucita, portlandita e material carbonático foram de 0,4%; 56% e 2,6%, respectivamente. Por sua vez, o filer calcário apresentou um pico característico próximo a 860 °C equivalente a decomposição do carbonato de cálcio, cujo teor estimado foi de 97%.

Figura 1 - Resultados de TG/DTG do cimento, cal hidratada e filer calcário utilizados



A distribuição granulométrica dos materiais finos foi realizada em granulômetro a laser Helos KR (Sympatec) com sistema de dispersão (Succell) e intervalo de análise de 0,1 a 350 μm . A distribuição granulométrica da areia foi obtida pela técnica de análise dinâmica de imagem (QicPic, Sympatec), sistema de dispersão a seco (Gradis) e massa da amostra de 329,15 g. As curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 2. A massa específica foi determinada pelo método NBR 16605 (ABNT, 2017), a densidade real por picnometria de gás Hélio (Micromeritics, Accupyc 1340) e a área superficial específica (BET) obtida por ensaios de absorção/dessorção de nitrogênio, com equipamento MicrotracBEL (Belsorp). Os resultados da caracterização física dos materiais particulados estão apresentados na Tabela 2.

A cal hidratada e filer calcário utilizados apresentaram dimensões inferiores ao cimento: $D50_{\text{cimento}} = 14,3 \mu\text{m}$; $D50_{\text{cal hidratada}} = 7,4 \mu\text{m}$ e $D50_{\text{filer calcário}} = 3,3 \mu\text{m}$. Embora o filer calcário apresente menor diâmetro em relação à cal hidratada, a área superficial BET desta é cerca de 2,85 vezes superior ao filer calcário. Essa diferença pode ser atribuída à porosidade e morfologia distintas das partículas. O processo de hidratação do CaO produz cristais hexagonais de Ca(OH)_2 que, ao longo do tempo, assumem a forma de lâminas, dispostas em camadas (Margalha *et al.*, 2012). Essa estrutura distingue-se da apresentada pelo carbonato de cálcio que apresenta estrutura mais densa, compacta e menos porosa (Leeuw; Parker, 1998).

A areia natural apresentou módulo de finura igual a 1,89 e esfericidade média igual a 0,87.

3.2 Aditivos superplastificantes

Três aditivos superplastificantes foram estudados: um lignossulfonato (LS) e dois policarboxilatos (PCA e PCB), fornecidos anonimamente pelos fabricantes. Os parâmetros físico-químicos (pH, teor de sólidos, massa específica e teor de cloretos) foram obtidos conforme NBR 11768-3 (ABNT, 2019a). A identificação dos grupos funcionais foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), utilizando um espectrômetro Agilent Cary 630. As análises foram conduzidas com resolução de 4 cm^{-1} , em uma varredura de 4000 a 650 cm^{-1} . Os resultados da caracterização física e química estão apresentados na Tabela 3 e os espectros FT-IR obtidos para os aditivos na Figura 3.

Figura 2 - Curvas granulométricas do cimento, filer calcário, cal hidratada e areia natural

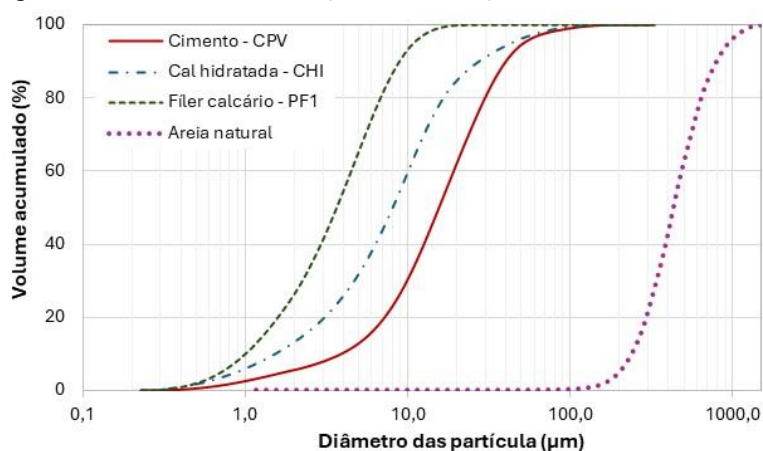


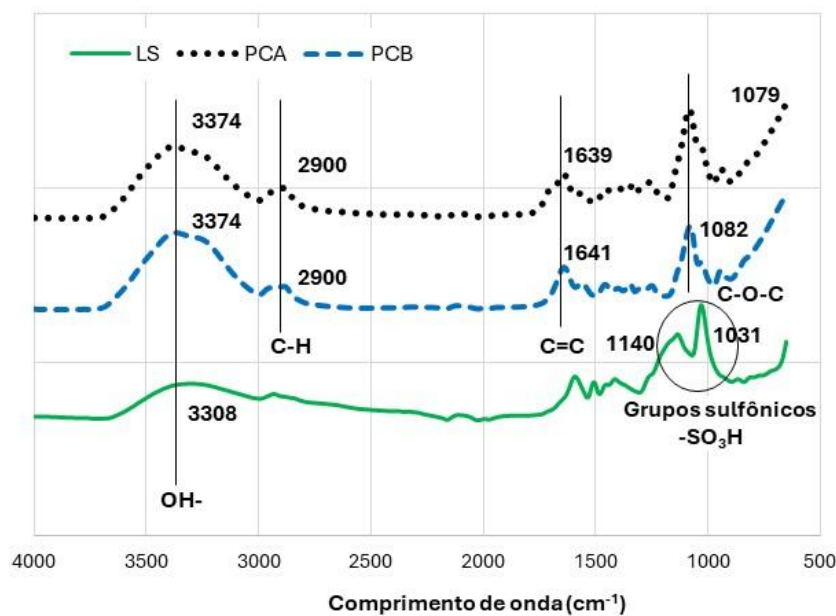
Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento, filer calcário, cal hidratada e areia utilizados

Propriedades	Método	Cimento CPV	Cal hidratada CHI	Filer calcário PF1	Areia natural
Massa específica (g/cm^3)	NBR 16605	$3,07 \pm 0,03$	$2,54 \pm 0,03$	$2,79 \pm 0,03$	$2,52 \pm 0,02$
Densidade (g/cm^3)	Picnometria	$3,11 \pm 0,03$	$2,55 \pm 0,02$	$2,83 \pm 0,04$	$2,69 \pm 0,01$
Área superficial específica (m^2/g)	BET	1,49	11,44	4,01	n. d
D10 (μm)	Difração a laser e análise dinâmica	3,6	1,4	0,9	221
D50 (μm)		14,3	7,4	3,3	401
D90 (μm)		36,8	25,1	8,1	737

Tabela 3 - Caracterização físico-química dos superplastificantes conforme NBR 11768-3

Superplastificante	pH	Teor de sólidos (%)	Massa específica (g/cm ³)	Cl(%)	Base química
LS	8,19	95,08	1,26	0,028	Lignosulfonato
PCA	8,49	51,12	1,10	0,004	Policarboxilato
PCB	5,28	57,37	1,10	0,084	Policarboxilato

Figura 3 - Espectros FT-IR dos superplastificantes à base de lignossulfonato (LS) e éter policarboxilato (PCA e PCB)



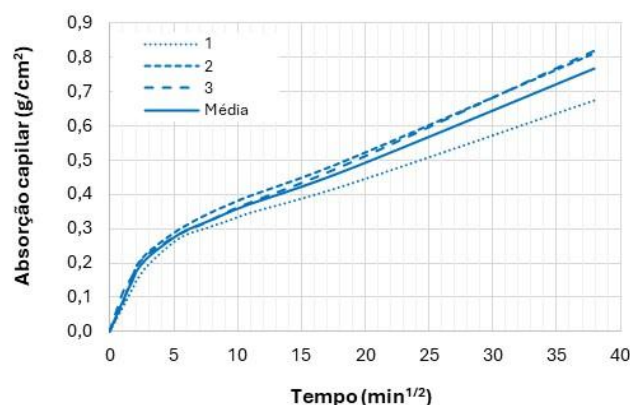
Nos espectros apresentados na Figura 3, observa-se um amplo pico na região entre 3374 e 3308 cm⁻¹ característico do estiramento das ligações -OH associadas a grupos fenol e ácidos carboxílicos presentes nos polímeros (Pérez-Nicolás *et al.*, 2016). Nos aditivos PCA e PCB, a banda em 2900 cm⁻¹ é atribuída ao estiramento assimétrico de C-H (Sha *et al.*, 2021). O pico em 1640 cm⁻¹ origina-se do estiramento assimétrico do grupo carboxilato (-COO⁻), enquanto as absorções em 1450 e 1252 cm⁻¹ correspondem, respectivamente, ao estiramento e à deformação angular de ligações -CH (Sha *et al.*, 2021). A banda em ≈ 1080 cm⁻¹ está associada ao estiramento de C-O-C, geralmente produzidas por unidades HPEG em superplastificantes à base de policarboxilato (Zhang *et al.*, 2019, Sha *et al.*, 2021). Adicionalmente, observa-se uma vibração fora do plano em 943 cm⁻¹ (Zhang *et al.*, 2019, Sha *et al.*, 2021). Por fim, os picos em 1140 e 1031 cm⁻¹, exclusivos no aditivo LS, são atribuídos ao estiramento assimétrico de grupos sulfônicos (S=O) (Pérez-Nicolás *et al.*, 2016).

3.3 Blocos cerâmicos

Para avaliação das argamassas de revestimento foram produzidos painéis com blocos cerâmicos, de seis furos com dimensões 9 x 19 x 29 cm. O índice médio de absorção de água dos blocos cerâmicos de 21%, em conformidade com os requisitos da NBR 15270-1 (ABNT, 2023b). Na Figura 4, é apresentada a curva de absorção de água por capilaridade, determinada nos tempos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 30, 60, 90 e 120 minutos, e após 6 e 24 horas. O coeficiente de capilaridade foi de 0,20 g/cm²/min^{1/2}.

Os blocos cerâmicos foram assentados com argamassa de cimento, com traço típico de obra executado por um pedreiro experiente. Os painéis, com dimensões de 2,65 x 2,50 m (largura x altura), foram construídos em ambiente externo do laboratório para simular as condições de aplicação em obra.

Figura 4 - Curva de absorção de água por capilaridade dos blocos cerâmicos utilizados na produção dos painéis para aplicação das argamassas



3.4 Definição do teor de aditivo superplastificante

A determinação do teor de aditivo superplastificante foi realizada pelo ensaio de reometria rotacional, baseada na metodologia adaptada de Cecel *et al.* (2019). Foram produzidas pastas com 100 g de cimento e quantidade de água para atingir uma concentração volumétrica de sólidos de 48% conforme metodologia padrão de laboratório. Foi adotada essa concentração de sólidos para atingir uma relação água/cimento (a/c) de 0,35, em massa. O aditivo foi dosado em incrementos de 0,05% do superplastificante (em massa de cimento) até que a tensão de escoamento não apresentasse alterações significativas. Este ponto foi definido como ponto de saturação do aditivo.

O procedimento de mistura das pastas foi consistiu numa etapa manual (30 s), seguida de homogeneização em agitador mecânico de alta rotação (10000 rpm por 90 s). Após a mistura, foi realizado ensaios de fluxo em cilíndrico concêntrico no reômetro (Thermo Scientific™ HAAKE™ MARSTM). O ensaio de fluxo aplicou dois ciclos de aceleração e desaceleração, com taxa de cisalhamento variando de 0 e 100 s⁻¹ em um tempo de 21 s.

Os teores de saturação determinados foram: LS – 1,4%; PCA – 0,5% e PCB – 1,0%. Estes teores foram adotados nas formulações estudadas.

3.5 Estudo em pasta: avaliação da cinética de hidratação

A influência dos aditivos superplastificantes na cinética de hidratação foi avaliada por calorimetria isotérmica (Calmetrix I-CAL 8000HPC) a 23 °C durante 72 horas. Foram preparadas pastas com relação água/materiais finos igual a 0,50 e massa total de sólidos de 50 g, seguindo as recomendações da C1679 (ASTM, 2023). Doze pastas foram ensaiadas, compreendendo três misturas de referência (C10 – 50 g de cimento; C40 – 40 g de cimento e 12 g de filer calcário; M60 – 25 g de cimento e 25 g de cal hidratada) e suas combinações com os aditivos superplastificantes (LS; PCA; PCB) nos teores de saturação. Os resultados de calor de hidratação foram expressos em relação à massa de cimento.

3.6 Estudo das formulações das argamassas em laboratório

As argamassas foram formuladas na proporção em volume 1: 4 (finos: areia). Essa proporção foi escolhida por ser amplamente utilizada na prática regional e em sua recorrência nas formulações documentadas na literatura, conforme o levantamento realizado por Vaz e Carasek (2019).

Foram produzidas doze composições: três de referência, sem superplastificante, e nove com os três aditivos em estudo. O teor de substituição do cimento por finos e o teor de aditivo seguiram as mesmas diretrizes estabelecidas para as pastas, conforme detalhado na Tabela 4. O teor de superplastificante foi mantido constante para todas as argamassas conforme o tipo de aditivo.

Tabela 4 - Composição das argamassas estudadas na etapa de laboratório

Argamassa	Traço unitário em volume (cimento: filer calcário: cal hidratada: areia)	Traço unitário em massa (cimento: filer calcário: cal hidratada: areia)	Teor de superplastificante (%)*		
			LS	PCA	PCB
C10	1: 0: 0: 4	1: 0: 0: 3,46	1,4	0,5	1,0
C40	1: 0,43: 0: 5,71	1: 0,39: 0: 4,94			
M60	1: 0: 1: 8	1: 0: 0,82: 6,92			

Nota: *em relação à massa de finos (cimento; filer calcário e cal hidratada).

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR 16541-1 (ABNT, 2016b), utilizando misturador de bancada (equipamento Pavitest, modelo C3013). Inicialmente, os materiais sólidos foram homogeneizados em recipiente plástico, incluindo os aditivos em pó quando presentes na formulação. Os aditivos líquidos eram adicionados nos primeiros 30 s, juntamente 75% da água de mistura pré-estabelecida. Para cada traço, a quantidade de água foi ajustada até que a argamassa atingisse o índice de consistência de 260 ± 5 mm, atendendo ao prescrito na NBR 16541-1 (ABNT, 2016b).

No estado fresco, além do índice de consistência, foram determinadas a densidade de massa, o teor de ar incorporado, conforme NBR 13278 (ABNT, 2005b), e a retenção de água de acordo com NBR 13277 (ABNT, 2005a).

Para os ensaios no estado endurecido, corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm) foram moldados em conformidade com a NBR 13279 (ABNT, 2005c). Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em laboratório ($T = 23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $UR = 60 \pm 5\%$) por 48 horas. Em seguida, foram desmoldados e curados em solução de água saturada com cal por 28 dias. Então, foram realizados os seguintes ensaios:

- resistência à tração na flexão e à compressão: conforme NBR 13279 (ABNT, 2005c) em máquina de ensaios universal Instron modelo 5982;
- módulo de elasticidade dinâmico: segundo NBR 15630 (ABNT, 2008) 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 μs ; e
- absorção de água por capilaridade: conforme prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005d), medindo a absorção aos 10, 30, 60, 90, 120, 180 minutos e 24 horas. O coeficiente de capilaridade foi determinado conforme as recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2005d) e EN ISO 15148 (ISO, 2002).

3.7 Estudo em painéis cerâmicos: avaliação do uso das argamassas como revestimento

Para avaliação do uso das argamassas como revestimento, seis formulações foram selecionadas com base nos resultados de tempo de pega e módulo de elasticidade das argamassas desenvolvidas em laboratório: quatro com filer calcário (C40; C40_LS; C40_PCA; C40_PCB) e duas com cal hidratada (M60 e M60_PCA).

Os painéis cerâmicos foram subdivididos em três faixas de 0,85 x 2,50 m, permitindo a aplicação de três argamassas distintas em cada face. Para aplicação das argamassas, não foi realizado nenhum preparo prévio de base, como a aplicação de chapisco, com o objetivo de simular a condição de aderência mais desfavorável. Foi feito o taliscamento dos painéis para delimitar a espessura da camada de revestimento em 2,5 cm.

Os materiais sólidos e os aditivos foram previamente dosados e entregues ao oficial-pedreiro responsável pela mistura. A mistura foi realizada em uma betoneira de 0,2m³, seguindo o procedimento e o tempo de mistura estabelecidos pelo oficial-pedreiro. Adotou-se uma massa total de 80 kg de materiais sólidos por mistura. A dosagem da água foi realizada empiricamente pelo profissional, mediante avaliação tátil da trabalhabilidade. Ressalta-se que o aplicador não possuía experiência prévia com uso de superplastificantes em argamassa, tendo atuado conforme seu conhecimento prático, sem instruções adicionais. A argamassa foi considerada adequada quando apresentou coesão e não aderiu excessivamente às mãos do profissional durante a manipulação. Para a aplicação, parte da argamassa foi transferida para um carrinho de mão, enquanto o restante permanecia sob agitação na betoneira até que todo o painel fosse revestido. Este procedimento resultou em variação no tempo de mistura entre a primeira e a última parte da argamassa aplicada.

Na Figura 5 são apresentadas as etapas de execução do revestimento dos painéis. A aplicação das argamassas foi feita em camada única, de forma manual, utilizando uma colher de pedreiro. Após a aplicação da argamassa, o pedreiro fazia uma compressão com a colher, eliminando vazios e alisando a superfície. Posteriormente, as argamassas foram sarrafeadas com régua de alumínio, realizando um movimento de vai-e-vem alternando entre movimentos horizontais e verticais, de baixo para cima ou vice-versa. Essa etapa foi realizada quando a argamassa atingia o ponto de sarrafeamento, determinado pelo pedreiro a partir do toque superficial.

Após o sarrafeamento, a argamassa era desempenada com auxílio de uma desempenadeira de madeira. Em alguns casos, o pedreiro umedecia a superfície com uma broxa para facilitar o processo. O acabamento do revestimento foi feito com um bloco de espuma, garantindo um acabamento uniforme e liso.

No estado fresco, as argamassas foram caracterizadas quanto ao índice de consistência (ABNT, 2016a), a densidade de massa e o teor de ar (ABNT, 2005b). Aos 28 dias, foi realizado ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (ABNT, 2008). Os corpos de prova foram moldados a partir da última parte de argamassa aplicada, uma vez que o maior tempo de mistura poderia afetar a trabalhabilidade das argamassas. A caracterização das argamassas produzidas pelo oficial-pedreiro visou a comparação com os resultados obtidos previamente na etapa em laboratório.

A resistência de aderência à tração foi determinada aos 28 ± 2 dias, conforme a NBR 13528-2 (ABNT, 2019b). O ensaio foi realizado utilizando um equipamento de arrancamento, equipado com um manômetro digital (GULpress 1000) calibrado de capacidade máxima de 1500 kgf e resolução de 1 kgf. Para cada argamassa, foram extraídos doze corpos de prova circulares com diâmetro de 50 mm, registrando-se a carga de ruptura e a porcentagem de ruptura. Os dados obtidos foram submetidos a análise de variâncias (ANOVA) utilizando-se o software Statistic 6.0 (Statsoft®), com nível de significância de 5%.

4 Resultados e discussões

4.1 Avaliação da cinética de hidratação das pastas

A Figura 6 mostra as curvas de fluxo de calor (a) e calor acumulado (b) das pastas estudadas, com e sem os aditivos superplastificantes (LS; PCA e PCB) e na Tabela 5 são apresentados o período de indução, tempos de início e fim de pega, taxa de aceleração e o calor acumulado em 72 horas. Os tempos de fim e início de pega foram determinados a partir das curvas de calorimetria isotérmica, conforme recomendações da C1679 (ASTM, 2023). O teor de sulfato não foi corrigido.

Figura 5 - Etapas de execução do revestimento dos painéis: (a) taliscamento; (b) aplicação da argamassa; (c) aperto da argamassa com colher de pedreiro; (d) sarrafeamento; (e) desempeno; (f) painel revestido



Figura 6 - Calorimetria isotérmica - fluxo de calor e calor acumulado das pastas: (a) C10 (b) C40 e (c) M60 sem aditivo e com os superplastificantes LS, PCA e PCB

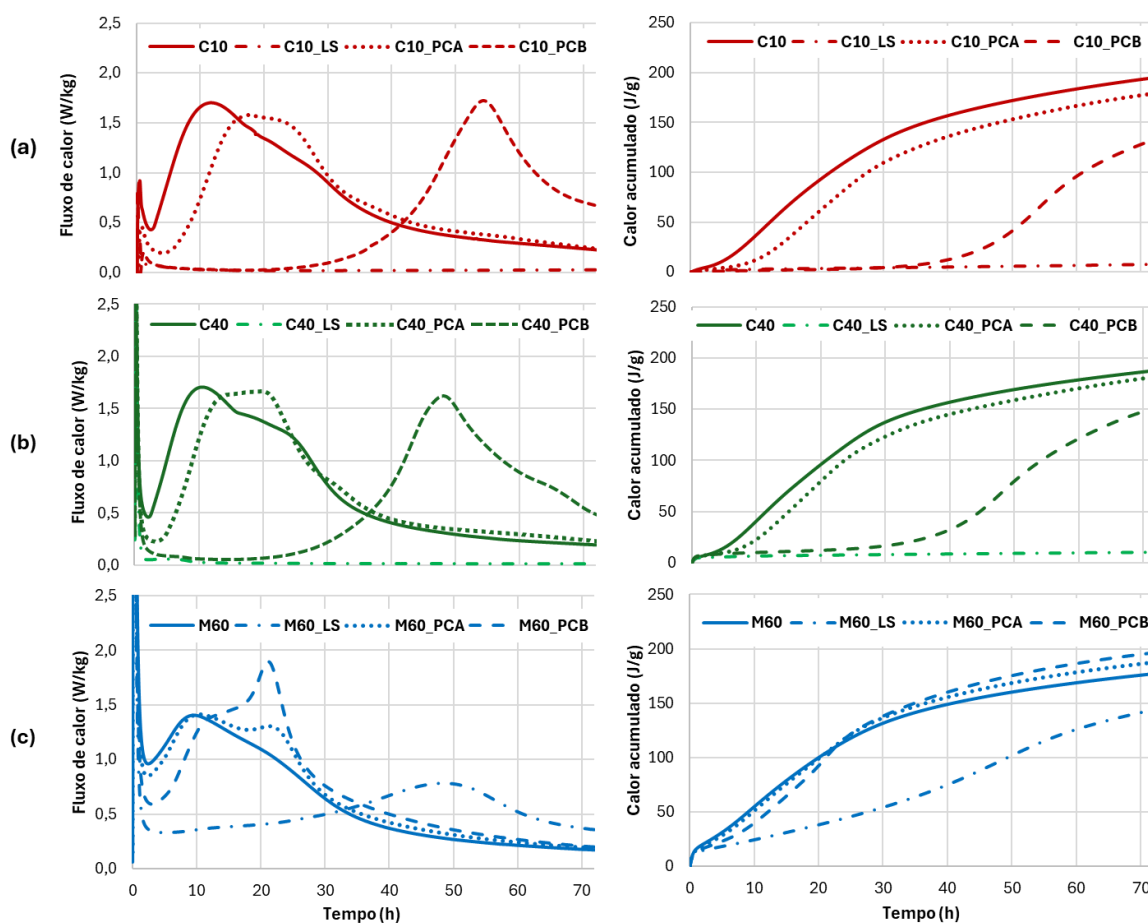


Tabela 5 - Período de indução, tempos de pega*, taxa de aceleração e calor acumulado para as pastas cimentícias estudadas

Pastas	Período de indução h:min	Início de pega h:min	Fim de pega h:min	Taxa de aceleração mW/h	Calor acumulado a 72hs J/g
C10	01:01	04:58	07:21	0,220	194
C10_LS	> 72:00	-	-	-	8
C10_PCA	04:12	08:45	12:53	0,179	179
C10_PCB	35:34	35:36	44:57	0,121	133
C40	01:06	04:28	06:34	0,200	188
C40_LS	> 72:00	-	-	-	10
C40_PCA	03:10	07:26	09:28	0,218	181
C40_PCB	30:06	36:34	42:22	0,115	151
M60	00:42	04:37	06:49	0,117	177
M60_LS	04:06	20:03	34:06	0,006	143
M60_PCA	01:39	04:53	06:58	0,103	187
M60_PCB	03:20	08:40	14:33	0,121	196

Nota: *estimados a partir da calorimetria isotérmica.

Nas misturas sem superplastificantes, a substituição parcial do cimento por filer calcário e cal hidratada nas matrizes alterou a cinética de hidratação. As pastas C40 e M60 apresentaram tempo de início de pega similares à referência (C10), porém demonstraram uma redução no período de indução e tempo de fim de pega. A cal hidratada diminuiu a taxa de aceleração em 50%, efeito que pode ser atribuído à sua menor reatividade em relação ao cimento e ao elevado teor utilizado. Por outro lado, a taxa de aceleração da pasta C40 mostrou-se

muito próxima à C10. Este resultado indica que, apesar do elevado teor de substituição do cimento, a finura do filer calcário potencializou sua eficiência como agente de nucleação, acelerando a formação de produtos hidratados.

O tipo de superplastificante influenciou de forma distinta a cinética de hidratação das matrizes com filer calcário e cal hidratada. O lignossulfonato promoveu um retardo pronunciado, mantendo as pastas C10 e C40 em período de indução durante as 72 h de ensaio. Esse comportamento pode ser atribuído ao teor de aditivo utilizado, bem como a presença de açúcares em sua composição, os quais interferem na hidratação dos compostos C_3S e C_3A , prologando o tempo de início de pega (Aitcin; Flatt, 2016; Colombo *et al.*, 2017). Torres e Torres (2022), ao analisarem dois tipos de lignossulfonatos, observaram efeitos similares na cinética de hidratação, com o aditivo à base de magnésio exibindo retardo mais acentuado, atribuído ao seu maior teor de açúcares. Breilly *et al.* (2021) complementam que o retardamento decorre principalmente do efeito eletrostático, que forma multicamadas adsorvidas nas partículas de cimento, reduzindo a taxa das reações químicas. Os autores sugerem que modificações na cadeia polimérica para induzir efeito estérico podem atenuar esse retardamento. Tal fato foi confirmado com o uso dos policarboxilato (PCA e PCB) que atuam predominantemente por mecanismo estérico.

Os dois policarboxilatos apresentaram comportamentos distintos: o PCA exibiu menor tempo de início de pega e maior taxa de aceleração em comparação ao PCB. Essa diferença no retardo do início da aceleração entre os policarboxilatos pode ser explicada pela redução no tamanho e na densidade das cadeias laterais do polímero. Estudos indicam que cadeias laterais menores e menos densas resultam em menor retardamento, como observado no PCA (Winnefeld *et al.*, 2009; Alonso; Palacios; Puertas, 2013; Rojas *et al.*, 2013). Winnefeld *et al.* (2009) observaram que moléculas de PCE mais densas deslocam e alteram a forma do pico principal de hidratação das pastas cimentícias. Contudo, a interpretação das alterações causadas pelo PCE é complexa, uma vez que resultam de processos simultâneos da hidratação das fases do clínquer. Zhang *et al.* (2019) verificaram que o retardo pode ocorrer independentemente da variação molecular dos polímeros, sendo governado pela capacidade de adsorção do PCE nas partículas de cimento, fator determinante na cinética de hidratação das pastas.

Na presença da cal hidratada, o efeito retardador dos aditivos superplastificantes tornou-se menos pronunciado, inclusive com o lignossulfonato. O tempo de início de pega foi aproximadamente 20 h, inferior ao observado nas matrizes com filer calcário (C10 e C40). A redução do período de indução nas matrizes com cal pode ser atribuída ao aumento da concentração de íons Ca^{2+} e pH da solução, que aceleram a nucleação e a precipitação dos produtos de hidratação (Taylor, 1997), reduzindo assim o efeito retardador dos superplastificantes.

4.2 Caracterização das argamassas: estudo em laboratório

Na Figura 7 estão apresentadas imagens das argamassas após o ensaio de índice de consistência, bem como o valor determinado para essa propriedade, a relação água finos (a/f) e o teor de água (H) em relação à massa total de sólidos obtido para cada mistura.

Como esperado, houve redução no teor de água das argamassas com uso de superplastificantes quando se manteve o índice de consistência constante (260 ± 5 mm). Os aditivos LS e PCB apresentaram relações água/finos (a/f) similares, mostrando-se mais efetivos na redução de água em comparação ao PCA.

Na Tabela 6 estão apresentadas as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas formuladas na etapa laboratorial.

Os resultados de teor de ar incorporado mostraram que teor de ar foi de 5,2 a 9,0% nas argamassas de referência (sem aditivos) e entre 4,9 e 15,7% nas misturas com superplastificantes. Os aditivos atuaram de maneira distinta dependendo de sua natureza química e da composição da argamassa. Argamassas com lignossulfonato (LS) exibiram um aumento no teor de ar: 33% para a C10; 106% para a C40 e 66% para M60. Esse efeito pode ser atribuído à natureza surfactante dos lignossulfonatos, que reduz a tensão superficial e forma camadas interfaciais coesas que estabilizam mecanicamente as bolhas de ar.

Figura 7 - Aspecto visual das argamassas após o ensaio de índice de consistência, produzidas sem (0) e com a presença de aditivos superplastificantes (LS, PCA e PCB)

Argamassa	Aditivo superplastificante			
	0	LS	PCA	PCB
C10				
	d = 260 mm H = 18,8% a/f = 0,74	d = 259 mm H = 15,1% a/f = 0,61	d = 263 mm H = 16,2% a/f = 0,66	d = 258 mm H = 14,0% a/f = 0,61
	d = 263 mm H = 17,1% a/f = 0,78	d = 265 mm H = 14,4% a/f = 0,66	d = 261 mm H = 14,8% a/f = 0,67	d = 258 mm H = 13,6% a/f = 0,61
M60				
	d = 264 mm H = 18,8% a/f = 0,90	d = 258 mm H = 15,1% a/f = 0,72	d = 259 mm H = 16,2% a/f = 0,78	d = 258 mm H = 14,0% a/f = 0,67

Tabela 6 - Relação água/finos (a/f), densidade de massa (d), teor de ar incorporado (A) e retenção de água (U); estado endurecido: Rt - resistência à tração na flexão; Rc - resistência à compressão; E - módulo de elasticidade; C - coeficiente de capilaridade determinado conforme NBR 15529; e $W_{w,3}$ - coeficiente de capilaridade determinado conforme ISO 15148

Argamassa	Aditivo SP	a/f	d kg/m ³	A %	U %	Rt Mpa	Rc Mpa	E Mpa	C ⁽¹⁾ g/cm ² .min ^{0,5}	W _{w,3} ⁽²⁾ kg/m ² .h ^{0,5}
C10	0	0,74	2034	9,0	94	6,4 ± 0,2	21,7 ± 0,8	21989 ± 394	0,012	14,2
	LS	0,61	2008	12,0	94	3,8 ± 1,0	5,6 ± 0,7	13451 ± 371	-	-
	PCA	0,66	2072	8,3	96	8,8 ± 0,4	29,4 ± 1,2	21914 ± 450	0,004	6,25
	PCB	0,61	1999	12,5	96	7,3 ± 0,3	28,1 ± 1,3	22512 ± 874	0,008	11,32
C40	0	0,78	2025	7,6	94	3,4 ± 0,4	13,8 ± 1,5	15064 ± 816	0,024	31,14
	LS	0,66	1904	15,7	99	1,6 ± 0,2	1,9 ± 1,0	2536 ± 183	0,015	20,65
	PCA	0,67	2137	4,9	96	6,8 ± 0,4	21,5 ± 2,7	20078 ± 719	0,015	19,15
	PCB	0,62	2022	11,2	96	7,5 ± 0,4	21,4 ± 1,6	18726 ± 1570	0,013	17,90
M60	0	0,90	2025	5,2	95	2,2 ± 0,1	7,3 ± 0,4	10382 ± 70	0,029	35,24
	LS	0,72	2021	8,8	97	4,4 ± 0,2	12,0 ± 1,6	13669 ± 635	0,015	21,36
	PCA	0,78	2036	7,2	96	4,7 ± 0,3	14,2 ± 1,1	14654 ± 385	0,010	15,30
	PCB	0,67	2089	6,9	98	5,6 ± 0,4	15,6 ± 1,5	18344 ± 470	0,013	17,71

Nota: ⁽¹⁾ O coeficiente de capilaridade corresponde ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min e aos 90 min. ⁽²⁾ Como o gráfico absorção x tempo resultante mostrou uma linha reta com uma diminuição repentina na inclinação, o coeficiente de capilaridade (W_w) foi calculado com valor de t para 3 horas.

Os policarboxilatos (PCA e PCB) apresentaram comportamento distintos, dependendo da composição da argamassa. Na mistura C10, o PCA promoveu uma redução de 8% no teor de ar incorporado em relação à argamassa de referência (sem aditivo), enquanto o PCB causou um aumento de 39%. Para a mistura C40, observou-se uma redução mais acentuada (35%) com o PCA; o PCB, novamente propiciou um acréscimo de 47%. No caso da argamassa M60, os efeitos de ambos os aditivos foram similares. Os policarboxilatos, surfactantes aniônicos, normalmente atuam estabilizando as bolhas de ar por meio de repulsão eletrostática e do efeito Gibbs-Marangoni (Lei; Zhang, 2022). Essas variações na magnitude do efeito entre PCA e PCB pode ser atribuída às suas diferenças na estrutura molecular, como o comprimento da cadeia polimérica e a densidade dos grupos carboxílicos. Além disso, a presença de agentes antiespumantes na formulação de alguns policarboxilatos pode ter sido determinante para as reduções de ar observadas (Lei; Zhang, 2022). No caso da mistura C40, o teor elevado de filer calcário alterou a concentração iônica da solução, o que pode ter resultado na maior redução de ar.

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023a) estabelece que a retenção de água em argamassas para revestimento deve ser superior a 70%. Todas as formulações avaliadas apresentaram valores superiores a 90%, indicando elevada capacidade de retenção de água. Dada ao valor elevado e a similaridade dos resultados, não foi possível identificar o efeito significativo dos superplastificantes sobre essa propriedade.

As argamassas C40 e M60 apresentaram menor resistência mecânica em comparação à C10, devido ao efeito de diluição. Entre elas, a C40 apresentou um desempenho superior ao da M60. Porém, a adição de policarboxilatos (PCA e PCB) resultou em um aumento significativo da resistência, com as argamassas C40_PCA e C40_PCB atingindo valores próximos ao da referência C10. Esse acréscimo de desempenho mecânico pode ser atribuído à ação dispersante dos aditivos, que promoveu a redução de água de amassamento e uma melhor distribuição das partículas finas no sistema, resultando na formação de uma microestrutura mais densa e homogênea.

Por outro lado, o LS reduziu a resistência das argamassas com filer calcário (C10 e C40). Este comportamento pode ser atribuído ao retardo excessivo (> 72h) na hidratação, conforme evidenciado pela calorimetria isotérmica. O retardo das reações comprometeu a formação de produtos hidratados, gerando em uma matriz mais porosa e, portanto, menos resistente. Este fenômeno foi acentuado na argamassa C40, devido ao efeito de diluição. Entretanto, na argamassa com cal hidratada (M60_LS), verificou-se um aumento de 77% na resistência à compressão em relação à referência (M60). Esse resultado sugere que a dispersão das partículas de cal promovida pelo LS contribuiu para o aumento da resistência, compensando assim os efeitos negativos do retardamento.

A substituição parcial do cimento diminuiu a rigidez das argamassas em 31% e 53% para as argamassas C40 e M60, respectivamente, em comparação à C10. No entanto, em combinação com os policarboxilatos houve o acréscimo do módulo de elasticidade, seguindo a mesma tendência da resistência mecânica. Os valores de módulo de elasticidade das argamassas C10 e C40, exceto com lignossulfonato, MC60_PCA e M60_PCB foram superiores a 14000 MPa, valor limite estabelecido pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023a) para aplicação como revestimento de paredes e tetos.

O coeficiente de capilaridade é um parâmetro fundamental para avaliar o transporte de água em argamassas, principalmente no caso de revestimentos externos. A substituição do cimento por filer calcário e cal aumentou a capacidade de absorção de água por capilaridade das argamassas (Figura 8). Este comportamento era esperado, uma vez que a redução da quantidade de cimento, devido ao efeito de diluição, tende a aumentar a porosidade do sistema. Tal resultado está em consonância com os obtidos nas propriedades mecânicas. Contudo, é importante destacar que a incorporação dos superplastificantes reduziu a permeabilidade em todas as argamassas estudadas, minimizando o efeito negativo do aumento da porosidade pela substituição do cimento.

Os aditivos à base de policarboxilatos PCA e PCB mostraram-se mais eficientes em relação ao LS. De modo geral, as formulações com PCA exibiram coeficientes de capilaridade entre 44% e 60% inferiores aos das respectivas argamassas de referência. A maior eficiência do PCA, mesmo sob uma relação água/finos superior às das formulações com PCB, indica que seu mecanismo de ação contribuiu mais efetivamente para a dispersão e o melhor empacotamento de partículas no sistema, resultando no refinamento de poros da matriz. A redução do diâmetro e/ou conectividade de poros, além de contribuir para o aumento da resistência mecânica, diminuiu a permeabilidade à água das argamassas, um aspecto fundamental para a sua durabilidade.

4.3 Avaliação do uso das argamassas como revestimento

A Tabela 7 apresenta o teor de água utilizado, os tempos de mistura e de início do sarrafeamento para cada argamassa aplicada nos painéis. Nesta etapa, a quantidade de água das argamassas foi determinada pelo profissional responsável pela aplicação.

Como esperado, houve uma redução no teor de água com o uso dos superplastificantes. Esta diminuição é um indicativo da ação dispersante dos aditivos, que atuam na desaglomeração das partículas, liberando a água retida em seu interior e, conseqüentemente, permitindo a obtenção de mesma consistência com uma relação água/finos menor.

As argamassas apresentaram tempos de mistura e de início de sarrafeamento distintos. A argamassa C40 apresentou um tempo de mistura superior ao das demais, devido à sua utilização na execução do taliscamento. O uso dos superplastificantes também reduziu o tempo de mistura das argamassas. Para a argamassa C40, o tempo de 20 min foi reduzido para 8 min (LS), 13 min (PCA) e 5 min e 23 s (PCB). No caso da argamassa C40_PCA, não foi possível a aplicação na primeira retirada da argamassa (5 min) devido à baixa adesão inicial à parede. Para resolver esse problema, a argamassa foi reintroduzida na betoneira e submetida a um maior tempo de mistura, sem a necessidade de ajustar a quantidade de água. Após 10 min de mistura, a argamassa foi aplicada (2ª aplicação – 20 min), sem ocorrência de descolamentos. Nas argamassas C40_LS e C40_PCB, não foi necessário ajustes em relação ao tempo de mistura.

Figura 8 - Curvas de absorção de água por capilaridade *versus* tempo das argamassas aos 28 dias: (a) C10 (b) C40 e (c) M60 sem aditivo e com os superplastificantes LS, PCA e PCB

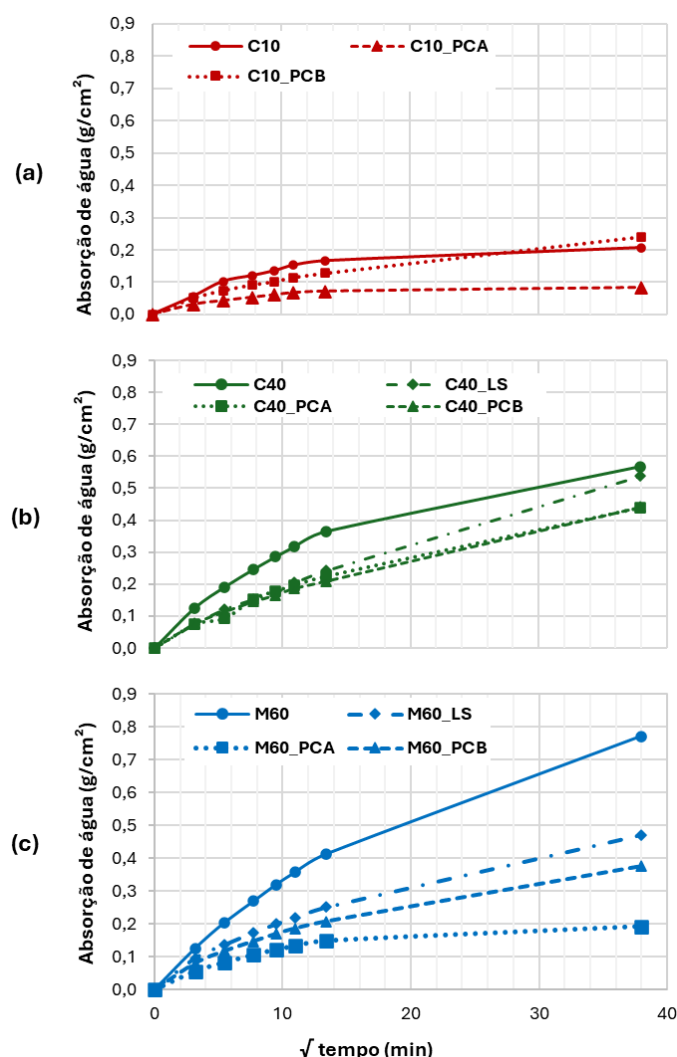


Tabela 7 - Teor de água, tempos de mistura e de sarrafeamento das argamassas aplicadas nos painéis de blocos cerâmicos

Argamassa	Aditivo SP	Teor de água* (%)	Tempo de mistura (h: min: s)**			Tempo de sarrafeamento (h: min: s)
			1ª aplicação	2ª aplicação	3ª aplicação	
C40	0	18,1	00: 20:00	00: 25:00	00: 30:00	00: 40:00
	LS	14,2	00: 08:00	00: 13:00	00: 22:00	00: 55:00
	PCA	16,1	00: 05:00	00: 15:00	00: 20:00	00: 44:00
	PCB	14,1	00: 05:23	00: 11:00	00: 22:00	00: 35:00
M60	0	18,8	00: 06:00	00: 09:00	-	00: 20:00
	PCA	15,3	00: 05:00	00: 09:00	-	00: 26:00

Nota: *em relação à massa total de sólidos; **O tempo de mistura refere-se ao intervalo entre o início da homogeneização na betoneira, que permaneceu em operação contínua, e o momento de sua retirada para aplicação.

Na argamassa M60, o tempo de mistura foi de 6 min (sem aditivo) para 5 min (PCA). Esta redução do tempo de mistura é resultado da ação dispersante dos superplastificantes, que ao promoverem a defloculação das partículas, diminuem a viscosidade aparente da pasta, facilitando e acelerando a homogeneização. Este efeito possibilita ganhos de produtividade e redução do consumo de energia no canteiro de obras.

Em relação ao tempo para início do sarrafeamento, as argamassas C40 apresentaram variação entre 35 e 55 minutos, com menor tempo registrado para a C40_PCB. Para as argamassas C40 e C40_PCA, foi necessário aguardar, no mínimo, 40 min. A argamassa C40_LS apresentou tempos de sarrafeamento superior ao da C40_0 (15 min) e C40_PCA (20 min). Esse comportamento era esperado, conforme os resultados obtidos na calorimetria isotérmica, visto que o uso deste aditivo retardou consideravelmente o início das reações de hidratação.

Por outro lado, as argamassas com cal (M60 e M60_PCA) apresentaram tempo para o início do sarrafeamento de aproximadamente 20 minutos, inferior ao das demais argamassas. A redução no tempo de sarrafeamento devido à presença da cal hidratada era esperado, conforme os resultados da calorimetria. No entanto, nesses casos, o pedreiro realizou o desempenho e acabamento do revestimento antes do tempo apropriado, o que resultou no surgimento de fissuras superficiais características de desempenho precoce. Essas fissuras foram observadas em menos de 24h após a aplicação das argamassas.

A Tabela 8 apresenta um comparativo da relação água/sólidos e as propriedades do estado argamassas das argamassas produzidas em laboratório e aplicadas nos painéis cerâmicos.

De modo geral, o teor de água utilizado pelo pedreiro foi similar ao estabelecido em laboratório (Etapa 2). Contudo, as argamassas C40 e C40_PCA apresentaram um aumento da relação água/finos. Esse acréscimo não resultou em maior espalhamento da argamassa, provavelmente ocasionado à menor eficiência do equipamento de mistura utilizado em campo e as condições ambientais distintas. Quanto ao teor de ar incorporado, os superplastificantes não promoveram o aumento como observado na etapa laboratorial, exceto nas argamassas C40_LS e C40_PCB, cujo aumento foi significativo. Essas variações podem estar associadas não apenas à eficiência da mistura, mas também à natureza do superplastificante utilizado.

A Tabela 9 apresenta os resultados do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência de aderência à tração e da porcentagem de ruptura das argamassas aplicadas sobre o substrato cerâmico aos 28 dias. Os resultados do módulo de elasticidade corroboram a tendência observada em laboratório. Os superplastificantes promoveram melhor dispersão das partículas, resultando no aumento do módulo de elasticidade. Os valores obtidos, superiores ao limite recomendado para aplicação em revestimentos (> 14000 MPa), sugerem que o teor de substituição do cimento por filer calcário poderia ser superior a 30%.

A incorporação de superplastificantes exerceu influência na resistência de aderência à tração dos revestimentos. Esses resultados corroboram os obtidos por Costa (2014). Os policarboxilatos promoveram um aumento significativo desse parâmetro em ambas as argamassas avaliadas (C40 e M60), enquanto o lignossulfonato (LS) provocou uma redução significativa e maior dispersão dos dados, resultado esperado devido ao retardo excessivo na hidratação e ao baixo desempenho mecânico observados nas etapas anteriores.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados médios da resistência de aderência e os respectivos desvios padrão.

Tabela 8 - Comparação das propriedades das argamassas formuladas em laboratório (Etapa 2) versus aplicadas nos painéis cerâmicos (Etapa 3)

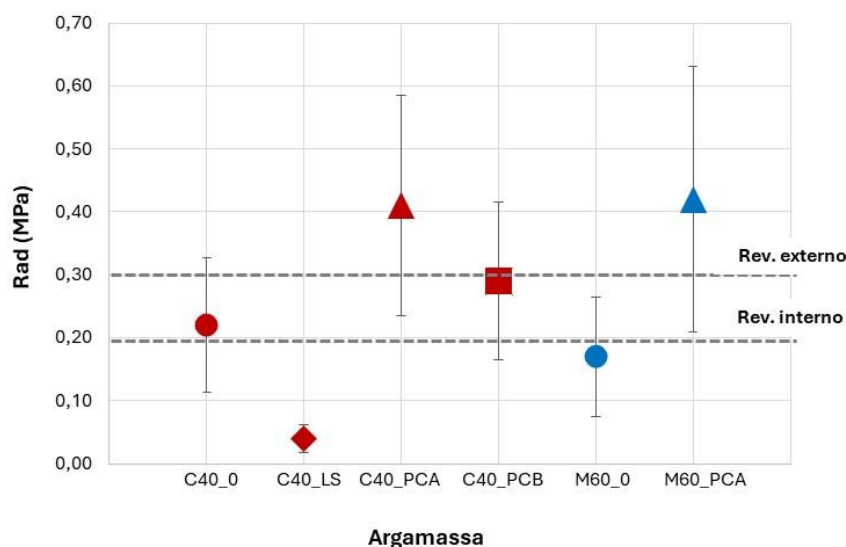
Argamassa	Aditivo SP	Relação a/f		Espalhamento (mm)		Densidade (g/cm ³)		Teor de ar (%)	
		Etapa 2	Etapa 3	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 2	Etapa 3
C40	0	0,78	0,83	263	200	2025	2074	7,8	5,7
	LS	0,66	0,65	265	222	1904	1580	15,7	30,1
	PCA	0,67	0,73	261	248	2137	2126	8,5	5,5
	PCB	0,62	0,64	258	258	2022	1936	11,2	18,7
M60	0	0,90	0,90	264	199	2025	2049	5,2	4,2
	PCA	0,78	0,73	259	201	2036	2060	7,1	6,0

Tabela 9 - Propriedades das argamassas aplicadas sobre o substrato cerâmico: módulo de elasticidade dinâmico, resistência de aderência à tração e forma de ruptura, aos 28 dias

Argamassa	Aditivo SP	E _{dinâmico} (MPa)	Resistência de aderência (MPa)				Forma de ruptura (%)**		
			n*	Máxima	Média	CV (%)	S/A	S	A
C40	0	18419 ± 95	12	0,37	0,22	48	75	0	25
	LS	11225 ± 338	12	0,09	0,04	53	25	0	75
	PCA	21860 ± 454	12	0,71	0,41	42	44	41	15
	PCB	21528 ± 861	9	0,49	0,29	44	48	29	23
M60	0	13378 ± 511	8	0,35	0,17	54	60	24	16
	PCA	18217 ± 257	8	0,69	0,42	50	50	14	36

Nota: *número de corpos de prova; **Forma de ruptura: S/A - interface substrato/argamassa; S - substrato; A - argamassa.

Figura 9 - Resistência de aderência à tração média e desvio-padrão das argamassas aplicadas sobre substrato cerâmico, aos 28 dias



De acordo com a NBR 13749 (ABNT, 2013), os valores mínimos de resistência de aderência à tração para revestimentos externos e internos são 0,30 MPa e 0,20 MPa, respectivamente. As argamassas C40_PCA; C40_PCB e M60_PCA atenderam ambos os critérios, sendo aptas para aplicação em ambientes internos e externo. A argamassa C40, sem aditivo, restringiu-se ao uso em revestimento interno, visto que atingiu o valor mínimo de 0,20 MPa.

A análise de variância (ANOVA) indicou diferença significativa tanto entre as composições das argamassas quanto entre os tipos de superplastificantes utilizados na aderência aos 28 dias. O teste de Duncan, aplicado às argamassas C40, permitiu a formação de três grupos distintos: C40_LS; C40_0 e C40_PCB; e C40_PCA. Além disso, observou-se diferença significativa entre as argamassas M60 e M60_PCA.

A substituição parcial do cimento ($D_{50} = 14,3 \mu\text{m}$) por materiais mais finos, como a cal ($D_{50} = 7,4 \mu\text{m}$) e o filer calcário ($D_{50} = 3,3 \mu\text{m}$) favorecem a migração de partículas para a interface com o substrato, ampliando a área de contato e, consequentemente aumentando a aderência nesta região (Scrivener; Crumbie; Laugesen, 2004; Costa, 2014). Considerando a tendência de aglomeração dessas partículas devido às forças de van der Waals, a ação de dispersante dos superplastificantes torna-se essencial para otimizar esse efeito. Os resultados obtidos comprovam a eficiência desse mecanismo, pois os policarboxilatos proporcionaram ganhos significativos de 86% e 147% na resistência de aderência à tração das argamassas, C40 e M60, respectivamente.

Os superplastificantes modificaram o modo de ruptura do conjunto argamassa-substrato. Verificou-se um aumento da porcentagem nas rupturas coesivas (na argamassa ou no substrato), o que indica maior resistência na interface argamassa/substrato em relação às camadas individuais. A argamassa M60_PCA apresentou menor porcentagem de ruptura no substrato em comparação à C40_PCA e C40_PCB.

5 Conclusão

Este trabalho demonstrou que o tipo de superplastificante interfere na cinética de hidratação, incorporação de ar, nas propriedades mecânicas da argamassa e aderência da argamassa ao substrato cerâmico. A seleção adequada do superplastificante contribui para a substituição do cimento por materiais finos, em teores superiores a 30%, sem comprometer a aplicabilidade das argamassas em revestimentos.

A calorimetria isotérmica revelou que a cal hidratada reduziu a taxa de aceleração devido ao seu teor e menor reatividade, enquanto a elevada finura do filer calcário foi determinante para compensar o efeito de diluição, atuando como agente de nucleação. Entre os superplastificantes, os policarboxilatos (PCA e PCB) mostraram-se superiores ao lignossulfonato (LS), que apresentaram um retardamento excessivo ($> 72 \text{ h}$) e comprometeu a resistência das argamassas. Estudos adicionais com teores de lignossulfonatos abaixo da saturação são necessários para análise da viabilidade de aplicação em argamassas. Os policarboxilatos exibiram comportamento distintos: o PCA apresentou menor efeito retardador em comparação ao PCB, provavelmente devido a diferenças em sua estrutura molecular. A presença de cal hidratada atenuou o efeito retardador de todos os aditivos, pois o aumento da concentração de íons Ca^{+2} e do pH acelerou a nucleação e a precipitação de produtos hidratados.

Os superplastificantes reduziram a relação água/finos necessária para obtenção da consistência especificada para as argamassas. O LS aumentou significativamente a incorporação de ar, enquanto os policarboxilatos o reduziram na matriz C40, possivelmente pela presença de agentes espumantes em sua formulação e/ou da alteração na concentração de íons cálcio. No estado endurecido, embora a substituição parcial do cimento tenha reduzido as propriedades mecânicas, os policarboxilatos permitiram desempenho similar entre as argamassas C40 e C10. Seu efeito dispersante, aliado à redução da relação água/finos, resultou numa microestrutura mais densa e homogênea, reduzindo a absorção de água por capilaridade.

A aplicação das argamassas em painéis cerâmicos confirmou os dados do laboratório. 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_PCA, C40_PCB e M60_PCA atendendo ou superando requisitos normativos para ambientes internos e externos. O aumento na porcentagem de rupturas coesivas indicou que a interface argamassa-substrato se tornou mais resistente que os próprios materiais constituintes.

Referências

- AITCIN, P. C.; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- 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, 2013.
- AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. **C1679-17**: standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry. Atlanta 2023.
- APOSTOLOPOULOU, M.; BAKOLAS, A.; KOTSAINAS, M. Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 290, jul. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-3**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland; parte 3: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2019a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.a
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-1**: argamassas inorgânicas: requisitos e métodos de ensaio: parte 1: argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528-2**: revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: determinação da resistência de aderência à tração: parte 2: aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2005d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2023b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541-1**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12677**: análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF): método do corpo de prova fundido. Rio de Janeiro, 2014.
- BREILLY, D. *et al.* Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 301, 124065, 2021.
- BRIKI, Y. *et al.* Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 147, set. 2021.
- BURGOS-MONTES, O.; ALONSO, M. M.; PUERTAS, F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 417–423, 2013.
- 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, 2019.
- 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, out. 2017.
- COSTA, E. B. C. **Análise dos parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. São Paulo, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efeito do teor e da dispersão de fino calcário na aderência substrato-matriz cimentícia. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 21-34, abr./jun. 2016.
- 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, dez. 2017.

- FERNÁNDEZ, J. M. *et al.* Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 43, n. 1, p. 12–24, jan. 2013.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na construção civil**. São Paulo: Pini, 2002.
- HOOTON, R. D.; NOKKEN, M.; THOMAS, M. D. A. **Portland-limestone cements: state-of-the-art report and gap analysis for CSA A3000**. Toronto: Cement Association of Canada, 2007.
- INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 15148**: hygrothermal performance of building materials and products: determination of water absorption coefficient by partial immersion. Genebra, 2002.
- LEEuw, N. H.; PARKER, S. Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite and vaterite: an atomistic approach. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 102, n. 16, p. 2914–2922, 1998.
- LEI, L.; HIRATA, T.; PLANK, J. 40 years of PCE superplasticizers: history, current state-of-the-art and an outlook. **Cement and Concrete Research**, v. 157, jul. 2022.
- LEI, L.; ZHANG, L. Synthesis and performance of a non-air entraining polycarboxylate superplasticizer. **Cement and Concrete Research**, v. 159, sep. 2022.
- MARGALHA, M. G. *et al.* Microstructural changes of lime putty during aging. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 10, 2012.
- MIKANOVIC, N.; JOLICOUER, C. Influence of superplasticizers on the rheology and stability of limestone and cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 38, jul. 2008.
- PÉREZ-NICOLÁS, M. *et al.* Study on the effectiveness of PNS and LS superplasticizers in air lime-based mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 11–22, abr. 2016.
- PULIDO-ARCAS, J. A.; FLORES-ALÉS, V.; PÉREZ-FARGALLO, A. Coating mortars with improved physical properties, economic cost, and carbon footprint. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, jun. 2022.
- REIS, D. C. *et al.* CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 2, 2021.
- ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 267–283, jul./set. 2013.
- SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, v. 12, p. 411–421, 2004.
- SCRIVENER, K.; JOHN, V.; GARTNER, E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.
- SHA, S. *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, nov. 2021.
- SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL. **SIDAC**. Disponível em: <https://sidac.org.br/busca>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- TORRES, I. F.; TORRES, S. M. Evaluation of the influence of sodium and magnesium lignosulfonates on the hydration kinetics of cementitious paste. **Cerâmica**, v. 68, n. 387, 2022.
- TSIVILIS, S.; VOGLIS, N.; PHOTOU, J. A study of intergrading of clinker and limestone. **Minerals Engineering**, v. 12, n. 7, 1999.
- 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.
- WINNEFELD, F. *et al.* Ettringite-superplasticizer interaction and its impact on the ettringite distribution in cement suspensions. In: **ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE**, 9., Sevilla, 2009. **Proceedings [...]** Sevilla, 2009.
- ZHANG, L. *et al.* Retardation effect of PCE superplasticizers with different architectures and their impacts on early strength of cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, nov. 2019.

Agradecimentos

Esta pesquisa faz parte do projeto EMBRAP II CICS – Potencial de novos cimentos de baixo carbono formulados com aditivos funcionais – Código PUSP-2211.0017, subsidiado pelas empresas GCP Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos; Companhia Industrial de Cimento Apodi; Intercement Brasil S.A.; CIPLAN Cimento Planalto S.A.; Companhia Nacional de Cimento – CNC; Cia Cimento Itambé; Votorantim Cimentos S.A.; SIKA S.A.; Novakem Indústria Química LTDA. Os autores agradecem à EMBRAP II, às empresas parceiras do projeto e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (Bolsa Mestrado Thiago Ranilson Caixeta Silva).

Declaração sobre IA Generativa e Tecnologias Assistidas por IA no Processo de Escrita

Durante a preparação deste trabalho, os autores utilizaram a ferramenta DeepSeek-V4 para revisão gramatical e ortográfica do texto em português e inglês. Após a utilização desta ferramenta, o(s) autor(es) revisou(aram) e editou(aram) o conteúdo conforme necessário e assume(m) total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Dados de pesquisa somente disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

Conflito de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses. As informações apresentadas são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a opinião da EMBRAP II e das empresas parceiras.

Contribuição dos autores

Thiago R. C. Silva: Análise de dados, Pesquisa, Redação do manuscrito original. **Pedro C. R. A. Abrão:** Pesquisa, Validação de dados e experimentos. **Marco Quattrone:** Conceitualização, Validação de dados e experimentos, Redação - Revisão e edição. **Eliane B. C. Costa:** Conceitualização, Pesquisa, Metodologia, Supervisão, Análise de dados, Redação do manuscrito original, revisão e edição. **Autor 5:** Conceitualização, Supervisão, Redação - revisão e edição, Administração do projeto.

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros** e **Eduardo Pereira**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.