

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA,
INOVAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
DOUTORADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

KARINE WEBER MEURER

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS DE
REBOCO COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS DE
MUDANÇA DE FASE DE DIFERENTES NATUREZAS FÍSICO-
QUÍMICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da
Universidade do Extremo Sul
Catarinense para obtenção do título de
Doutor em Ciência e Engenharia de
Materiais.

Orientador: Profº. Dr. Eduardo Junca

**CRICIÚMA,
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M598a Meurer, Karine Weber.

Avaliação do comportamento térmico e das propriedades mecânicas de argamassas de reboco com incorporação de materiais de mudança de fase de diferentes naturezas físico-químicas / Karine Weber Meurer. - 2026.

123 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2026.

Orientação: Eduardo Junca.

1. Argamassa - Propriedades térmicas. 2. Argamassa - Propriedades mecânicas. 3. Cera de parafina. 4. Acetato de sódio. I. Título.

CDD 23. ed. 620.135

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Karine Weber Meurer

Avaliação do comportamento térmico e das propriedades mecânicas de argamassas de reboco com incorporação de materiais de mudança de fase de diferentes naturezas físico-químicas

Esta Tese de Doutorado – TD foi julgada e aprovada para obtenção do grau de Doutor(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 30 de março de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tiago Bender Wermuth

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Elidio Angioletto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Jorge Luís Coleti

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Lisandro Simão

Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, especialmente nos momentos de maior dificuldade, permitindo que eu não desistisse diante dos desafios encontrados.

Ao meu marido, Marciel Schmoeller Heidemann, pelo apoio constante, incentivo e companheirismo ao longo de toda essa trajetória.

Aos meus pais, Estélio Schilickmann Meurer e Zélia Weber Meurer, pelo amor, apoio incondicional e por nunca medirem esforços para me ajudar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Junca, pela orientação, pela constante disponibilidade no esclarecimento de dúvidas, pelo acompanhamento próximo em todas as etapas do trabalho e pelo suporte nas decisões acadêmicas e metodológicas, tornando-se peça fundamental para a concretização desta tese.

Ao Prof. Dr. Júlio Preve Machado, professor na graduação e grande incentivador da minha trajetória acadêmica, pelo apoio, encorajamento e confiança, que foram essenciais para que eu seguisse e concluísse este caminho.

Aos professores do PPGCEM, pelos conhecimentos compartilhados e pela constante disponibilidade em auxiliar no que foi necessário, e à Vivian, secretária do PPGCEM, pelos esclarecimentos acerca do regimento do Programa.

A toda a UNESC, pela oportunidade e pela infraestrutura disponibilizada, que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho e a aquisição de conhecimentos que levarei para toda a minha trajetória acadêmica e profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de pesquisa vinculada ao Edital de Chamada Pública FAPESC nº 48/2021, fundamental para a realização desta tese.

Aos técnicos Tchesare e Mariani, pelo suporte técnico qualificado, pela disponibilidade e pela parceria ao longo da realização dos ensaios laboratoriais.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização deste trabalho, seja por meio de auxílio técnico, apoio moral ou pela compreensão nos momentos de ausência.

RESUMO

A busca por soluções que promovam eficiência energética e conforto térmico nas edificações tem impulsionado a incorporação de materiais de mudança de fase (PCMs) em sistemas construtivos. No entanto, a literatura ainda carece de estudos que comparem a viabilidade do uso de PCMs de naturezas distintas, como parafina e acetato de sódio, em argamassas de reboco, sob condições experimentais equivalentes, considerando simultaneamente seus comportamentos térmico, físico e mecânico. Visando contribuir para esse avanço científico, este trabalho avaliou a substituição parcial da areia normal por parafina e acetato de sódio encapsulados em argamassas de reboco, analisando seus efeitos sobre o desempenho térmico, físico e mecânico do material. Foram produzidas argamassas com 10%, 15% e 20% de substituição da areia por PCM, submetidas a ensaios no estado fresco e endurecido, análises térmicas e avaliações microestruturais. Complementarmente, realizaram-se análises por difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e termogravimetria, além de ensaios experimentais de desempenho térmico em aparato desenvolvido para simular a incidência de calor em condições representativas de verão. Os resultados mostram que a incorporação dos PCMs não comprometeu a retenção de água das argamassas, além de promover redução da densidade de até 23,2 % e na absorção por capilaridade de até 56,3% e 77,7%, para argamassas com parafina e acetato de sódio encapsulados, respectivamente. Observou-se redução das resistências mecânicas com o aumento do teor de PCM. As resistências à compressão reduziram até 65%, com valores entre 6,1 MPa e 3,8 MPa, compatíveis com argamassas de revestimento. O ensaio térmico confirmou a capacidade dos PCMs em reduzir as temperaturas nas camadas analisadas, apresentando redução de até 12,1% correspondente a 4,4 °C em relação à argamassa de referência. Dessa forma, a substituição parcial da areia por PCMs encapsulados, especialmente parafina, mostrou potencial para aplicação em argamassas de reboco, proporcionando ganhos térmicos e desempenho físico e mecânico compatível com a aplicação proposta.

Palavras-chave: Argamassa. Materiais de mudança de fase. Parafina. Acetato de sódio. Desempenho térmico.

ABSTRACT

The search for solutions that promote energy efficiency and thermal comfort in buildings has driven the incorporation of phase change materials (PCMs) in construction systems. However, the literature still lacks studies comparing the feasibility of using PCMs of different natures, such as paraffin and sodium acetate, in plaster mortars under equivalent experimental conditions, simultaneously considering their thermal, physical, and mechanical behaviors. Aiming to contribute to this scientific advancement, this work evaluated the partial replacement of normal sand with encapsulated paraffin and sodium acetate in plaster mortars, analyzing their effects on the thermal, physical, and mechanical performance of the material. Mortars with 10%, 15%, and 20% replacement of sand with PCM were produced and subjected to tests in the fresh and hardened states, thermal analyses, and microstructural evaluations. Additionally, analyses were performed using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and thermogravimetry, as well as experimental thermal performance tests in an apparatus developed to simulate heat incidence under representative summer conditions. The results show that the incorporation of PCMs did not compromise the water retention of the mortars, and promoted a reduction in density of up to 23.2% and in capillary absorption of up to 56.3% and 77.7%, for mortars with encapsulated paraffin and sodium acetate, respectively. A reduction in mechanical strength was observed with increasing PCM content. Compressive strengths decreased by up to 65%, with values between 6.1 MPa and 3.8 MPa, compatible with rendering mortars. The thermal test confirmed the ability of PCMs to reduce temperatures in the analyzed layers, showing a reduction of up to 12.1%, corresponding to 4.4 °C compared to the reference mortar. Thus, the partial replacement of sand with encapsulated PCMs, especially paraffin, showed potential for application in plaster mortars, providing thermal gains and physical and mechanical performance compatible with the proposed application.

Keywords: Mortar. Phase change materials. Paraffin. Sodium acetate. Thermal performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Histórico das publicações na base de dados do Science direct (https://www.sciencedirect.com/journal), extraído em março de 2026), referente aos últimos 10 anos, abordando parafina e acetato de sódio como materiais de mudança de fase.....	24
Figura 2 - Princípio de funcionamento dos PCMs	32
Figura 3 - Tipos de armazenamento de energia térmica.....	34
Figura 4 - Classificação dos PCMs de acordo com sua natureza físico-química.....	37
Figura 5 - PCMs com suas respectivas temperatura e entalpia de fusão.....	39
Figura 6 - Etapas do encapsulamento da parafina (a) Parafina em estado líquido, (b) Acrescentado o grafite expansível, (c) bequer com a mistura e coberto com a placa de Petri no microondas, (d) irradiação com a expansão do grafite, (e) após processo de radiação no microondas, (f) final do processo com a parafina encapsulada pelo grafite.	49
Figura 7 - Encapsulamento do AcS.....	51
Figura 8 - Conjunto de peneiras de diferentes malhas para as granulometrias.....	52
Figura 9 - Moldagem dos corpos de provas utilizadas para os ensaios (a) Moldes prismático e cilíndrico e (b) Painéis.	58
Figura 10 - Densidade de massa no estado fresco	60
Figura 11 – Equipamento para índice de consistência realizado nas argamassas de reboco.....	62
Figura 12 - Equipamento para ensaio de retenção de água realizados nas argamassas de reboco.....	63
Figura 13 - Amostras dos corpos de provas de argamassa de reboco para os ensaios de porosidade (a) Forno (b) Banho maria.	66
Figura 14 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de reboco.....	67
Figura 15 - Resistência à tração na flexão no corpo de prova de argamassa para reboco.....	68
Figura 16 - Resistência à compressão no corpo de prova de argamassa para reboco.....	69
Figura 17 - Medidas do aparato térmico utilizado para ensaio.....	71
Figura 18 - Aparato térmico para ensaio simulando uma fachada e um cômodo em um edifício.....	72

Figura 19 - Localização em corte dos termopares no aparato para ensaio térmico	72
Figura 20 - Variação da massa relativa em função da temperatura durante 50 ciclos térmicos (30 °C – 70 °C) dos PCMs analisados.	75
Figura 21 - Curvas granulométricas dos PCMs utilizados na argamassa de reboco.....	77
Figura 22 - PCMs utilizados na argamassa de reboco.....	78
Figura 23 - Aspecto da consistência das argamassas no estado fresco: (a) argamassa de referência e (b) argamassa P15g, 20%.	81
Figura 24 - Difrátograma obtido das argamassas de reboco	83
Figura 25 - Termogravimetria das argamassas de reboco.....	84
Figura 26 - Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.....	86
Figura 27 - Exsudação de parafina observada após a ebulição dos corpos de prova de argamassa de reboco contendo PCM.....	89
Figura 28 - Aspecto dos corpos de prova de argamassa de reboco após a ruptura no ensaio de resistência à tração na flexão, com visualização das cápsulas de PCM.....	93
Figura 29 - Aspecto visual dos corpos de prova prismáticos de 4 × 4 × 16 cm das argamassas de reboco contendo AcS após 28 dias de cura.	94
Figura 30 - Dentritos fibrosos de sódio decorrentes da recristalização de sais na superfície dos corpos de provas AcS 20%.	95
Figura 31 - Amostras das argamassas selecionadas para os ensaios de desempenho térmico	96
Figura 32 - MEV dos PCM's utilizados nas argamassas de reboco (a) P8g, (b) P11,5g e (c) AcS.....	97
Figura 33 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa Ref. (a) 200 µm; (b) 100µm; (c) 50µm.....	98
Figura 34 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P8g, 10%. (a) 500 µm; (b) 50µm; (c) 20µm.	99
Figura 35 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P8g, 15%. (a) 500 µm; (b) 200µm; (c) 50µm.	100
Figura 36 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P11,5g, 10%. (a) 500 µm; (b) 200µm; (c) 50µm.....	101
Figura 37 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa AcS10%. (a) 500 µm; (b) 200µm; (c) 50µm.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das principais classes de PCMs.	38
Tabela 2 - Estudos da literatura sobre PCMs aplicados a matrizes cimentícias.....	45
Tabela 3 - Etapas e atividades realizadas no desenvolvimento experimental.....	47
Tabela 4 - Composição do encapsulamento da parafina no grafite expansível.....	50
Tabela 5 - Composição dos componentes das argamassas que foram produzidas	56
Tabela 6 - Ensaios realizados nas argamassas no estado fresco.....	59
Tabela 7 - Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido....	64
Tabela 8 - Análise química do cimento.....	73
Tabela 9 - Análise química da cal.	74
Tabela 10 - Distribuição da composição granulométrica dos PCM's utilizados na argamassa de reboco.	76
Tabela 11 - Densidade da massa e teor de ar incorporado das argamassas de reboco.	79
Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas.	80
Tabela 13 - Retenção de água das argamassas de reboco.....	82
Tabela 14 - Absorção de água (A), Índice de vazios (Iv) e Massa específica aparente seca (ρ_s) das argamassas de reboco.	87
Tabela 15 - Absorção de água por capilaridade	90
Tabela 16 - Resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas de reboco.	91
Tabela 17 - Resultados das médias das temperaturas (°C) coletadas do <i>FieldLogger</i> – <i>DataLogger</i> para os ensaios realizados com o aparato, reboco e a forno.....	103
Tabela 18 - Diferença de temperatura das argamassas com PCM em relação a argamassa referência na face da placa de fibrocimento	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CH-III – Cal Hidratada tipo III
CP IV – Cimento Portland pozolânico
DMAX – Dimensão máxima característica
DMIN – Dimensão mínima
DRX – Difração de raios X
FRX – Fluorescência de raios X
FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
IPARQUE – Parque Científico e Tecnológico
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
MF – Módulo de finura
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma MERCOSUL
PCMs – Materiais de mudança de fase
TG – Termogravimetria
UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Absorção de água
AF – Fator água/argamassa fresca
°C – graus Celsius
d – Densidade de massa da argamassa (kg/m^3)
dt – Densidade de massa teórica (g/cm^3)
Ft – Carga aplicada no centro do prisma (N)
L – Distância entre apoios (mm)
m – Massa da argamassa industrializada (g)
ma – Massa do conjunto com argamassa (g)
mc – Massa do recipiente com argamassa (g)
ms – Massa da argamassa anidra (g)
Ms – Massa do corpo de prova seco
Msat – Massa do corpo de prova saturado
mv – Massa do recipiente vazio (g)
mw – Massa total de água adicionada (g)
mágua – Massa de água da mistura (g)
 μm - micrômetro
Rf – Resistência à tração na flexão (MPa)
vr – Volume do recipiente (cm^3)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
3.1. APLICAÇÃO DE PCMS.....	29
3.1.1. Argamassa de reboco	30
3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	30
3.3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	31
3.3.1. Métodos de armazenamento de energia térmica	33
3.3.2. Método de armazenamento de energia térmica sensível.....	34
3.3.3. Método de armazenamento de energia térmica latente	34
3.3.4. Método de armazenamento de energia térmica termoquímico	35
3.4. CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES DOS PCMS	36
3.4.1. Parafina	40
3.4.2. Sais Hidratados / Acetato De Sódio	40
3.5. CONDUTIVIDADE TÉRMICA	42
3.6. INCORPORAÇÃO DOS PCMS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	42
3.6.1. Incorporação direta.....	43
3.6.2. Imersão.....	43
3.6.3. Encapsulamento.....	43
3.7. ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DE PCMS EM ARGAMASSAS E REBOCOS	44
4. METODOLOGIA	47
4.1 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS	47
4.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	48
4.2.1. Encapsulamento da parafina.....	48
4.2.2. ENCAPSULAMENTO DO ACETATO DE SÓDIO	50
4.3. CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS.....	51
4.3.1 Distribuição granulométrica.....	51
4.3.2. Fluorescência de Raios X (FRX)	52

4.3.3. Difração de Raios X (DRX)	53
4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	53
4.3.5. Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria (ATD/TG).....	54
4.3.5.1. Termogravimetria.....	54
4.3.5.2. Ensaio de ciclagem térmica dos PCMs	54
4.4 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	55
4.4.2 Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura.....	57
4.5. CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	59
4.5.1. Densidade de massa e teor de ar incorporado	59
4.5.2. Índice de consistência.....	61
4.5.3. Retenção de água.....	62
4.6. CARACTERIZAÇÕES FÍSICA DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	64
4.6.1. Ensaio de absorção de água.....	64
4.6.2. Ensaio de índice de vazios.....	65
4.6.3. Ensaio de massa específica aparente seca	66
4.6.4. Coeficiente de absorção de água por capilaridade	67
4.6.5. Resistência à tração na flexão	68
4.6.6. Resistência à compressão.....	69
4.7. SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS PARA OS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO	70
4.8. ENSAIOS TÉRMICOS.....	70
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	73
5.1.1. Caracterização do cimento.....	73
5.1.1.1. Análise química do cimento.....	73
5.1.2. Caracterização da cal.....	74
5.1.2.1. Análise química da cal	74
5.1.3. Caracterização dos PCMs	74
5.1.3.1. Ciclagem térmica	74
5.1.3.2 Análise granulométrica.....	76
5.2. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REBOCO NO ESTADO FRESCO	78

5.2.1. Densidade da massa no estado fresco e Teor de Ar incorporado	78
5.2.2. Índice de consistência.....	80
5.2.3. Retenção de água.....	82
5.3. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REBOCO NO ESTADO ENDURECIDO	83
5.3.1. Difração de Raios X.....	83
5.3.2. Termogravimetria	84
5.3.3. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier	86
5.3.4. Absorção de água.....	87
5.3.5. Absorção de água por capilaridade	89
5.3.6. Ensaios Mecânicos.....	91
5.4. SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS PARA OS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO	94
5.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	96
5.5.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos PCMs	96
5.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das argamassas de reboco com PCMs.....	98
5.6. COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ARGAMASSAS	103
6. CONCLUSÃO	107
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1 INTRODUÇÃO

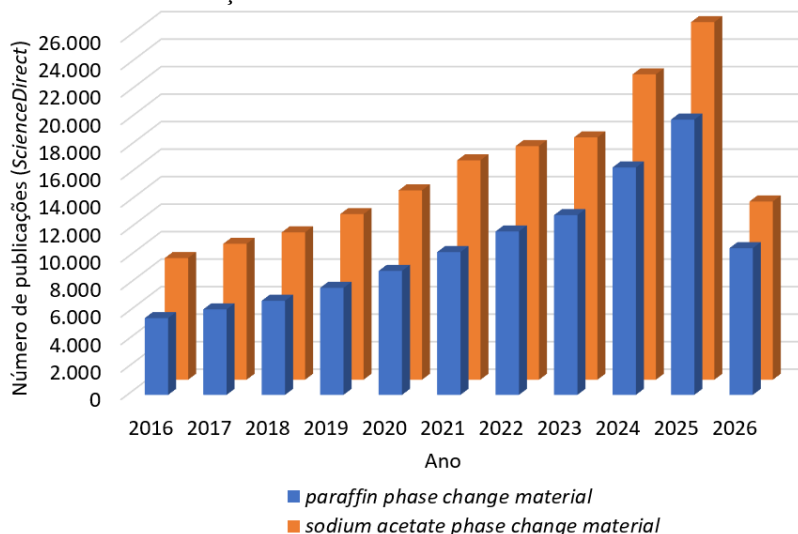
A busca por soluções voltadas à melhoria do desempenho térmico e energético dos materiais constitui um desafio relevante no contexto da Ciência e Engenharia dos Materiais aplicada às edificações e à eficiência energética. Nesse contexto, os materiais de mudança de fase (PCMs) têm sido estudados, com foco no desenvolvimento de composições capazes de fornecer propriedades térmicas diferenciadas. A temperatura interna de edificações geralmente é controlada por sistemas de climatização, como o ar-condicionado; entretanto, pode ser regulada por meio da aplicação de PCMs (Zahir *et al.*, 2023).

Atualmente, mais de 40% da energia primária produzida mundialmente é consumida pelas edificações. Desde 2010, o uso de eletricidade nesse setor cresce, em média, 2,5% ao ano. Em países em desenvolvimento, especialmente em regiões de clima quente e úmido, observa-se uma demanda por climatização com o objetivo de proporcionar conforto térmico aos usuários (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

A energia destinada ao aquecimento e/ou resfriamento de ambientes representa a maior parcela do consumo total de energia em edificações residenciais. Esse gasto pode ser reduzido por meio da modificação das propriedades térmicas dos materiais construtivos. Os PCMs podem ser incorporados a materiais convencionais, originando componentes como painéis de parede, pisos e telhados com desempenho térmico aprimorado (Li; Xu; Zhang, 2024; Pirasaci; Sunol, 2024). Além disso, apresentam potencial de aplicação em sistemas de armazenamento solar térmico, em dispositivos eletrônicos, no setor têxtil e na indústria automotiva (Pielichowska; Pielichowski, 2014).

A gama de aplicações dos PCMs está em constante crescimento. Dentro desse contexto, a Figura 1 mostra um levantamento das publicações junto à base de dados *Science Direct* em março de 2026, abordando os temas *paraffin phase change material* e *sodium acetate phase change material*. Observa-se um crescimento progressivo no número de publicações ao longo dos últimos anos, evidenciando o aumento do interesse científico nesses materiais.

Figura 1 - Histórico das publicações na base de dados do Science direct (<https://www.sciencedirect.com/journal>), extraído em março de 2026), referente aos últimos 10 anos, abordando parafina e acetato de sódio como materiais de mudança de fase.



Fonte: Do autor (2026).

Os PCMs apresentam a capacidade de absorver ou liberar calor latente de forma contínua durante a transição de fase do estado sólido para o líquido (fusão) e do líquido para o sólido (solidificação) (Diaconu; Cruceru; Anghelescu, 2024; Jiang *et al.*, 2024; Li; Xu; Zhang, 2024). A capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume é significativamente superior à de materiais convencionais, sendo estimada entre 5 e 14 vezes maior que o calor sensível armazenado por substâncias como água, alvenaria e rochas (Baccega; Bottarelli; Cesari, 2023).

Conforme Li; Xu; Zhang, (2024), estudos demonstram que o aumento da quantidade de PCM incorporado reduz a condutividade térmica e eleva a capacidade térmica da matriz, favorecendo o desempenho térmico da argamassa. Quando integrado a elementos construtivos, o PCM contribui para a melhoria do conforto térmico interno, aliviando picos e oscilações de temperatura e, consequentemente, diminuindo a necessidade de energia para aquecimento ou resfriamento (Sarcinella *et al.*, 2023).

Os PCMs podem ser incorporados aos materiais por mistura direta ou encapsulamento. O encapsulamento, em muitos casos, é adotado como

estratégia para reduzir o contato direto do PCM com a matriz cimentícia, minimizando problemas como vazamentos e incompatibilidades físico-químicas. Nesse processo, o PCM é acondicionado em cápsulas, que posteriormente são adicionadas ao material de construção (Pirasaci; Sunol, 2024).

Conforme Refahi; Rostami; Amani, (2024) fatores como condições climáticas, intensidade da radiação solar, tipo e orientação da parede e o ponto de fusão do PCM influenciam diretamente o desempenho térmico da edificação. Além disso, a incorporação de PCMs impacta a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais, incluindo trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à flexão e adesão (Li *et al.*, 2024).

O desenvolvimento de tecnologias voltadas à modernização térmica de edificações, novas ou existentes, torna-se uma estratégia relevante para aumentar a eficiência energética. A argamassa, por ser um material presente em praticamente todas as construções, apresenta-se como um meio adequado para a incorporação de inovações voltadas à melhoria do desempenho térmico (Sarcinella *et al.*, 2023).

Desta forma, o presente trabalho se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao propor o desenvolvimento de materiais construtivos com melhor desempenho térmico. Adicionalmente, contribui para o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao promover a redução da demanda energética em sistemas de climatização por meio da melhoria da eficiência térmica das edificações.

Este trabalho avalia o potencial da incorporação de parafina e acetato de sódio (AcS) de forma previamente encapsulados, em argamassas de reboco, material que atua diretamente como interface entre o ambiente externo e o interior das edificações como forma de reduzir o consumo energético de edificações. A caracterização das argamassas foi realizada de acordo com a NBR 13281-1:2023, além de análises energéticas em um aparato simulando um cômodo residencial.

Embora diversos estudos tenham investigado a incorporação de PCMs, especialmente parafina microencapsulada em matrizes cimentícias e argamassa de revestimento, a presente pesquisa apresenta como ineditismo ao propor uma análise comparativa direta entre PCMs de naturezas físico-químicas distintas (parafina material orgânico e o AcS material inorgânico) ambos previamente encapsulados e incorporados sob condições experimentais equivalentes. Destaca-se como contribuição a avaliação da substituição parcial do agregado miúdo por PCM encapsulado, particularmente no caso do acetato de sódio, abordagem

ainda pouco explorada na literatura para argamassas de reboco. Adicionalmente, o desenvolvimento de um aparato experimental para simulação de condições térmicas representativas permite uma análise integrada do desempenho térmico, físico e mecânico do revestimento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a substituição parcial da areia por parafina e acetato de sódio ambos previamente encapsulados, utilizados como materiais de mudança de fase, em argamassas de reboco, visando à melhoria das propriedades térmicas do revestimento aplicado às edificações.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a viabilidade técnica da incorporação de parafina encapsulada e acetato de sódio encapsulado como materiais de mudança de fase em argamassas de reboco;
- Verificar o comportamento mecânico das argamassas de reboco em função da substituição parcial da areia por parafina encapsulada e acetato de sódio encapsulado;
- Analisar o desempenho térmico das argamassas de reboco contendo parafina encapsulada e acetato de sódio encapsulado, por meio de ensaio térmico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. APLICAÇÃO DE PCMS

A incorporação de diferentes tipos de PCMs em matrizes cimentícias, com o objetivo de armazenamento de energia térmica, tem sido investigada na literatura científica. Esses materiais apresentam potencial para melhorar o desempenho térmico de sistemas construtivos, sobretudo em edificações, ao minimizar variações de temperatura e reduzir a demanda por sistemas ativos de climatização. No entanto, desafios como o vazamento durante a transição de fase e a baixa condutividade térmica ainda representam limitações relevantes à sua aplicação, motivando o desenvolvimento de estratégias para aprimorar suas propriedades e viabilizar seu uso em escala construtiva. Entre as soluções propostas, destaca-se a adição de materiais carbonosos, como grafite expandido, grafeno e nanotubos de carbono, os quais contribuem para o aumento da condutividade térmica dos PCMs, favorecendo os processos de carga e descarga térmica (Erkizia *et al.*, 2024a).

As edificações constituem sistemas complexos, submetidos a fluxos de energia internos e externos associados tanto às cargas internas quanto à transferência de calor por condução, convecção e radiação (de ondas curtas e longas). Esses fluxos são fortemente influenciados pelas condições climáticas locais, orientação solar e características dos materiais constituintes da envoltória. Nesse contexto, diversas estratégias têm sido adotadas para reduzir o consumo energético em edifícios, como o uso de revestimentos refletivos ou isolantes para minimizar ganhos solares, a introdução de cavidades de ar em paredes para reduzir a transmitância térmica e, mais recentemente, a incorporação de PCMs em camadas de acabamento, promovendo alterações significativas nas propriedades térmicas da envoltória (Alvarez-Rodriguez *et al.*, 2024; Pirasaci; Sunol, 2024).

Os PCMs podem ser aplicados em diferentes elementos construtivos, incluindo paredes externas e internas, coberturas, pisos, fechamentos translúcidos e, de forma integrada, na envoltória completa da edificação. Além disso, podem ser incorporados a componentes como persianas, venezianas e brises, com a finalidade de reduzir as trocas térmicas com o ambiente externo, muitas vezes sem a necessidade de intervenções estruturais significativas (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

Dessa forma, a utilização de PCMs apresenta-se como uma solução promissora para o setor da construção civil, uma vez que possibilita a redução do consumo de energia destinada ao ar-condicionado,

especialmente em períodos de verão, além de contribuir para o deslocamento do pico de carga ao longo do dia, gerando benefícios econômicos e ambientais relevantes (Zahir *et al.*, 2023).

3.1.1. Argamassa de reboco

De acordo com NBR 13281-1 (2023), a argamassa é definida como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) e água, contendo ou não aditivos, caracterizada por propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser preparada em obra ou fornecida como argamassa industrializada.

Segundo Carasek (2007), as argamassas podem ser classificadas conforme sua função em: argamassas para alvenaria, para revestimentos e para recuperação estrutural. No caso específico dos revestimentos, as camadas desempenham funções distintas. O chapisco atua como camada de preparo da base, uniformizando a absorção superficial e favorecendo a aderência; o emboço é responsável pela regularização da superfície, servindo de suporte ao reboco ou a revestimentos decorativos; o reboco constitui a camada de acabamento, podendo receber pintura ou atuar como acabamento final; a camada única é aplicada diretamente sobre a base, servindo de suporte a pinturas; e o revestimento decorativo monocamada (RDM ou monocapa) exerce simultaneamente funções de regularização e decoração.

Além de sua função estética, a argamassa de revestimento desempenha papel fundamental na proteção dos elementos de vedação contra agentes agressivos, como vento, chuva, umidade, variações térmicas e radiação solar. Adicionalmente, contribui para o isolamento termoacústico, a estanqueidade à água e a gases e, em determinados casos, para o acabamento final da edificação (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Para que o revestimento cumpra adequadamente suas funções, a argamassa deve apresentar propriedades específicas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A avaliação dessas propriedades, bem como dos fatores que as influenciam, é essencial para compreender o desempenho do revestimento em diferentes condições de uso conforme a NBR 13281-1 (2023).

3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De acordo com Castro (2017), quando existe diferença de temperatura entre dois pontos, ocorre naturalmente a tendência de equilíbrio térmico por meio da transferência de energia, processo

denominado transferência de calor. Esse fenômeno pode ocorrer por três mecanismos principais: condução, convecção e radiação. Na condução, a energia térmica é transmitida por meio da interação entre átomos ou moléculas vizinhas, sem deslocamento macroscópico de massa. Na convecção, o calor é transferido pelo movimento de partículas de um fluido, envolvendo transporte direto de massa. Já na radiação, a transferência de energia ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, independentemente da presença de um meio material.

A emitância é uma propriedade que depende do comprimento de onda, da temperatura e do ângulo de emissão do sólido, sendo influenciada pela composição química do material, pela presença de fases secundárias e por características microestruturais, como rugosidade e porosidade superficial (Azzali *et al.*, 2021).

A cor dos materiais também exerce influência direta sobre sua refletância, podendo ser modificada por fatores como a presença de sombra, a textura da superfície (lisa ou rugosa), as condições climáticas e a intensidade da radiação solar incidente. Assim, no setor da construção civil, torna-se possível desenvolver materiais com propriedades otimizadas tanto do ponto de vista estético quanto térmico, contribuindo para o desempenho energético das edificações (Dantas; Vittorino; Loh, 2022).

3.3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

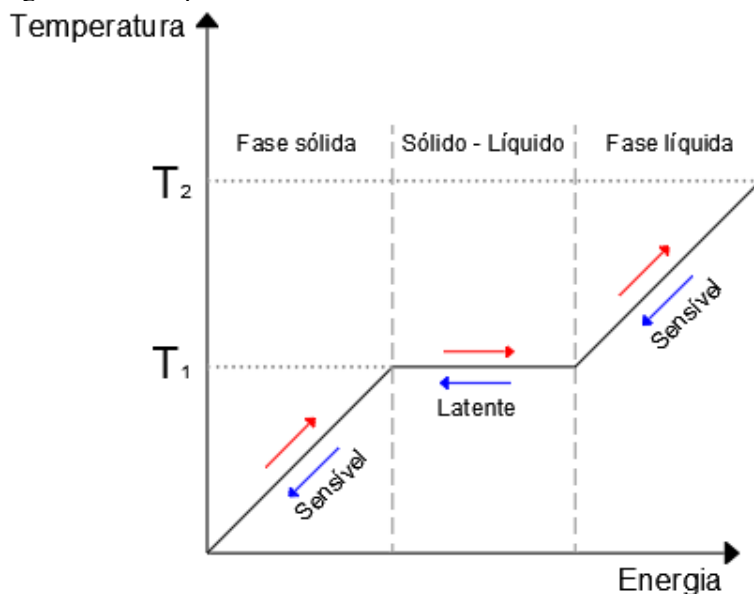
As propriedades térmicas dos materiais desempenham papel fundamental na avaliação do desempenho de sistemas de armazenamento de energia térmica, especialmente quando associados a processos de mudança de fase. Entre essas propriedades, destacam-se a capacidade térmica específica, a entalpia e a entropia, parâmetros amplamente utilizados para a caracterização de transições de fase em materiais sólidos, líquidos e compósitos (Romero *et al.*, 2021).

Durante uma transição de fase, idealmente, a troca de energia ocorre a uma temperatura praticamente constante. Nesse processo, a energia fornecida ou liberada não resulta em variação significativa de temperatura do material (calor sensível), mas é utilizada para promover a transformação de fase, caracterizando o armazenamento ou a liberação de calor latente. Nessa condição, propriedades termodinâmicas como entropia e entalpia apresentam descontinuidades, enquanto a capacidade térmica específica tende a exibir comportamentos singulares, associados à absorção ou liberação de energia sem variação térmica apreciável (Romero *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2024).

A capacidade térmica de uma substância constitui, portanto, um indicador relevante do seu potencial de armazenamento energético, podendo ser utilizada para a estimativa de entalpia e entropia em intervalos específicos de temperatura. No contexto dos PCMs aplicados à construção civil, essa propriedade é particularmente importante para avaliar a eficiência do material na atenuação de variações térmicas em faixas compatíveis com o conforto térmico humano. Além dessas propriedades, a efusividade térmica merece destaque, sendo definida como a capacidade de um material de trocar calor com o meio adjacente por meio de sua superfície. Essa propriedade depende diretamente da condutividade térmica, da densidade e da capacidade térmica do material, influenciando a rapidez com que o calor é absorvido ou liberado (Lopez-Arias; Francioso; Velay-Lizancos, 2023).

Os PCMs, em razão de sua elevada capacidade de armazenamento de calor, são frequentemente utilizados para acumular energia térmica latente proveniente de uma fonte de calor. Os PCMs do tipo sólido líquido apresentam, em geral, três estágios principais durante o processo de mudança de fase, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Princípio de funcionamento dos PCMs



Fonte: Adaptado de (Rubitherm, 2014).

No primeiro estágio, o material encontra-se no estado sólido e absorve calor sensível até atingir a temperatura de início da fusão. No segundo estágio, ocorre a fusão do PCM, com armazenamento de uma quantidade de energia sob a forma de calor latente, enquanto a temperatura permanece praticamente constante. No estágio final, o PCM encontra-se totalmente fundido, absorvendo calor sensível adicional e elevando sua temperatura. Durante o resfriamento, o processo é reversível: o PCM libera gradualmente a energia armazenada, solidificando-se novamente (Wang *et al.*, 2024).

Nas últimas décadas, a produção de eletricidade tem dependido fortemente de combustíveis fósseis, os quais apresentam impactos ambientais expressivos e crescente instabilidade econômica. Projeções indicam aumento duplicado do consumo energético global até 2050 e triplicado até 2100 (Elalfy *et al.*, 2024). Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia assumem papel estratégico na redução do consumo energético e na mitigação do desconforto térmico em edificações.

3.3.1. Métodos de armazenamento de energia térmica

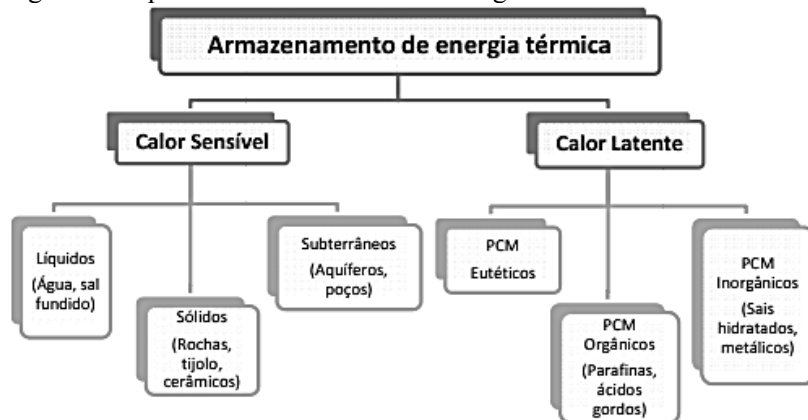
Os sistemas de armazenamento de energia térmica que utilizam PCMs podem apresentar comportamento próximo ao isotérmico na faixa de mudança de fase, permitindo o armazenamento eficiente de energia para utilização posterior, seja para aquecimento ou resfriamento, contribuindo para a redução do consumo energético e trazendo benefícios ambientais (Refahi; Rostami; Amani, 2024).

O armazenamento de energia térmica apresenta vantagens como suporte ao uso de energia limpa, redução da demanda energética em sistemas de climatização, baixo custo inicial em algumas configurações, diminuição das emissões de gases de efeito estufa, maior continuidade operacional e menor custo de manutenção (Elalfy *et al.*, 2024). Esses sistemas podem ser classificados conforme o mecanismo empregado: armazenamento de calor sensível, armazenamento de calor latente e armazenamento termoquímico, cujas diferenças relacionam-se ao material utilizado, à faixa de temperatura operacional e aos parâmetros de projeto (Sarcinella *et al.*, 2023).

Materiais cimentícios apresentam capacidade relevante de armazenamento de calor sensível, a qual pode ser aprimorada com a incorporação de PCMs, explorando-se o armazenamento adicional na forma de calor latente (Erkizia *et al.*, 2024a).

A Figura 3 apresenta um fluxograma resumido dos tipos de armazenamento de energia térmica.

Figura 3 - Tipos de armazenamento de energia térmica



Fonte: Zondag (2012) apud (Costa, 2014)

3.3.2. Método de armazenamento de energia térmica sensível

O armazenamento de calor sensível consiste em acumular energia térmica em um meio de armazenamento, elevando sua temperatura, e transferir calor por meio de um fluido de transferência térmica. Esse método tem sido amplamente estudado, principalmente quanto aos materiais utilizados como meio de armazenamento (Sadeghi; Jalali; Singh, 2024).

De acordo com Reddy; Mudgal; Mallick (2018), trata-se de um método simples, de baixo custo e de fácil controle. A capacidade de armazenamento de energia térmica sensível varia, em geral, entre 10 e 50 kWh/t, com eficiência que pode alcançar 50% a 90%, dependendo do material. Entre os meios mais utilizados destacam-se a água e materiais pétreos, como mármore, argila, compósitos argila/polímero e arenito (Elalfy *et al.*, 2024; Zahir *et al.*, 2023).

3.3.3. Método de armazenamento de energia térmica latente

A energia térmica é armazenada quando um PCM passa por uma transição de fase (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018). Esse método apresenta vantagens em relação ao armazenamento sensível, especialmente pela

elevada densidade de energia armazenada em pequenas faixas de temperatura, uma vez que o calor latente normalmente supera o calor sensível associado à mesma variação térmica (Vargas *et al.*, 2024).

A transição mais comum em aplicações construtivas é a mudança sólido-líquido, embora também possam ocorrer outras transições, como líquido-gasoso, conforme a aplicação. A capacidade de armazenamento de energia térmica latente pode variar entre 50 e 150 kWh/t, com eficiência entre 75% e 90%, dependendo do material (Elalfy *et al.*, 2024).

Em edificações, o armazenamento latente pode integrar fontes renováveis, reduzir o consumo energético quando associado a sistemas solares ou estratégias de resfriamento noturno, aumentar a estabilidade térmica interna e diminuir a necessidade de climatização artificial, ao reduzir ou retardar cargas térmicas de aquecimento e resfriamento (Vargas *et al.*, 2024).

Os PCMs podem ser classificados em orgânicos e inorgânicos. Entre os orgânicos estão parafinas, ácidos graxos, ésteres, álcoois, glicóis e eutéticos; entre os inorgânicos incluem-se hidratos de sal, sais de nitrato, carbonatos, cloretos, sulfatos, fluoretos, hidróxidos, metais, ligas metálicas e eutéticos salinos (Elalfy *et al.*, 2024).

3.3.4. Método de armazenamento de energia térmica termoquímico

No armazenamento termoquímico, o calor é armazenado por processos físico-químicos, em vez de ser acumulado diretamente como energia sensível ou latente (Elalfy *et al.*, 2024). Esse método distingue-se por sua reversibilidade, envolvendo processos físicos reversíveis (absorção e adsorção) ou reações químicas reversíveis. Nos processos físicos, a energia é armazenada sem alteração do arranjo molecular; já nos processos termoquímicos, a energia térmica promove transformações reversíveis nos materiais, associadas a reações exotérmicas/endotérmicas e transferência de calor (Sadeghi; Jalali; Singh, 2024).

Os sistemas termoquímicos apresentam alta capacidade de armazenamento, variando de aproximadamente 12 a 250 kWh/t, com eficiência entre 50% e 90%. Além disso, permitem armazenamento por períodos prolongados com menores perdas térmicas, uma vez que a energia é retida na forma de ligações químicas (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018).

3.4. CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES DOS PCMS

O princípio de aplicação dos PCMs em edificações baseia-se na capacidade desses materiais de absorver calor durante o processo de fusão e liberá-lo durante a solidificação. Quando a temperatura do ambiente externo ou da superfície construtiva ultrapassa o ponto de fusão do PCM, ocorre a transição do estado sólido para o líquido, com consequente armazenamento de energia térmica. À medida que a temperatura diminui, essa energia é gradualmente liberada durante a solidificação, contribuindo para a redução das oscilações térmicas internas e para a melhoria do conforto térmico (El Majd *et al.*, 2024).

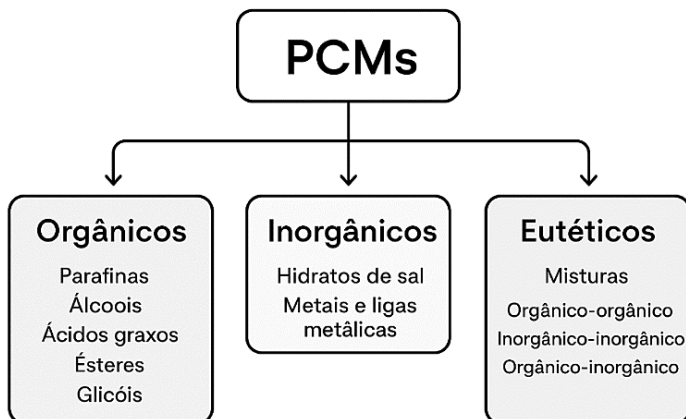
Para que uma substância seja caracterizada como PCM, alguns critérios fundamentais devem ser atendidos, como a adequação do ponto de fusão à faixa de temperatura de operação desejada e a elevada entalpia de fusão. Além disso, outros requisitos técnicos são estabelecidos em função da aplicação, incluindo a congruência da transição de fase, a estabilidade térmica e química ao longo de múltiplos ciclos, a compatibilidade física e química com a matriz ou recipiente e a segurança durante o uso (Diaconu; Cruceanu; Angheliescu, 2024).

No contexto da construção civil, os PCMs devem apresentar características adicionais, tais como elevadas capacidades de armazenamento de calor latente, baixa variação volumétrica durante a mudança de fase, ausência de toxicidade, inflamabilidade e corrosividade, além de custo acessível e disponibilidade comercial. A minimização de fenômenos como sub-resfriamento e segregação de fases também é essencial para garantir a durabilidade e a eficiência do material ao longo do tempo (Alvarez-Rodriguez *et al.*, 2024).

Os PCMs sólido líquido englobam uma ampla variedade de substâncias, que podem ser classificadas de acordo com sua natureza química em orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas (El Majd *et al.*, 2024). Cada uma dessas classes apresenta vantagens e limitações específicas, devendo a escolha do material estar associada às exigências térmicas, mecânicas e de durabilidade da aplicação pretendida (Erkizia *et al.*, 2024a; Jiang *et al.*, 2024; Zahir *et al.*, 2023).

A Figura 4 apresenta a classificação geral dos PCMs, dividindo-os em orgânicos e inorgânicos. Entre os PCMs orgânicos destacam-se os compostos parafínicos e não parafínicos, como álcoois, ácidos graxos, ésteres e glicóis. Já os PCMs inorgânicos incluem, principalmente, hidratos de sal e compostos metálicos, amplamente estudados em aplicações de armazenamento térmico (Zahir *et al.*, 2023).

Figura 4 - Classificação dos PCMs de acordo com sua natureza físico-química.



Fonte: Adaptado de (El Majd *et al.*, 2024).

Além da classificação geral dos PCMs, é relevante destacar que cada categoria apresenta vantagens e limitações específicas quanto ao desempenho térmico, custo, estabilidade e aplicabilidade na construção civil. Para sintetizar essas características, a Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais classes de PCMs, evidenciando seus potenciais e restrições de uso.

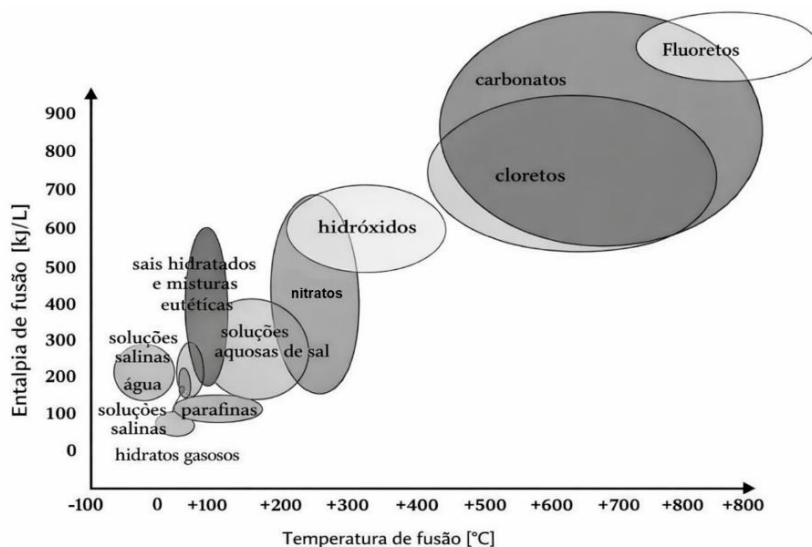
Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das principais classes de PCMs.

Categoria	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	- Estabilidade térmica e química elevada - Mudança de fase congruente (sem segregação) - Baixa corrosividade - Grande número de ciclos reversíveis	- Baixa condutividade térmica - Geralmente custo mais elevado - Inflamabilidade potencial, especialmente em parafinas.
Inorgânicos	- Condutividade térmica superior à dos PCMs orgânicos - Maior densidade de armazenamento (maior calor latente por volume) - Faixa de temperatura ampla	- Tendência a sub-resfriamento - Problemas de segregação de fases - Corrosividade em contato com metais - Possível instabilidade após ciclos repetidos.
Eutéticos	- Ponto de fusão bem definido - Estabilidade dimensional durante a mudança de fase - Podem ser ajustados para diferentes faixas de temperatura	- Produção mais complexa - Custo elevado - Menor disponibilidade comercial.

Fonte: Adaptado de (Erkizia *et al.*, 2024a; Jiang *et al.*, 2024; Zahir *et al.*, 2023).

A Figura 5 apresenta graficamente as classes de PCMs, relacionando-as com os valores de entalpia e de temperatura de fusão, propriedades fundamentais para a seleção de PCMs.

Figura 5 - PCMs com suas respectivas temperatura e entalpia de fusão



Fonte: Adaptado de (CABEZA *et al.*, 2011).

Tanto os PCMs orgânicos quanto os inorgânicos podem ser utilizados para o aumento da eficiência do armazenamento de energia térmica. Os orgânicos apresentam como principais vantagens a transformação de fase congruente, a não corrosividade, a baixa toxicidade, além de boa estabilidade térmica e química. Já os inorgânicos se destacam pela elevada densidade de armazenamento de energia e pela condutividade térmica. Entretanto, ambos apresentam limitações: os PCMs orgânicos são caracterizados por baixa condutividade térmica e baixa densidade, enquanto os inorgânicos sofrem com o sub-resfriamento e a segregação de fases (Baccegá; Bottarelli; Cesari, 2023; Naveen Kumar; Vinayaka Ram; Parameshwaran, 2023).

De acordo com Erkizia *et al.*, (2024) os PCMs orgânicos empregados em aplicações construtivas, como as parafinas e ácidos graxos, apresentam limitações de uso em temperaturas elevadas, sendo normalmente restritos a faixas inferiores a aproximadamente 150 °C. Em contrapartida, os PCMs inorgânicos abrangem uma faixa operacional mais ampla, podendo variar desde temperaturas negativas até valores elevados, a depender da classe do material, incluindo sais hidratados, metais e ligas metálicas. No entanto, no contexto da construção civil, o

uso de PCMs inorgânicos, especialmente sais hidratados, é frequentemente limitado por fenômenos como corrosividade em contato com metais, sub-resfriamento e instabilidade ao longo de ciclos térmicos repetidos.

Os PCMs eutéticos, por sua vez, resultam da combinação de dois ou mais componentes, cujo ponto de fusão da mistura é inferior ao de cada componente isolado. Cada substância pode solidificar e fundir individualmente, mas, durante a cristalização, forma-se uma mistura quase uniforme que se comporta como um único material. Dessa forma, a fusão ocorre de modo simultâneo, sem distinção entre os componentes (Zahir *et al.*, 2023).

3.4.1. Parafina

A parafina é um dos PCMs orgânicos mais estudados e utilizados, sendo composta majoritariamente por alcanos sólidos de cadeia longa. Trata-se de um material ceroso, de coloração branca e inodoro, com faixa de fusão tipicamente compreendida entre 47 °C e 64 °C, adequada para aplicações em edificações. A parafina apresenta elevada capacidade de armazenamento térmico, com valores de entalpia de fusão em torno de 240 J/g, além de baixa toxicidade, boa estabilidade térmica e química e compatibilidade ambiental (Jiang *et al.*, 2024).

As parafinas são insolúveis em água, quimicamente estáveis e apresentam transição de fase congruente, o que favorece sua utilização em ciclos repetidos de fusão e solidificação (André, 2022). No entanto, quando incorporadas a materiais cimentícios, tendem a reduzir a condutividade térmica do compósito, o que pode limitar a eficiência da transferência de calor. Essa limitação tem sido reduzida por meio da adição de materiais de alta condutividade térmica, como grafite expandido, grafeno e outros aditivos carbonosos, os quais contribuem para melhorar o desempenho térmico dos sistemas contendo PCMs (Baccegá; Bottarelli; Cesari, 2023; Jiang *et al.*, 2024).

3.4.2. Sais Hidratados / Acetato De Sódio

Os sais hidratados constituem classe de PCMs inorgânicos, formados por um sal associado a moléculas de água em sua estrutura cristalina. O armazenamento de energia ocorre por meio da fusão do material hidratado e da liberação de calor durante sua cristalização, processo termicamente associado à desidratação e reidratação parcial do sal. Esses materiais apresentam temperaturas de fusão que variam, em

geral, entre 5 °C e 130 °C, faixa considerada adequada para aplicações em sistemas de climatização passiva e armazenamento térmico em edificações (Kalnaes; Jelle, 2015).

Entre os sais hidratados mais estudados destacam-se o cloreto de cálcio hexahidratado, o cloreto de magnésio hexahidratado e o AcS trihidratado. Este último tem despertado interesse devido à sua elevada densidade de armazenamento de energia, boa condutividade térmica, disponibilidade comercial e custo relativamente baixo, configurando-se como uma alternativa promissora para aplicações em materiais de construção (André, 2022).

O AcS tri-hidratado ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), cuja temperatura de fusão situa-se em torno de 58 °C, valor compatível com aplicações em armazenamento térmico de baixa e média temperatura. (Pielichowska; Pielichowski, 2014). O material apresenta elevado calor latente (entre 220 kJ/kg e 268 kJ/kg), boa condutividade térmica quando comparado a PCMs orgânicos de mesma faixa de fusão e custo relativamente baixo, fatores que o tornam atrativo para aplicações em sistemas passivos de eficiência energética (Chen *et al.*, 2026; Wang, Chuang *et al.*, 2025).

Os sais hidratados apresentam limitações como super-resfriamento, separação de fases e redução da estabilidade cíclica. O super-resfriamento dificulta a cristalização e pode retardar a liberação do calor armazenado. A separação de fases compromete a recombinação do sal com a água de cristalização, reduzindo a capacidade térmica ao longo dos ciclos. Esses efeitos tornam-se mais críticos quando incorporados em matrizes porosas, como argamassas, devido à maior interação com a estrutura cimentícia. (Chen; Zhou; Hou, 2026; Wang, Chuang *et al.*, 2025).

A incorporação de grafite tem se mostrado uma estratégia eficaz para aumentar a condutividade térmica do sistema e promover maior estabilidade estrutural do compósito, ao favorecer o suporte físico do sal hidratado e a dissipação mais homogênea do calor. De forma complementar, estratégias de encapsulamento vêm sendo propostas com o objetivo de mitigar vazamentos, acomodar as variações volumétricas decorrentes da transição sólido-líquido e ampliar a durabilidade do material ao longo dos ciclos térmicos (Chen *et al.*, 2026). Assim, tais abordagens configuram-se como soluções fundamentais para viabilizar a aplicação do AcS tri-hidratado em sistemas construtivos, conciliando desempenho térmico e estabilidade físico-mecânica.

3.5. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Materiais com baixa condutividade térmica apresentam limitações em aplicações de armazenamento térmico, uma vez que a transferência de energia ocorre de forma lenta, comprometendo os processos de carga e descarga térmica (Palacios *et al.*, 2023). Dessa forma, na seleção de materiais para armazenamento térmico, busca-se um equilíbrio entre elevada capacidade calorífica, condutividade térmica adequada e efusividade térmica compatível com a aplicação pretendida. Um material com alta condutividade facilita a transferência de calor, enquanto uma elevada capacidade térmica permite maior absorção de energia, resultando em maior eficiência térmica do sistema (Lopez-Arias; Francioso; Velay-Lizancos, 2023).

De modo geral, os sais hidratados apresentam valores de condutividade térmica superiores aos das parafinas, o que favorece a transferência de calor durante os processos de carga e descarga térmica. Entretanto, mesmo nesses materiais, a condutividade térmica ainda pode ser considerada limitada para determinadas aplicações na construção civil (Liu *et al.*, 2024).

Com o objetivo de superar essa limitação, diversas estratégias têm sido investigadas, incluindo a incorporação de materiais com elevada condutividade térmica e estrutura porosa, capazes de atuar como agentes de reforço térmico na matriz do PCM. Entre os aditivos mais utilizados destacam-se o grafite expandido, nanotubos de carbono, grafeno e fibras metálicas, os quais contribuem para acelerar os processos de fusão e solidificação, aumentando a eficiência térmica do sistema (Erkizia *et al.*, 2024b; Kalnaes; Jelle, 2015).

3.6. INCORPORAÇÃO DOS PCMS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A forma de incorporação dos PCMs em elementos construtivos é um fator determinante para o desempenho térmico e a durabilidade dos sistemas desenvolvidos. Diferentes estratégias podem ser empregadas, cada uma apresentando vantagens e limitações específicas, incluindo incorporação direta, imersão e encapsulamento (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022; Vargas *et al.*, 2024).

3.6.1. Incorporação direta

A incorporação direta consiste na adição do PCM diretamente à matriz cimentícia durante o processo de mistura. Trata-se de um método simples e de baixo custo, porém apresenta limitações importantes, como a possibilidade de interferência nos produtos de hidratação do cimento, redução da aderência entre pasta e agregados e prejuízos às propriedades mecânicas e à durabilidade do material (Sarcinella *et al.*, 2023).

3.6.2. Imersão

O método de imersão consiste em mergulhar um material de construção poroso, como agregados, tijolos ou placas de gesso, em PCM fundido. O material absorve o PCM em sua estrutura porosa, permitindo que ele atue como meio de armazenamento térmico. Trata-se de uma técnica relativamente simples, porém limitada pela baixa capacidade de absorção dos poros e pelo risco de vazamento do PCM durante os ciclos de fusão e solidificação, o que pode comprometer a durabilidade do compósito (Sarcinella *et al.*, 2023).

3.6.3. Encapsulamento

O encapsulamento é uma das estratégias mais eficazes para a incorporação de PCMs em materiais de construção, pois cria uma barreira física que impede o vazamento do material durante a transição de fase sólido líquido. Essa técnica é especialmente relevante para saís hidratados, uma vez que reduz o contato do PCM com a matriz cimentícia, minimizando problemas como corrosão, segregação de fases e instabilidade térmica (Jiang *et al.*, 2024; Palacios *et al.*, 2023).

O encapsulamento pode ser classificado conforme o tamanho das partículas em macroencapsulamento, microencapsulamento e nanoencapsulamento, cada um apresentando aplicações e desafios específicos. Estudos indicam que, embora a incorporação de PCMs encapsulados possa resultar em redução das propriedades mecânicas, teores moderados permitem a manutenção de desempenho compatível com as exigências normativas, conciliando ganhos térmicos e resistência mecânica aceitável (Felix; Aguiar, 2009; Meshgin *et al.*, 2012).

No caso da parafina, o encapsulamento em grafite expansível pode ser realizado por síntese física *in situ* via irradiação por micro-ondas. Nesse método, a parafina fundida é misturada ao grafite expansível e submetida a aquecimento rápido no micro-ondas, promovendo a

expansão volumétrica do grafite e a impregnação da parafina em sua estrutura porosa. O compósito resultante apresenta estabilidade de forma, maior condutividade térmica e elevada capacidade de armazenamento de energia, sem ocorrência de reação química entre os componentes (Li et al., 2024).

3.7. ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DE PCMS EM ARGAMASSAS E REBOCOS

A literatura mostra um avanço significativo no uso de PCMs em materiais de construção, com o objetivo de reduzir picos de temperatura e diminuir a necessidade de sistemas de climatização. A maior parte desses estudos concentra-se em PCMs orgânicos, principalmente à base de parafina. Em geral, as pesquisas são desenvolvidas em matrizes de gesso ou em elementos cimentícios estruturais, como concretos e blocos, utilizando estratégias como microencapsulamento e a adição de materiais condutivos (grafeno, fibras de carbono, vermiculita ou perlita expandida) para melhorar o desempenho térmico e a estabilidade dos PCMs.

A Tabela 2 reúne os principais estudos selecionados e evidencia que, embora existam investigações relevantes sobre o uso de parafina em gesso e em concretos, ainda há lacunas importantes quanto à aplicação comparativa de PCMs orgânicos e salinos em argamassas de reboco. Nesse sentido, o presente trabalho se diferencia ao propor e avaliar a substituição parcial do agregado por PCMs encapsulados de naturezas distintas em argamassas de reboco, por meio de uma abordagem integrada que considera aspectos térmicos, microestruturais e mecânicos, contribuindo para a compreensão das potencialidades e limitações desses materiais em aplicações de revestimento.

Tabela 2 - Estudos da literatura sobre PCMs aplicados a matrizes cimentícias

Autores/Ano	Tipo de PCM	Aplicação	Teor de incorporação do PCM	Proposta do trabalho	Resultados principais
Yang et al (2025)	Vermiculita expandida com parafina, revestidos por materiais cimentícios	Rebocos de gesso	Adição de 5, 10 e 15% em peso para gesso	Desempenho térmico e propriedades mecânicas	Reduziu a temperatura ambiente em 0,5–1,5 °C e aumento de 17,9% na resistência mecânica
Medjahed (2024)	Parafina e cera de abelha	Parede dupla de gesso	Frações de massa de 10, 20, 30, 40 e 50%	Impacto do aumento da porcentagem em massa e propriedades térmicas	A condutividade térmica foi reduzida entre 76% e 79%, resultando em menor temperatura interna
Skalar et al (2025)	Parafina encapsulada em uma membrana de melamina-formaldeído	Reboco	Adição de 20% e 30% em volume de PCM à argamassa de cal-cimento	Melhorar o desempenho térmico, preservando suas propriedades físicas e mecânicas.	Os PCMs ampliaram o tempo em conforto térmico para 43,7%, frente a 33,9% da referência
Karkri et al (2015)	Parafina microencapsulada	Revestimentos de gesso	Frações de massa de 25, 30, 35, 40, 45 e 50%	Medição das propriedades termofísicas	Armazenamento de calor 2,56 vezes maior que gesso puro (com 50% de PCM)
Ramakrishnan (2017)	Parafina e perlita expandida hidrofóbica	Compósitos cimentícios	Substituição volumétrica de 20, 40, 60 e 80% do volume de areia	Propriedades térmicas e estabilidade do PCM	Aumento de 166% na capacidade de armazenamento térmico (80% de substituição), mantendo estabilidade mecânica e térmica após 1000 ciclos.
Cunha; Lima; Aguiar, (2016)	Parafina não encapsulado	Argamassa de cimento	Substituição de 0%, 2,5%, 5% e 7,5% do agregado	Avaliar as propriedades físicas e mecânicas	Uma solução viável e mais econômica para a eficiência energética de edificações, sem prejuízo das propriedades
Guardia; Barluenga; Palomar, (2020)	Parafina microencapsulada	Argamassa cimento-cal	Incorporação direta de 20% do volume da argamassa fresca	Avaliar argamassas de cimento-cal com PCM, fibras e perlita sob diferentes climas	Redução da densidade e a resistência, enquanto aumentava a capacidade de armazenamento de calor.

Autores/Ano	Tipo de PCM	Aplicação	Teor de incorporação do PCM	Proposta do trabalho	Resultados principais
Guardia; Barluenga; Palomar, (2022)	Parafina microencapsulada	Argamassa cimento-cal	20% de PCM (em volume de argamassa fresca)	Argamassas de cimento-cal com PCM, LWA e fibras avaliadas em condições de aquecimento e resfriamento	Melhora eficiência energética; redução picos térmicos
Al-Absi et al., (2022)	PCM microencapsulada	Revestimento cimentício	Substituição de 60% da areia pelo PCM	Isolamento térmico	Redução nas variações térmicas
Cunha; Santos; Aguiar, (2025)	Parafina reciclada	Argamassa de revestimento	25%, 50% e 75% de substituição de areia	Recuperar resíduos industriais de parafina	Redução de 75% da demanda de resfriamento
Feijoo et al., (2022)	Parafina	Argamassa de cal	Incorporação direta nas proporções de 0, 5 e 10% em massa	Desempenho térmico, e avaliar propriedades físico-mecânicas	PCM melhora o desempenho térmico e reduz a porosidade. Teor excessivo compromete a argamassa.
Gbekou et al., (2022)	Argamassa de cimento	Argamassa de cimento	Fração volumétrica de mPCMs de 0%, 10%, 15%, 20% e 25%	Desempenho mecânico e termofísico.	Redução de densidade e resistência mecânica, aumento de porosidade. Composição com 8% de mPCM apresentou equilíbrio entre propriedades mecânicas e térmica.
Liu et al., (2018)	Sal hidratado em forma estável	Argamassa de cimento	Incorporação de 5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa de areia	Integrar sais hidratados com forma estável em argamassa para eficiência térmica	Capacidade de armazenamento de energia térmica satisfatória com a incorporação do PCM.
Vargas et al., (2024)	Parafina microencapsulada	Placas de argamassa (4 cm) para pisos ou paredes em edifícios leves	10% e 20% em peso como substituto de agregados finos	Avaliar o acúmulo de energia sensível e latente ao substituir agregados por PCM	Confirmou viabilidade de incorporação de PCM de parafina em argamassas de revestimento obtendo capacidade de armazenamento térmico.

Fonte: Do autor (2026).

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foi estruturada em quatro etapas fundamentais: obtenção das matérias-primas, caracterização dos materiais, produção das argamassas e, após o período de cura, realização dos ensaios nas argamassas. A Tabela 3 apresenta, de forma detalhada, as etapas e as atividades que foram desenvolvidas.

Tabela 3 - Etapas e atividades realizadas no desenvolvimento experimental.

Etapas	Atividades
Obtenção das matérias-primas	Cimento CP IV, cal CH-III, areia normal, água, parafina, AcS, grafite, grafite expansível, placa de fibrocimento.
Caracterização dos materiais	Análise granulométrica; Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Termogravimetria (TG).
Produção das argamassas	- Encapsulamento da parafina, do AcS. - Dosagem e procedimentos de misturas; - Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura.
Ensaio das argamassas	- Ensaios no estado fresco: Índice de consistência, densidade da massa no estado fresco, teor de ar incorporado e Retenção de água. - Ensaios no estado endurecido: Porosidade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, coeficiente de absorção de água por capilaridade, térmicos (<i>data-logger</i> com termopares).

Fonte: Do autor (2026).

4.1 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais necessários para a realização dos experimentos foram obtidos por meio de fornecedores locais. Para a produção das argamassas, foi utilizado cimento Portland do tipo CP IV, conforme classificação da ABNT, bem como cal hidratada do tipo CH-III, empregada como material ligante complementar. Esses materiais foram armazenados em local seco, coberto e fechado, com o intuito de manter suas propriedades. Foram utilizadas areias finas nº 100 e nº 50 e areias grossas nº 30 e nº 16, padronizadas de acordo com a NBR 7214 (2015). A parafina e o AcS

utilizados foram de origem comercial. O grafite expansível, sob a denominação Grafexp 9560-150. A placa plana de fibrocimento sem amianto, modelo Superboard IP BQ, com espessura de 1 mm. Foi utilizada água potável no preparo das misturas, isenta de impurezas orgânicas e inorgânicas.

4.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

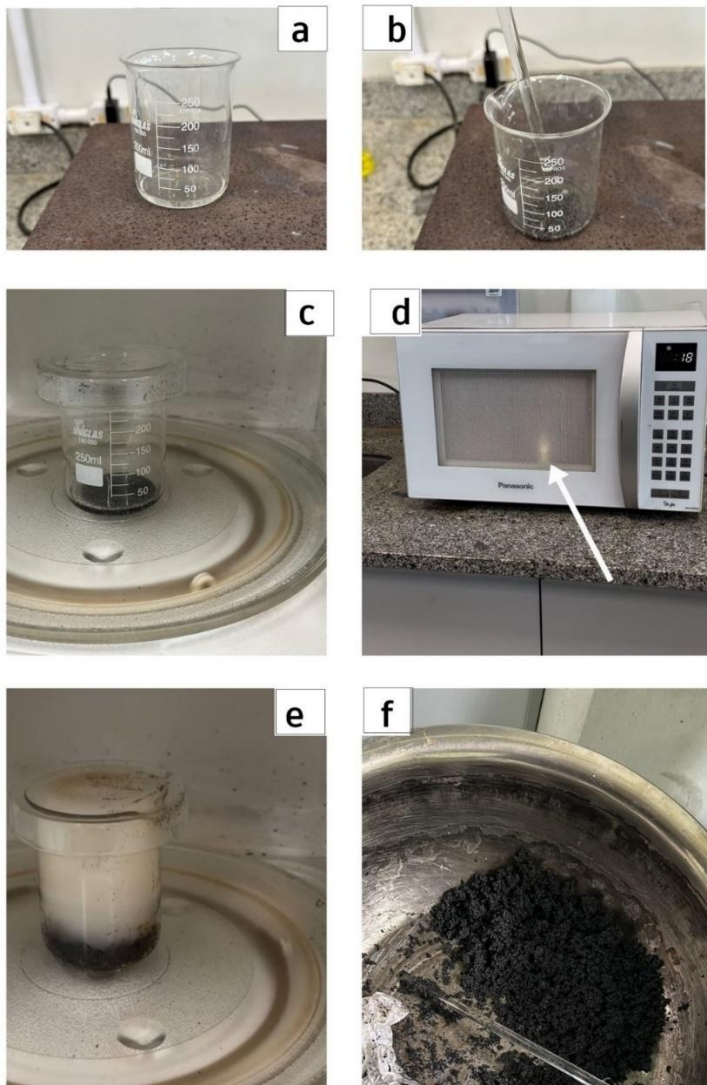
O cimento e as areias finas e grossas foram utilizados na produção das argamassas da mesma forma que foram obtidas. A parafina e o AcS foram encapsulados. Todas as atividades foram realizadas no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

4.2.1. Encapsulamento da parafina

A parafina foi fundida em um bquer de vidro, aquecida a 80 °C em uma chapa aquecedora. Em seguida, foi adicionado o grafite expansível à parafina fundida, sendo o sistema deixado em repouso para que o grafite se depositasse naturalmente no fundo do bquer. O bquer foi coberto com uma placa de Petri de vidro e, posteriormente, foi colocado em um forno de micro-ondas (Panasonic Style NN-ST654W), operando em potência máxima, sendo irradiado por 40 s. Durante a irradiação, o grafite absorveu a energia das micro-ondas e gerou calor localizado, expandiu-se parcialmente e produziu gases que expeliram o ar através do bico do bquer, impedindo a ignição da parafina. Simultaneamente, parte da parafina foi incorporada aos poros do grafite. Na sequência, o grafite e a parafina foram misturados uniformemente por aproximadamente 20 s e irradiados por mais 30 s. Esse ciclo de irradiação e agitação foi repetido até que se observasse a expansão completa do grafite. Esses parâmetros e o método de encapsulamento foi realizado conforme Li *et al.*, (2024).

A Figura 6 (a), (b), (c), (d), (e), (f) apresenta o processo de encapsulamento da parafina

Figura 6 - Etapas do encapsulamento da parafina (a) Parafina em estado líquido, (b) Acrescentado o grafite expansível, (c) bequer com a mistura e coberto com a placa de Petri no microondas, (d) irradiação com a expansão do grafite, (e) após processo de radiação no microondas, (f) final do processo com a parafina encapsulada pelo grafite.



Fonte: Do autor (2026).

A Tabela 4, apresenta a composição realizada para o encapsulamento da parafina no grafite expansível.

Tabela 4 - Composição do encapsulamento da parafina no grafite expansível.

Composição	Parafina (g)	Grafite expansível (g)	Formulações
8	18,4	1,6	(ArgP8g;10), (ArgP8g;15) e (ArgP8g;20)
11,5	17,7	2,3	(ArgP11,5g;10), (ArgP11,5g;15) e (ArgP11,5g;20)
15	17,0	3,0	(ArgP15g;10), (ArgP15g;15) e (ArgP15g;20)

Fonte: Do autor (2026).

Dessa forma, para uma composição total de 10 g foram utilizados 9,2 g de parafina e 0,8 g de grafite expansível. A amostra foi identificada pela nomenclatura P8g,10%, na qual “P” corresponde à parafina, “8g” refere-se à massa de grafite expansível utilizada na composição, e “10%” indica o teor de substituição parcial da areia pelo PCM nas argamassas. De maneira análoga, a nomenclatura P11,5g,15% refere-se à composição em que “P” corresponde à parafina, “11,5g” indica a massa de grafite expansível utilizada, e “15%” representa o teor de substituição parcial da areia pelo PCM nas argamassas. Para a formulação AcS,20%, “AcS” corresponde ao AcS, enquanto “20%” indica o teor de substituição parcial da areia pelo PCM nas argamassas. Para a realização do processo de encapsulamento, conforme apresentado na Tabela 4 as formulações foram duplicadas.

4.2.2. Encapsulamento do acetato de sódio

Para a realização do encapsulamento do AcS foi utilizada uma balança de massa da marca Pizzolo, modelo AC10K, com resolução de 0,1%, além de recipiente rígido de material não absorvente e espátula metálica com comprimento mínimo de 150 mm. Inicialmente, foram pesados 97 g de AcS, aos quais foi aplicado grafite em spray, manualmente, da marca Etaniz, até atingir 3 g, totalizando uma massa final de 100 g. Na sequência, foram aplicadas camadas de verniz em spray da marca Chemicolor com o objetivo de promover o encapsulamento do material. Para cada 1 kg de AcS, foram utilizados quatro tubos de verniz de 400 ml.

A Figura 7 apresenta os materiais utilizados no processo de encapsulamento do AcS, bem como o material após a etapa de encapsulamento.

Figura 7 - Encapsulamento do AcS.



Fonte: Do autor (2026).

4.3. CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

Os materiais foram caracterizados com o intuito de identificar suas principais características físicas, químicas e morfológicas. Foi realizado a análise da distribuição granulométrica, FRX, DRX, MEV e TG.

4.3.1 Distribuição granulométrica

O ensaio físico de distribuição granulométrica foi realizado por quartejamento seguido pelo peneiramento com objetivo de conhecer a dimensão das cápsulas utilizadas. A realização deste ensaio foi executada conforme os métodos padronizados pela Norma Brasileira (NBR) Norma Mercosul (NM) 248 (2003). Na qual se fez necessário alguns equipamentos bem como um conjunto de peneiras como apresentada na Figura 8 com aberturas de malha de 9,50 mm; 4,75 mm; 2,00 mm; 1,18

mm; 0,60 mm; 0,425 mm; 0,25 mm; 0,15 mm e 0,075 mm, conforme as granulometrias requeridas para a análise.

Figura 8 - Conjunto de peneiras de diferentes malhas para as granulometrias.



Fonte: Do autor (2026).

O ensaio de distribuição granulométrica foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

4.3.2. Fluorescência de Raios X (FRX)

Esse ensaio foi executado no cimento e na cal utilizados na produção das argamassas estudadas. A caracterização química foi realizada por espectrometria de FRX, utilizando o espectrômetro Epsilon 3^{XLE}, da Panalytical, com preparação de amostras na forma de pastilha fundida.

Os ensaios foram realizados no laboratório Safira Soluções Minerais LTDA.

4.3.3. Difração de Raios X (DRX)

Esta técnica foi realizada em todas as argamassas produzidas, no estado endurecido, utilizando amostras provenientes dos corpos de prova após a realização dos ensaios mecânicos de tração na flexão e compressão, com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes nos materiais constituintes das argamassas. Após o rompimento, os fragmentos foram submetidos à limpeza superficial com auxílio de pincel, visando à remoção de partículas soltas e resíduos aderidos, e posteriormente moídos até a obtenção de material pulverulento e homogêneo, para a análise mineralógica. As análises foram conduzidas em um difratômetro D6 PHASER, da Bruker, operando com radiação $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Os difratogramas foram obtidos em uma faixa de varredura de 2θ de 5° a 70° , com passo angular de $0,02^\circ$ e tempo de contagem compatível com a resolução do equipamento, conforme procedimentos usuais para caracterização de materiais cimentícios.

Os ensaios foram realizados no IPARQUE da UNESC.

4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada nos PCMs e nas argamassas de reboco produzidas, no estado endurecido, a partir de superfícies fraturadas após a realização dos ensaios mecânicos, permitindo a observação da microestrutura interna da matriz cimentícia em diferentes níveis de ampliação. Previamente às análises, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 40°C por um período de 1 h, com o intuito de remover a umidade residual, evitando, entretanto, possíveis alterações microestruturais dos materiais analisados. Em seguida, as amostras foram fixadas em suportes metálicos (*stubs*) de alumínio, utilizando fita condutiva de carbono. Para reduzir os efeitos de carregamento eletrostático durante a aquisição das imagens, as amostras foram recobertas com uma fina camada condutiva de ouro, por meio de metalização em sistema de sputtering, utilizando a unidade Hitachi MC1000 Ion Sputter / Carbon Coating Unit, operando sob condições controladas de vácuo.

As micrografias foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi TM4000Plus (Tabletop Microscope), operando com tensão de aceleração de 15 kV, corrente de feixe ajustada conforme a natureza do material e distância de trabalho de aproximadamente 10 mm. As imagens foram registradas em diferentes ampliações, permitindo a avaliação qualitativa da morfologia superficial, da estrutura porosa, da dispersão dos PCMs na matriz cimentícia e da heterogeneidade microestrutural das argamassas de reboco.

Ressalta-se que a análise por MEV teve caráter qualitativo e morfológico, não sendo realizadas análises químicas pontuais ou quantitativas das fases observadas. Assim, a interpretação dos resultados limitou-se à observação da morfologia e da microestrutura dos materiais.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Química Multiusuário (LabCQM) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC – Campus Criciúma).

4.3.5. Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria (ATD/TG)

4.3.5.1. Termogravimetria

O ensaio de caracterização térmica foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento térmico das argamassas de reboco quando submetidas a variações controladas de temperatura. Para a execução do ensaio, utilizou-se um equipamento da marca NETZSCH, modelo STA 449 F3 JUPITER. Os procedimentos experimentais foram conduzidos com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em uma faixa de temperatura compreendida entre 30 °C e 1000 °C, sob atmosfera controlada de gás nitrogênio com vazão de 60 mL/min. Os ensaios foram realizados no laboratório MultiLAB CECAM.

4.3.5.2. Ensaio de ciclagem térmica dos PCMs

Os PCMs foram submetidos a um ensaio de ciclagem térmica, com o objetivo de avaliar sua estabilidade térmica quando expostos a sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento dentro da faixa de temperatura de interesse para aplicações em edificações. A ciclagem térmica consistiu na submissão dos PCMs a 50 ciclos térmicos, com variação de temperatura entre 30 °C e 70 °C, utilizando-se taxa de aquecimento e resfriamento de 2 °C/min, sob atmosfera sintética,

mantendo-se fluxo de gás de 20 mL/min. Esse procedimento teve como finalidade verificar a ocorrência de perdas de massa, degradação térmica ou alterações no comportamento dos PCMs ao longo dos ciclos. Os ensaios foram realizados no laboratório MultiLAB CECAM.

4.4 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

As misturas dos componentes seguiram padrões de dosagens e misturas para a obtenção das argamassas. Todas as atividades foram realizadas no IPARQUE da UNESC.

4.4.1. Dosagem e procedimentos de mistura

A Tabela 5 apresenta a composição dos experimentos de argamassa de reboco produzidas de acordo com a NBR 7215:2019, com as substituições parciais da areia normal por PCMs. A areia normal foi constituída por 25% da areia normal nº 100, 25% da areia normal nº 50, 25% da areia normal nº 30 e 25% da areia normal nº 16.

Tabela 5 - Composição dos componentes das argamassas que foram produzidas

Experi- mento	Matérias-primas (g)					
	Cimento CPIV	Cal hidra- tada	Areia normal (*)	Parafi- na	AcS	Água
Arg _{ref}	624±0,4	624±0,4	1.872 ± 0,3	-	-	710 ± 0,2
Arg _{p8g;10}	624±0,4	624±0,4	1.684,8 ± 0,3	187,2 ± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p8g;15}	624±0,4	624±0,4	1.591,2 ± 0,3	280,8± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p8g;20}	624±0,4	624±0,4	1.497,6 ± 0,3	374,4± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p11,5g;10}	624±0,4	624±0,4	1.684,8 ±0,3	187,2 ± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p11,5g;15}	624±0,4	624±0,4	1.591,2 ± 0,3	280,8± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p11,5g;20}	624±0,4	624±0,4	1.497,6 ± 0,3	374,4± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p15g;10}	624±0,4	624±0,4	1.684,8 ±0,3	187,2 ± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p15g;15}	624±0,4	624±0,4	1.591,2 ± 0,3	280,8± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{p15g;20}	624±0,4	624±0,4	1.497,6 ± 0,3	374,4± 0,2	-	710 ± 0,2
Arg _{AcS;10}	624±0,4	624±0,4	1.684,8 ±0,3	-	187,2 ± 0,2	710 ± 0,2
Arg _{AcS;15}	624±0,4	624±0,4	1.591,2 ± 0,3	-	280,8± 0,2	710 ± 0,2
Arg _{AcS;20}	624±0,4	624±0,4	1.497,6 ± 0,3	-	374,4± 0,2	710 ± 0,2

OBSERVAÇÕES:

(*) A areia normal foi constituída de 25% da areia normal nº 100, 25% da areia normal nº 50, 25% da areia normal nº 30 e 25% da areia normal nº 16.

Fonte: Do autor (2026).

As misturas foram produzidas com substituições de 10, 15 e 20% de PCMs. Os procedimentos de mistura, moldagem e cura dos corpos de prova das argamassas cimentícias foram padronizados de acordo com a ABNT NBR 16541. Para a execução das misturas foi utilizada uma

argamassadeira com capacidade de 5 litros, da marca EMIC, modelo AG-5, bem como uma balança semianalítica da marca PIZZOLLO, modelo AC10K. Todas as matérias-primas foram pesadas individualmente antes do início do processo de mistura.

Inicialmente, os ingredientes secos (cimento CP IV, areia normal e cal) foram previamente homogeneizados. Em seguida, 75% da água de amassamento foi introduzida no recipiente da argamassadeira, que foi acionada em rotação baixa (140 ± 5 rpm) por 30 s. Após esse período, a rotação foi alterada para rotação máxima (285 ± 10 rpm), mantendo-se a mistura por 60 s.

Na sequência, o equipamento foi desligado e a argamassa permaneceu em repouso por 90 s, período durante o qual foi realizada a raspagem do fundo e das laterais do recipiente, conforme procedimento normativo. Finalizado o repouso, os 25% restantes da água de amassamento foram adicionados com a argamassadeira em rotação baixa (140 ± 5 rpm) por 30 s. Por fim, a mistura foi submetida a rotação máxima (285 ± 10 rpm) por mais 60 s, concluindo o processo de preparo da argamassa. Nos traços contendo substituição parcial da areia normal por cápsulas de parafina e AcS, esses materiais foram misturados por 30 s na rotação baixa (140 ± 5 rpm) após a finalização da mistura, garantindo distribuição uniforme.

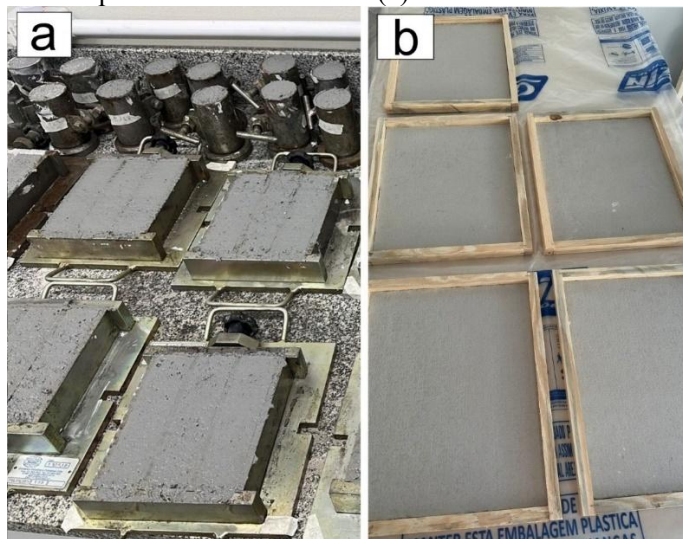
4.4.2 Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura

Quanto aos procedimentos de moldagem dos corpos de provas para os ensaios, foram produzidos, para cada traço, seis (6) corpos de prova em molde prismático normalizado de $40 \times 40 \times 160$ mm, dos quais três (3) foram destinados aos ensaios de resistência à tração na flexão, realizados aos 28 dias. Cada corpo de prova, após a ruptura no ensaio de flexão, gerou duas metades, sendo cada uma delas utilizada posteriormente para o ensaio de resistência à compressão. Os outros três (3) corpos de prova prismáticos foram utilizados para o ensaio de absorção de água por capilaridade, também realizado aos 28 dias. Todos os corpos de prova prismáticos foram moldados por meio da execução de duas camadas de argamassa, compactadas com 30 golpes da mesa vibratória em cada camada.

Foram confeccionados, adicionalmente, três (3) corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 50×100 mm (diâmetro $\times$ altura), destinados aos ensaios de porosidade. Esses corpos de prova foram moldados em quatro camadas de argamassa, compactadas manualmente com soquete metálico normal, aplicando-se 30 golpes em cada camada.

Para a realização dos ensaios térmicos, foram confeccionados painéis com dimensões de $420 \times 340 \times 20$ mm (largura $\times$ altura $\times$ espessura). Para o fundo dos painéis, foi utilizada uma placa plana de fibrocimento, a qual foi revestida com argamassa. A espessura final de 20 mm foi garantida por meio da confecção de uma moldura com pinos. A moldagem dos painéis foi realizada em camada única, de forma análoga ao processo de aplicação de reboco em campo, sendo a superfície regularizada pela retirada do excesso de material, garantindo acabamento uniforme. A Figura 9 (a) e (b), apresenta moldagem das amostras em corpos de prova em molde prismático, cilíndricos e os painéis.

Figura 9 - Moldagem dos corpos de provas utilizadas para os ensaios (a) Moldes prismático e cilíndrico e (b) Painéis.



Fonte: Do autor (2026).

O processo de cura de todos os corpos de prova foi realizado em ambiente laboratorial, sob condições controladas de temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5) \%$ por um período de 28 dias.

Os procedimentos de mistura, moldagem e cura dos corpos de prova de argamassas cimentícias foram realizados no LMCC.

4.5. CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios para determinar as propriedades físicas das argamassas no estado fresco foram realizados conforme as prescrições estabelecidas nas normas vigentes, especificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaios realizados nas argamassas no estado fresco

Propriedade	Método	NBR
Densidade de massa e teor de ar incorporado	Molde cilíndrico	13278:2005
Índice de consistência	Mesa de consistência	13276:2016
Retenção de água	Funil Büchner	13277:2005

Fonte: Do autor (2026).

4.5.1. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado foram obtidos por meio da execução dos procedimentos padronizados pela ABNT NBR 13278 (2005, p. 1 até 4). Para a realização do ensaio, foram utilizados uma balança de massa da marca PIZZOLLO, modelo AC10K, com resolução de 0,1%, recipiente rígido cilíndrico, de material não absorvente, espátula metálica com comprimento mínimo de 150 mm e largura de 20 mm, além de placa de vidro plana e transparente, de seção quadrada, com 100 mm de lado e 3 mm de espessura.

Após o preparo das argamassas de reboco, estas foram introduzidas suavemente no recipiente cilíndrico, com o auxílio de uma colher, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes com a espátula, posicionada verticalmente. Concluída a moldagem das camadas, foram realizadas três quedas do recipiente a uma altura aproximada de 30 mm. Na sequência, o recipiente contendo a argamassa foi rasado por meio de duas passadas ortogonais entre si com a espátula, executando-se movimentos de vaivém com inclinação de 45° em relação à superfície.

A Figura 10 apresenta o ensaio de densidade de massa no estado fresco que relaciona a massa que uma argamassa fresca ocupa dentro de um recipiente cilíndrico de peso e volume conhecido.

Figura 10 - Densidade de massa no estado fresco



Fonte: Do autor (2026).

A densidade de massa foi obtida por meio da Equação 1.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

m_c = Massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (g);

m_v = Massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v_r = Volume do recipiente cilíndrico (cm³);

d = Densidade de massa da argamassa (kg/m³).

O teor de ar incorporado foi obtido por meio da Equação 2.

$$A = \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

d = Densidade de massa da argamassa (kg/m³);

d_t = Densidade de massa teórica da argamassa (g/cm³).

A Equação 3 apresenta a fórmula para a obtenção da densidade de massa teórica da argamassa (dt).

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{\frac{m_s}{\gamma_s} + m_{\text{água}}} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

m_s = Massa da argamassa anidra (g);

$m_{\text{água}}$ = Massa da água que compõe a argamassa fresca (g);

γ_s = Massa específica da argamassa anidra (NBR 16605, 2017, p. 1 até 4).

O ensaio para a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado foi realizado no LMCC.

4.5.2. Índice de consistência

O índice de consistência das argamassas foi determinado de acordo com os procedimentos padronizados da NBR 13276 (2016, p. 1 até 2). Para a realização deste ensaio, foram utilizados a mesa para determinação do índice de consistência, molde metálico tronco-cônico, soquete metálico, régua metálica e paquímetro para medições de até 300 mm, com resolução de 1 mm. No ensaio, foi utilizada a argamassa produzida para a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos. Antes do início do procedimento, o tampo da mesa de consistência e a parede interna do molde tronco-cônico foram devidamente limpos. A argamassa foi introduzida no molde tronco-cônico, previamente posicionado no centro da mesa de consistência. O procedimento de moldagem consistiu em segurar firmemente o molde e preenchê-lo com a argamassa cimentícia em três camadas sucessivas, de alturas aproximadamente iguais, aplicando-se quinze, dez e cinco golpes com o soquete metálico, respectivamente, de forma uniforme. O rasamento da argamassa foi realizado por meio da passagem da régua metálica rente à borda superior do molde tronco-cônico, utilizando movimentos curtos de vaivém ao longo da superfície. Em seguida, foram removidas eventuais partículas de argamassa ao redor do molde com pano seco e limpo. Na sequência, o molde tronco-cônico foi retirado verticalmente, e a manivela da mesa foi acionada de modo que a mesa realizasse 30 elevações e quedas em um período de 30 s. Após a última queda, foi utilizado o paquímetro para medir o diâmetro do espalhamento da argamassa. A Figura 11 apresenta o ensaio de índice de consistência realizado nas argamassas de reboco.

Figura 11 – Equipamento para índice de consistência realizado nas argamassas de reboco.



Fonte: Do autor (2026).

Este ensaio foi realizado no LMCC.

4.5.3. Retenção de água

O ensaio de retenção de água teve como objetivo avaliar o desempenho da argamassa quanto à sua capacidade de reter água durante o processo de hidratação. Os procedimentos para a realização desse ensaio foram padronizados conforme a ABNT NBR 13277 (2005, p. 1–3). Para a execução do ensaio, foram utilizados funil de Büchner, discos de papel-filtro com 200 mm de diâmetro, bomba a vácuo da marca Primatec, modelo 132, soquete metálico, régua metálica bisotada com 300 mm de comprimento, balança de massa da marca PIZZOLLO, modelo AC10K, com resolução de 0,1%, e cronômetro digital.

A realização do ensaio envolveu o uso das argamassas cimentícias produzidas para a moldagem dos corpos de prova empregados nos ensaios mecânicos, além dos procedimentos executivos padronizados pela NBR 13277 (2005, p. 2). A Figura 12 apresenta o equipamento funil de Büchner utilizado para o ensaio de retenção de água.

Figura 12 - Equipamento para ensaio de retenção de água realizados nas argamassas de reboco.



Fonte: Do autor (2026).

Para o cálculo da retenção, determinou-se, inicialmente, o peso do conjunto funil/papel filtro úmido (após sucção por 90s), o peso do prato do funil preenchido com argamassa adensada com 37 golpes de soquete e, por fim, o peso da argamassa após 15 min de sucção de 51mm de mercúrio. O resultado da retenção de água foi obtido por meio das Equações 4 e 5.

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF \times (m_a - m_v)} \right] \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

m_a = Massa do conjunto com argamassa (g);

m_s = Massa do conjunto após a sucção (g);

m_v = Massa do conjunto vazio (g);

AF = Fator água/argamassa fresca;

m_w = Massa total de água acrescentada à mistura (g);

m = Massa da argamassa industrializada (g).

Este ensaio foi realizado no LMCC.

4.6. CARACTERIZAÇÕES FÍSICA DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios para determinar as propriedades das argamassas de reboco no estado endurecido foram realizados de acordo as normas vigentes, utilizando corpos de prova com 28 dias de cura, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido.

Propriedade	Método	NBR
Porosidade	Absorção de água por imersão	9778:2009
Coeficiente de capilaridade	Absorção de água por capilaridade	15259:2005
Resistência à tração na flexão	Prensa	13279:2005
Resistência à compressão	Prensa	13279:2005

Fonte: Do autor (2026).

4.6.1. Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado com o objetivo de determinar a capacidade da argamassa de reboco em absorver água do meio externo para o meio interno, por meio dos vazios existentes em sua estrutura porosa. De modo geral, quanto menor a porosidade da argamassa, menor tende a ser a quantidade de água absorvida, resultando em menores índices de absorção e, consequentemente, em melhor desempenho mecânico e durabilidade.

O ensaio foi realizado em corpos de prova curados por 28 dias. Para a avaliação da absorção de água, os corpos de prova foram inicialmente escovados, com o intuito de remover pó e partículas soltas, e, em seguida, imersos em água à temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 24 h. Após a imersão, os corpos de prova foram drenados sobre uma tela metálica por 1 min e secos com pano úmido, de modo a remover a água superficial visível, sendo então pesados individualmente. Posteriormente, os corpos de prova saturados foram encaminhados para secagem em estufa à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, permanecendo por 72 h. As massas foram novamente verificadas caracterizando a condição de massa seca.

Os ensaios foram realizados no LMCC. A absorção de água foi determinada por meio da Equação 6.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

M_{sat} = Massa do corpo-de-prova saturado (g);

M_s = Massa do corpo-de-prova seco em estufa (g).

4.6.2. Ensaio de índice de vazios

O ensaio de índice de vazios foi realizado nas argamassas de reboco com o objetivo de determinar a quantidade de poros existentes em sua estrutura, parâmetro diretamente relacionado à absorção de água, durabilidade e desempenho mecânico do material. Foram utilizados corpos de prova com 28 dias de cura, os quais foram inicialmente submetidos à secagem em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, por um período de 72 h, até a obtenção de massa seca constante. Em seguida, os corpos de prova foram pesados, para determinação da massa seca, e posteriormente imersos em água por 72 h. A etapa final de saturação foi realizada em recipiente contendo água em ebulição, no qual os corpos de prova permaneceram por 5 h, sendo então mantidos imersos até o resfriamento natural da água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, garantindo a completa saturação dos poros.

Após esse procedimento, determinou-se a massa do corpo de prova saturado imerso em água, com o auxílio de balança hidrostática. Na sequência, os corpos de prova foram retirados da água, secos superficialmente com pano úmido, e novamente pesados, para obtenção da massa do corpo de prova saturado em condição superficial seca.

A Figura 13 (a) e (b), apresenta as amostras dos corpos de prova de argamassa de reboco durante as etapas do ensaio, sendo ilustrados, respectivamente, o processo em forno e o banho-maria

Figura 13 - Amostras dos corpos de provas de argamassa de reboco para os ensaios de porosidade (a) Forno (b) Banho maria.



Fonte: Do autor (2026).

Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

O índice de vazios foi obtido por meio da Equação 7.

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Em que

I_v : índice de vazios (%);

M_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

M_s : massa da amostra seca em estufa (g);

M_i : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

4.6.3. Ensaio de massa específica aparente seca

Esse ensaio foi realizado com o objetivo de determinar as possíveis diferenças de massa específica aparente seca entre as argamassas de reboco estudadas. Foram utilizados corpos de prova com 28 dias de cura, empregando-se os mesmos equipamentos e procedimentos adotados nos ensaios de absorção de água e índice de vazios. O ensaio foi conduzido de acordo com os procedimentos padronizados pela ABNT NBR 9778 (2009).

Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

Os valores da massa específica aparente seca ($M_{\text{esp.seca}}$) foram obtidos através da aplicação da Equação 8.

$$M_{\text{esp.seca}} = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad \text{Equação 8}$$

4.6.4. Coeficiente de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), aos 28 dias de idade. Primeiramente, os corpos-de-prova foram lixados e limpos. Posteriormente, foi determinado as massas secas das amostras e, após serem imersas em uma lâmina de água de 5 mm, foram obtidas as massas aos 10 e 90 min de ensaio. A Figura 14 apresenta o ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova de argamassa de reboco.

Figura 14 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de reboco.



Fonte: Do autor (2026).

Os valores de absorção de água foram determinados por meio da Equação 9.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad \text{Equação 9}$$

Em que

A_t é a absorção de água por capilaridade para cada tempo (g/cm^2);

M_t é a massa do corpo de prova em cada tempo (g);

M_0 é a massa inicial do corpo de prova (g);

T é o tempo de 10 min e 90 min (s);
16 é a área do corpo de prova (cm²).

O ensaio de absorção de água foi realizado no LMCC.

4.6.5. Resistência à tração na flexão

Os ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão das argamassas de reboco apresentada na Figura 15, foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 13279 (2005, p. 1 até 9). O rompimento dos corpos de prova ocorreu aos 28 dias de cura, utilizando-se uma prensa universal EMIC, modelo DL 10000, com aplicação de carga a uma velocidade constante de (50 ± 5) N/s.

Figura 15 - Resistência à tração na flexão no corpo de prova de argamassa para reboco.



Fonte: Do autor (2026).

O resultado da resistência à tração na flexão foi obtido por meio de Equação 10.

$$R_f = \frac{1,5 F_t L}{40^3}$$

Equação 10

Em que:

R_f é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_t é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L é a distância entre os suportes (mm).

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado no LMCC.

4.6.6. Resistência à compressão

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão das argamassas de reboco apresentada na Figura 16, foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 13279 (2005, p. 1 até 9). O rompimento dos corpos de prova ocorreu em uma prensa universal EMIC, modelo DL 10000, respeitando-se uma velocidade constante de aplicação de carga de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s.

Figura 16 - Resistência à compressão no corpo de prova de argamassa para reboco.



Fonte: Do autor (2026).

Os valores de resistência à compressão foram determinados por meio da Equação 11.

$$R_c = \frac{F_c}{A_n}$$

Equação 11

Em que

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c é a carga máxima aplicada (N);

A_n é a área nominal de seção transversal do corpo de prova (mm²).

O ensaio de resistência de compressão foi realizado LMCC.

4.7. SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS PARA OS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO

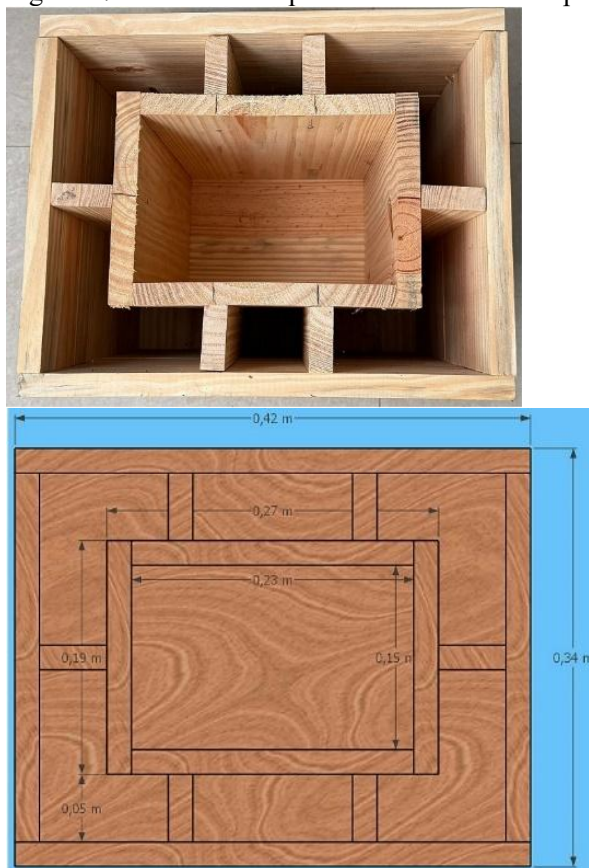
Inicialmente, foram produzidos 13 traços de argamassas de reboco, sendo uma argamassa de referência e 12 argamassas modificadas com a incorporação de PCM, variando-se o tipo e o teor de substituição parcial da areia normal. Todas as composições foram submetidas aos ensaios no estado fresco e no estado endurecido. A partir da análise dos resultados obtidos, com ênfase no comportamento mecânico, especialmente na resistência à compressão, realizou-se a seleção das composições a serem avaliadas nos ensaios de desempenho térmico. Esse procedimento teve como objetivo assegurar que apenas as argamassas com desempenho físico-mecânico compatível com a aplicação como revestimento fossem submetidas à avaliação térmica.

4.8. ENSAIOS TÉRMICOS

Para a avaliação do comportamento térmico das argamassas de reboco foi utilizado um aparato térmico desenvolvido especificamente para os ensaios, com o objetivo de simular uma fachada de edificação e um ambiente interno, permitindo avaliar a capacidade de isolamento térmico das argamassas e sua contribuição para a melhoria do conforto térmico.

O ensaio foi realizado em uma caixa de madeira de pinus aplainado, conforme as dimensões apresentadas na Figura 17. As placas de madeira utilizadas possuíam espessura de 2 cm. O comprimento da caixa maior (externa) foi de 42 cm x 34 cm, enquanto a caixa menor (interna) foi de 27 cm x 19 cm.

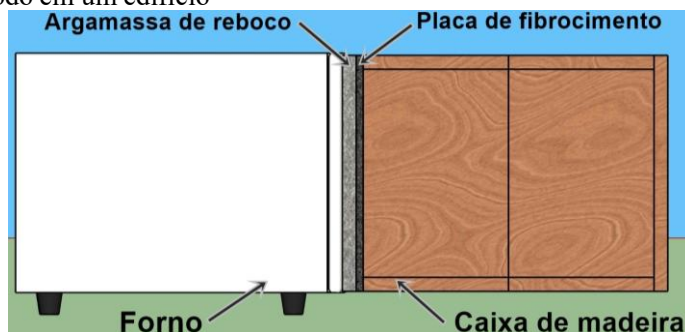
Figura 17 - Medidas do aparato térmico utilizado para ensaio



Fonte: Do autor (2026).

A face frontal, mantida aberta, foi submetida à incidência de calor, conforme ilustrado na Figura 18. Essa face foi constituída por uma placa de fibrocimento revestida com argamassa de reboco, aplicada com espessura de 20 mm. Para a simulação da fonte de calor correspondente à incidência solar, utilizou-se um forno da marca Fischer, modelo Gourmet Grill Inox (9741-17875), com potência nominal de 1750 W, ajustado para temperatura constante de 70 °C, durante 1 h e 30 min, com o objetivo de representar uma condição crítica de temperatura típica de períodos de verão de acordo com Meurer *et al.*, (2024) e Pizzatto (2020).

Figura 18 - Aparato térmico para ensaio simulando uma fachada e um cômodo em um edifício

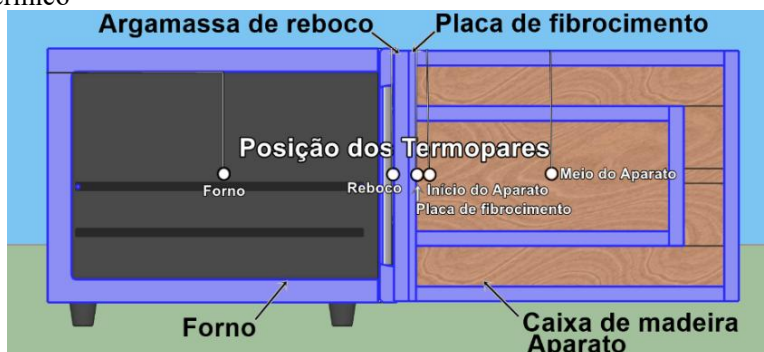


Fonte: Do autor (2026).

O ambiente interno do laboratório foi mantido sob condições controladas, com temperatura de aproximadamente 21 °C, a fim de minimizar interferências externas e garantir a reprodutibilidade dos resultados. O monitoramento e o armazenamento dos dados de temperatura foram realizados por meio de um FieldLogger – *Data Logger* Industrial Multicanais (Novus). O sistema foi acoplado a termopares do tipo K, posicionados conforme a Figura 19 no centro do forno, nas faces externa (reboco) e interna (placa de fibrocimento) da parede no início do aparato experimental e no centro do aparato experimental simulando o ponto central do cômodo, todos os termopares localizados no ponto central das respectivas superfícies.

Os ensaios térmicos foram realizados no IPARQUE da UNESC.

Figura 19 - Localização em corte dos termopares no aparato para ensaio térmico



Fonte: Do autor (2026).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados alcançados nesta pesquisa são apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na sequência, são apresentadas as caracterizações do cimento, da cal e dos PCMs utilizados na fabricação das argamassas de reboco analisadas neste estudo.

5.1.1. Caracterização do cimento

5.1.1.1. Análise química do cimento

Os resultados obtidos da análise química por FRX do cimento anidro mostram que sua maior parte (53,7%) é composta por de óxido de cálcio (CaO). A Tabela 8 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 8 - Análise química do cimento.

COMPOSTO	QUANTIDADE (%)
CaO	53,7
SiO ₂	33,5
MgO	6,3
P.F.	4,9
Na ₂ O	0,9
K ₂ O	0,4
Fe ₂ O ₃	0,2
SO ₃	0,1

Fonte: Do autor (2026).

A quantidade do composto óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO₂) apresentada na Tabela 8, se assemelha à quantidade identificada do cimento Portland utilizado na pesquisa de (Borges; Melo Neto; Mendonça, 2021) sendo de 45,7% e 29,1%, respectivamente. De maneira geral, a análise por FRX confirma que o cimento CP IV utilizado apresenta composição química compatível com sua classificação normativa ABNT NBR 16697:2018, sendo adequado para aplicação em argamassas de revestimento externo.

5.1.2. Caracterização da cal

5.1.2.1. Análise química da cal

Os resultados obtidos da análise química por FRX do cimento anidro mostram 37,9% de óxido de cálcio (CaO). A Tabela 9 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 9 - Análise química da cal.

COMPOSTO	QUANTIDADE (%)
CaO	37,9
P.F.	29,0
MgO	25,5
SiO ₂	6,4
Na ₂ O	0,6
K ₂ O	0,3
Fe ₂ O ₃	0,2
SO ₃	0,1

Fonte: Do autor (2026).

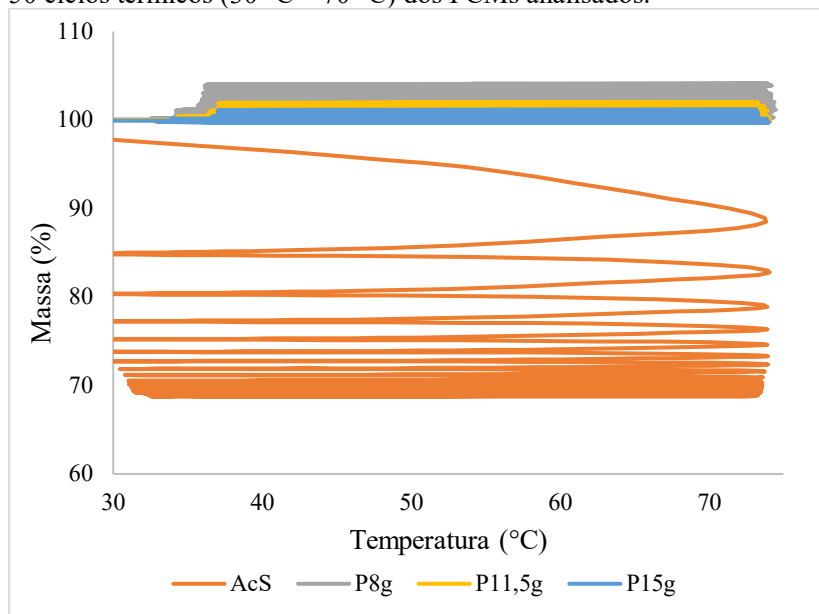
A quantidade do composto óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) apresentados na Tabela 9 se assemelha à quantidade identificada da Cal Hidratada na pesquisa de Batista *et al.*, (2016) sendo de 49,35 % e 26,45% respectivamente. A presença significativa de óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) evidenciam uma composição típica de cal dolomítica. Esta composição favorece a utilização desta cal para produção de argamassas de assentamento e revestimento, contribuindo para a trabalhabilidade, a aderência e a durabilidade do sistema (SILVA, 2006).

5.1.3. Caracterização dos PCMs

5.1.3.1. Ciclagem térmica

A Figura 20 apresenta os resultados do ensaio de ciclagem térmica dos PCMs, realizado entre 30°C e 70°C por 50 ciclos, com monitoramento da variação de massa em função da temperatura.

Figura 20 - Variação da massa relativa em função da temperatura durante 50 ciclos térmicos (30 °C – 70 °C) dos PCMs analisados.



Fonte: Do autor (2026).

Observa-se que os PCMs à base de parafina (P8g, P11,5g e P15g) apresentaram comportamento estável ao longo dos ciclos térmicos, mantendo a massa praticamente constante, próxima de 100%, sem tendência de perda acumulada. Esse resultado indica elevada estabilidade térmica e química desses materiais na faixa de temperatura de interesse para aplicações em edificações, evidenciando sua adequação para uso em argamassas de reboco com função de armazenamento térmico. Esse comportamento está de acordo com resultados apresentados por Costa (2014), nos quais PCMs parafínicos apresentam elevada estabilidade ao longo de ciclos sólido-líquido prolongados. Nesse mesmo estudo, envolvendo parafinas puras, microencapsuladas e impregnadas em matrizes porosas, foi observada a manutenção da geometria, da capacidade calorífica e da massa mesmo após um elevado número de ciclos térmicos, podendo ultrapassar 1000 ciclos sem ocorrência de degradação.

Já o PCM à base de AcS apresentou redução progressiva da massa até aproximadamente o décimo ciclo térmico, indicando instabilidade térmica do material, associada aos processos de

superresfriamento pós evaporação d'água no aquecimento, resultando na recristalização do sal (Dong *et al.*, 2022).

5.1.3.2 Análise granulométrica

Os resultados obtidos do ensaio de distribuição granulométrica realizado nos PCMs utilizados na argamassa de reboco são apresentados na Tabela 10, no qual o diâmetro máximo dos PCMs foi de 4,75 mm, além disso contempla as porcentagens retidas e retidas acumuladas em cada peneira e o valor do módulo de finura de cada PCM.

Tabela 10 - Distribuição da composição granulométrica dos PCM's utilizados na argamassa de reboco.

Pe- neira	P8g		P11,5g		P15g		AcS		Areia padrão (NBR 7215)
	% Ret. *	% Acu m.**	% Ret. *	% Acu m.**	% Ret. *	% Acu m.**	% Ret. *	% Acu m.**	
4,75	29	29	20,6	20,6	12,5	12,5	1,7	1,7	-
2,00	53,4	82,4	50,6	71,2	46,2	58,7	31,8	33,5	-
1,18	10,1	92,5	16,5	87,7	23,2	81,9	29	62,5	-
0,60	6,0	98,5	9,6	97,3	14,5	96,4	30,5	93	-
0,425	1,0	99,5	1,9	99,2	2,7	99,1	5,6	98,6	-
0,25	0,4	99,9	0,7	99,9	0,8	99,9	1,3	99,9	-
0,15	0,1	100	0,10	100	0,1	100	0,1	100	-
0,075	-	-	-	-	-	-	-	-	-
fundo	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOT	-	100	-	100	-	100	-	100	-
AL									
MF***	5,02		4,77		4,49		3,91		
DMáx	4,75		4,75		4,75		2,00		2,4
DMmín	1,18		1,18		1,18		0,6		0,3

* Retido **Acumulado *** Módulo de finura

Fonte: Do autor (2026).

Os resultados da análise granulométrica evidenciam diferenças entre os PCMs avaliados, especialmente no que se refere à finura e à distribuição do tamanho das partículas. O módulo de finura foi de 5,02 para o P8g, 4,77 para o P11,5g, 4,49 para o P15g e 3,91 para o AcS, indicando uma redução progressiva da granulometria média dos materiais, sendo o AcS aproximadamente 22% mais fino que o P8g.

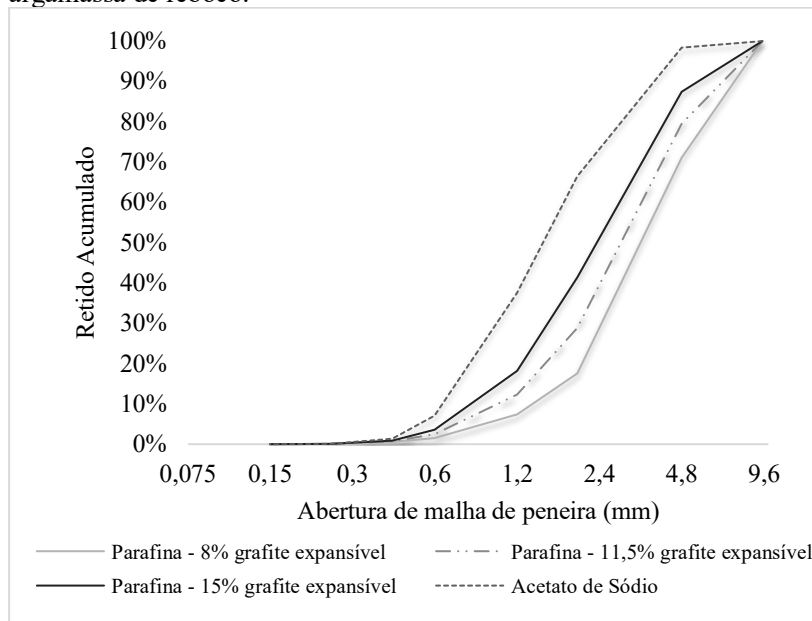
Além disso, observa-se que a fração retida na peneira de 2,00 mm foi de 53,4% para o P8g, 50,6% para o P11,5g e 46,2% para o P15g,

enquanto o AcS apresentou apenas 31,8%, evidenciando sua maior concentração de partículas finas. De forma complementar, na peneira de 0,60 mm, o AcS apresentou 30,5% de material retido, valor superior ao observado para o P8g (6,0%), P11,5g (9,6%) e P15g (14,5%), reforçando sua natureza mais fina e contínua.

Essas diferenças granulométricas são relevantes para a interpretação do comportamento das argamassas de reboco desenvolvidas, uma vez que a redução do tamanho de partícula aumenta a área superficial específica, elevando a demanda de água, favorecendo a retenção de ar e alterando a porosidade da matriz, influenciando diretamente as propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas (Wu *et al.*, 2026).

A Figura 21 apresenta as curvas granulométricas correspondentes, construídas a partir dos dados apresentados na Tabela 10.

Figura 21 - Curvas granulométricas dos PCMs utilizados na argamassa de reboco.



Fonte: Do autor (2026).

A partir da análise das curvas granulométricas da Figura 21, observa-se que os PCMs à base de parafina com adição de grafite expansível apresentam distribuição granulométrica predominantemente

mais grossa, com maior concentração de partículas nas peneiras de 4,75 mm e 2,00 mm, comportamento que se intensifica com a redução do teor de grafite expansível. Esse comportamento está associado à estrutura lamelar e porosa do grafite expansível, que influencia a formação e a fragmentação das cápsulas (Wang, Jin *et al.*, 2025; Zheng *et al.*, 2024).

Já o AcS apresenta distribuição granulométrica mais fina e contínua, com maior presença de partículas nas peneiras intermediárias e inferiores, evidenciando uma granulometria mais uniforme e de menor tamanho médio em relação aos PCMs parafínicos.

A Figura 22 apresenta os diferentes PCMs de parafina com variação de teor de grafite e o PCM de AcS utilizados na argamassa de reboco.

Figura 22 - PCMs utilizados na argamassa de reboco.



Fonte: Do autor (2026).

5.2. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REBOCO NO ESTADO FRESCO

5.2.1. Densidade da massa no estado fresco e Teor de Ar incorporado

A Tabela 11 apresenta os resultados de densidade da massa no estado fresco e teor de ar incorporado das argamassas de reboco.

Tabela 11 - Densidade da massa e teor de ar incorporado das argamassas de reboco.

Experimento	Densidade da massa (kg/m ³)	Teor de Ar incorporado (%)
Ref.	2.030,71	1,05
P8g, 10%	1.828,81	3,99
P8g, 15%	1.690,48	8,50
P8g, 20%	1.625,48	9,38
P11,5g, 10%	1.764,76	7,35
P11,5g, 15%	1.703,57	7,79
P11,5g, 20%	1.636,19	8,78
P15g, 10%	1.775,95	6,77
P15g, 15%	1.673,81	9,40
P15g, 20%	1.559,52	13,06
AcS 10%	2.025,00	1,42
AcS 15%	1.975,48	3,12
AcS 20%	1.944,76	4,16

Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Tabela 11 percebe-se que os experimentos Ref. e AcS 10% apresentaram os maiores resultados de densidade de massa (2.030,71 kg/m³ e 2.025,00 kg/m³, respectivamente) e os menores resultados de teor de Ar incorporado (1,05% e 1,42%, respectivamente). As partículas dos agregados secos, com menores tamanhos de partículas (Areia padrão D_{máx} = 2,40 mm e D_{mín} = 0,3 mm; partículas de AcS D_{máx} = 2,00 mm e D_{mín} = 0,6 mm) contribuíram para o melhor empacotamento, reduzindo espaços vazios, implicando no aumento da densidade e diminuição do ar incorporado (Jochem *et al*, 2020, p. 3).

Quanto aos experimentos contendo parafina encapsulada, esses apresentaram um aumento progressivo do teor de ar incorporado com o acréscimo do teor de substituição do agregado pelo PCM (P8g 10%, P8g 15% e P8g 20%, teores de ar incorporado de 3,99%, 8,50% e 9,38% respectivamente; P11,5g 10%, P11,5g 15% e P11,5g 20%, teores de ar incorporado 7,35%, 7,79% e 8,78% respectivamente; P15g 10%, P15g 15% e P15g 20% com teores de ar incorporado 6,77%, 9,40% e 13,06% respectivamente). Esse comportamento está associado às alterações no empacotamento granulométrico e às características superficiais das partículas incorporadas à matriz. Os agregados secos de areia padrão (D_{máx} = 2,40 mm e D_{mín} = 0,3 mm) foram parcialmente substituídos por partículas maiores de parafina encapsulada (D_{máx} = 4,75 mm e D_{mín} = 1,18 mm). A inclusão de partículas maiores pode ter dificultado o empacotamento das partículas, implicando em maiores teores de ar

incorporado e, conseqüentemente, menor densidade (Jochem *et al*, 2020; p. 3).

O aumento da densidade de massa das argamassas está diretamente associado à redução do teor de ar incorporado. Nas argamassas contendo parafina encapsulada, observa-se uma diminuição progressiva da densidade (de 1.828,81 kg/m³ para 1.559,52 kg/m³, redução de até 23,20 % em comparação à referência) com o aumento do teor de PCM e de grafite expansível. Esse comportamento está relacionado tanto à menor densidade desses materiais em comparação ao agregado quanto ao maior aprisionamento de ar na matriz.

As argamassas com AcS apresentaram os valores de densidade da massa variando entre 1.944,76 e 2.025,00 kg/m³ que permaneceram próximos aos da argamassa de referência de 2.030,71 kg/m³, enquanto o teor de ar incorporado manteve-se com valores mais próximos ao traço de referência.

De acordo com os resultados obtidos para a densidade de massa no estado fresco, todas argamassas produzidas foram qualificadas ao uso, segundo NBR 13281-1:2023, por apresentarem valores superiores à 1.400,00 kg/m³.

5.2.2. Índice de consistência

A Tabela 12 apresenta os resultados do índice de consistência das argamassas de reboco.

Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas.

Experimento	Índice de consistência médio (mm)
Ref.	256,9 ± 0,04
P8g, 10%	248,0 ± 0,04
P8g, 15%	219,0 ± 0,08
P8g, 20%	213,1 ± 0,04
P11,5g, 10%	233,3 ± 0,06
P11,5g, 15%	218,9 ± 0,04
P11,5g, 20%	188,2 ± 0,06
P15g, 10%	216,8 ± 0,08
P15g, 15%	197,1 ± 0,04
P15g, 20%	166,0 ± 0,00
AcS 10%	282,2 ± 0,10
AcS 15%	289,5 ± 0,14
AcS 20%	301,0 ± 0,26

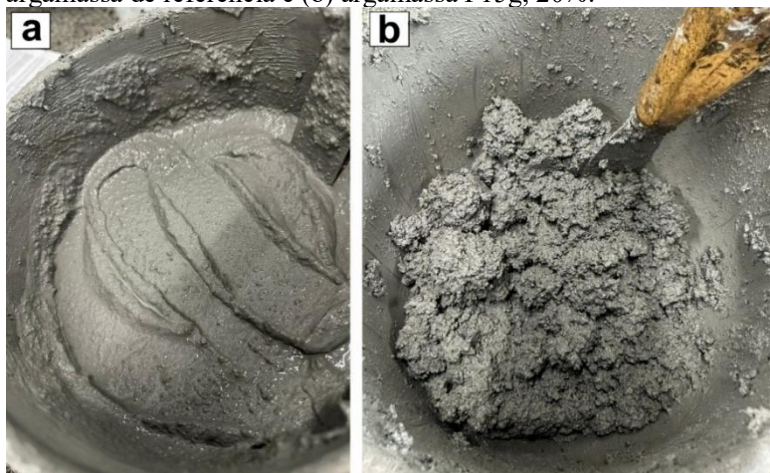
Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Tabela 12 percebe-se que a argamassa de referência apresentou índice de consistência médio de $256,9 \pm 0,04$ mm. Os experimentos P8g e P11,5g com teores de 10% de parafina em substituição ao agregado miúdo, obtiveram resultados de consistência superiores a 230 mm ($248 \pm 0,04$ mm e $233,3 \pm 0,06$ mm respectivamente), superando a consistência mínima e respeitando a consistência máxima indicada para aplicações manuais de revestimentos cimentícios de acordo com Carasek (2010), Bauer (2005) e Cincotto (1995).

Comparando os experimentos contendo parafina encapsulada com o experimento de referência (Ref.) percebe-se uma diminuição nos valores de consistência (P8g, 15% = $219 \pm 0,08$ mm; P8g, 20% = $213,1 \pm 0,04$ mm; P11,5g, 15% = $218,9 \pm 0,04$ mm; P11,5g, 20% = $188,2 \pm 0,06$ mm; P15g, 15% = $201 \pm 0,04$ mm; P15g, 20% = $166,0$ mm). Essa diminuição pode ser justificada pelo aumento do teor de ar incorporado já evidenciado nas misturas, dificultando a mobilidade das partículas, diminuindo a consistência das mesmas (Wang *et al*, 2020; p. 4)

As Figura 23 (a) e (b) mostram a diferença da consistência obtida entre a argamassa de referência e a argamassa P15g, 20%.

Figura 23 - Aspecto da consistência das argamassas no estado fresco: (a) argamassa de referência e (b) argamassa P15g, 20%.



Fonte: Do autor (2026).

As argamassas com AcS apresentaram índices de consistência superiores ao da argamassa de referência. Os valores aumentaram

progressivamente com o aumento do teor de PCM, variando de 282,2 mm (AcS 10%) até 301,0 mm (AcS 20%). A faixa granulométrica dos PCM de AcS ($DMÁX = 2,0$ mm e $DMÍN = 0,60$ mm) inferiores às faixas granulométricas das partículas das areias ($DMÁX = 2,40$ mm e $DMÍN = 0,30$ mm), melhorando a mobilidade entre os agregados secos, aumentando a consistência da argamassa cimentícia (Castro; Pandolfelli, 2009).

5.2.3. Retenção de água

A Tabela 13 apresenta os resultados de retenção de água das argamassas de reboco.

Tabela 13 - Retenção de água das argamassas de reboco.

Experimento	Retenção de água (%)
Ref.	99,28
P8g, 10%	99,26
P8g, 15%	99,39
P8g, 20%	99,39
P11,5g, 10%	99,34
P11,5g, 15%	99,20
P11,5g, 20%	99,53
P15g, 10%	99,45
P15g, 15%	99,47
P15g, 20%	99,59
AcS 10%	99,34
AcS 15%	99,55
AcS 20%	99,43

Fonte: Do autor (2026).

Observa-se que a incorporação de parafina encapsulada não promoveu alterações, mesmo com o aumento do teor de substituição parcial da areia por PCM. Os resultados demonstraram que todas as argamassas em estudo apresentaram retenção de água superior a 99%, evidenciando elevada capacidade de retenção da água de amassamento. Essa característica é fundamental para aplicações em revestimento, pois assegura adequada hidratação do sistema cimentício, favorece a aderência e contribui para a durabilidade do material, validando tecnicamente sua utilização como argamassa de reboco (Govin *et al.*, 2016).

De acordo com os resultados obtidos para a retenção de água todas as argamassas produzidas foram qualificadas indicando elevado

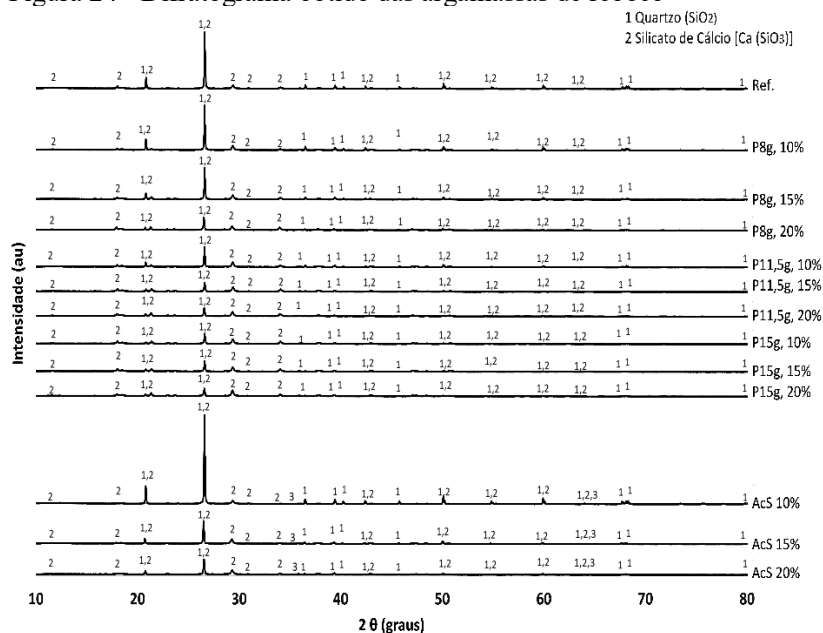
desempenho nesse parâmetro segundo NBR 13281-1:2023 e classificadas na classe U3.

5.3. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REBOCO NO ESTADO ENDURECIDO

5.3.1. Difração de Raios X

A Figura 24 apresenta os difratogramas de raios X das argamassas de reboco de referência e das composições contendo PCM encapsulado à base de parafina e AcS, em diferentes teores.

Figura 24 - Difratograma obtido das argamassas de reboco



Fonte: Do autor (2026).

Observa-se, na Figura 24, que os principais picos identificados nos difratogramas correspondem às fases de quartzo (ICDD PDF-2 nº 00-079-1906) e silicato de cálcio (ICDD PDF-2 nº 00-072-1396). O quartzo está associado predominantemente ao agregado miúdo utilizado na argamassa, enquanto os silicatos de cálcio são característicos dos produtos de hidratação do cimento Portland. De modo geral, observa-se

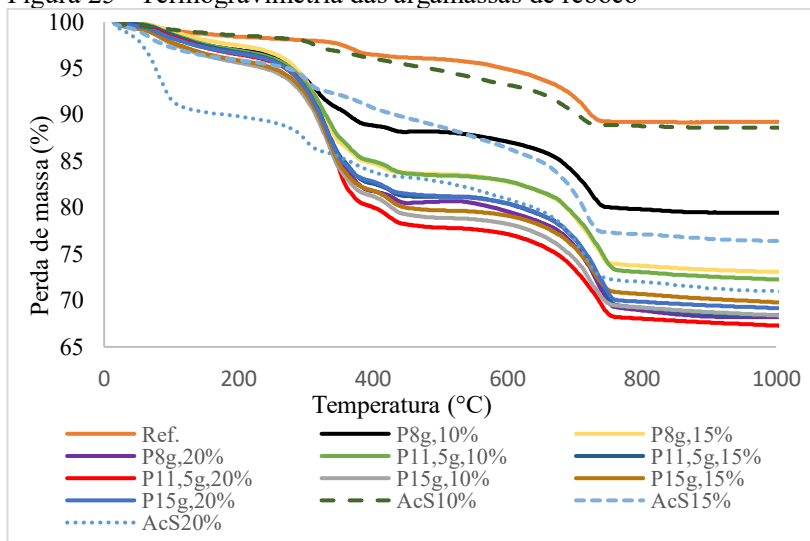
que todas as amostras apresentam padrões difratométricos semelhantes, indicando que a incorporação dos PCMs não promoveu alterações significativas nas fases cristalinas da matriz cimentícia.

Ressalta-se que a ausência de picos característicos do AcS nos difratogramas de raios X não implica necessariamente na inexistência do material na matriz cimentícia. Tal comportamento pode ser atribuído ao baixo teor de substituição da areia pelo PCM, o que dificulta a detecção de fases minoritárias por DRX, técnica que apresenta limitações quanto à identificação de componentes em pequenas proporções ou com baixo grau de cristalinidade. Ademais, as amostras analisadas por DRX foram obtidas a partir de corpos de prova previamente submetidos aos ensaios de tração na flexão e compressão, os quais passaram por limpeza superficial com pincel antes da moagem, procedimento que pode ter removido parte dos sais migrados para a superfície durante o processo de cura.

5.3.2. Termogravimetria

A Figura 25 apresenta as curvas de TG das amostras de argamassas de reboco moídas, evidenciando a variação da perda de massa do material em função do aumento da temperatura.

Figura 25 - Termogravimetria das argamassas de reboco



Fonte: Do autor (2026).

Na faixa de temperatura de 0 °C a 150 °C observa-se, para todas as amostras, uma perda de massa inicial, atribuída principalmente à evaporação da água fisicamente adsorvida e da umidade residual presente nos poros da matriz cimentícia (Jochem *et al*, 2020, p. 6). Percebe-se um comportamento mais acentuado da argamassa AcS 20%, na qual a perda de massa inicial apresenta maior intensidade, estando associada à instabilidade térmica previamente identificada nos ensaios de ciclagem térmica do PCM à base de AcS. Esse material apresentou redução progressiva de massa ao longo dos ciclos, atribuída à perda de água de cristalização e aos sucessivos processos de dissolução e recristalização do sal (Dong *et al.*, 2022).

A perda de massa entre as faixas de temperatura de 150 °C a 350 °C mostram que as argamassas contendo PCM apresentaram maiores perdas de massa em comparação à amostra de referência, especialmente aquelas com maiores teores de substituição. De acordo com Yoo *et al.*, (2021), esse comportamento está associado à degradação térmica dos PCMs.

Entre as faixas de temperatura de 350 °C a 600 °C percebe-se que ocorre uma perda de massa em todas as amostras, relacionada de acordo com (Naber; Bellmann; Neubauer, 2020, p. 2) principalmente à desidratação dos produtos de hidratação do cimento, como a decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), além da continuidade da degradação dos PCMs.

Em temperaturas superiores, especialmente entre 600 °C e 750 °C, a perda de massa está relacionada predominantemente à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), com liberação de CO_2 , conforme descrito por (Salih *et al.*, 2022). A presença dessa fase nas argamassas é esperada devido à carbonatação do hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento e da cal hidratada. Observa-se que as argamassas com maiores teores de PCM apresentam, maior perda de massa total acumulada ao longo do ensaio termogravimétrico, evidenciando a influência direta do teor de substituição na estabilidade térmica do compósito. As formulações com 20% de substituição registraram as maiores perdas de massa, seguidas pelas de 15% e 10%, respectivamente, comportamento coerente com o aumento da fração incorporada à matriz. Em contrapartida, a argamassa de referência apresentou maior resíduo sólido ao final do ensaio.

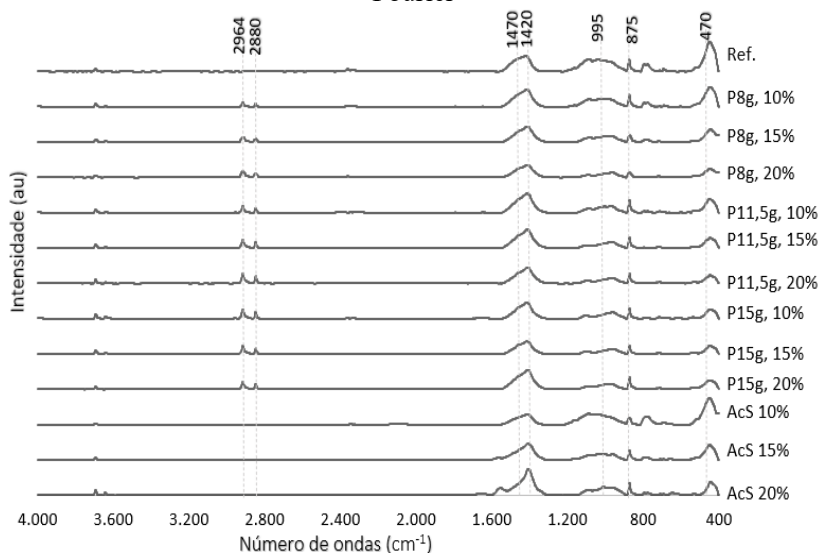
Ressalta-se que a faixa de temperatura empregada no ensaio excede as condições reais de uso das argamassas de reboco em edificações, nas quais as temperaturas superficiais atingem, em situações extremas, valores da ordem de 70 °C. Dessa forma, o ensaio de TG não

tem por finalidade simular o comportamento em serviço, mas investigar os mecanismos de degradação térmica e a estabilidade dos materiais em condições severas, permitindo uma avaliação comparativa entre as diferentes formulações.

5.3.3. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 26 apresenta os espectros de FTIR das amostras de argamassas de reboco, permitindo a identificação dos principais grupos funcionais associados à matriz cimentícia e aos materiais de mudança de fase incorporados.

Figura 26 - Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier



Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Figura 26 as argamassas que possuem parafina apresentam as bandas em 2964, 2933 e 2880 cm^{-1} que correspondem ao estiramento dos grupos metil ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$ e $-\text{CH}$) característicos de cadeias alifáticas presentes na parafina (Coura; Profeti; Profeti, 2020).

A banda em aproximadamente 1470 cm^{-1} nas argamassas está associada ao rompimento do CO_3^{2-} relacionada à carbonatação da matriz cimentícia (Geng *et al.*, 2022, p. 7). De forma complementar, as bandas próximas a 1420 cm^{-1} e próximas a 875 cm^{-1} são caracterizadas como o

alongamento assimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente. Já a banda em 995 cm^{-1} é associada ao estiramento da ligação Si-O característico do gel C-S-H formado durante o processo de hidratação do cimento (José *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023).

As bandas próximas a 470 cm^{-1} referem-se ao alongamento Si-O do quartzo (Kupwade-Patil *et al.*, 2018). De modo geral, observa-se similaridade entre os espectros, indicando que a incorporação dos PCMs não promoveu alterações químicas significativas na estrutura da matriz cimentícia, caracterizando interação predominantemente física entre os componentes.

5.3.4. Absorção de água

A Tabela 14 apresenta os resultados de absorção de água (A), índice de vazios (Iv) e massa específica aparente seca (ρ_s) das argamassas de reboco.

Tabela 14 - Absorção de água (A), Índice de vazios (Iv) e Massa específica aparente seca (ρ_s) das argamassas de reboco.

Experimento	A (%) Média	Iv (%) Média	ρ_s (g/cm ³) Média
Ref.	$17,98 \pm 0,15$	$31,23 \pm 0,28$	$1,74 \pm 0,00$
P8g, 10%	$19,59 \pm 0,06$	$29,80 \pm 0,01$	$1,52 \pm 0,00$
P8g, 15%	$20,11 \pm 0,25$	$28,85 \pm 0,13$	$1,43 \pm 0,01$
P8g, 20%	$19,08 \pm 0,47$	$31,18 \pm 0,43$	$1,31 \pm 0,01$
P11,5g, 10%	$19,08 \pm 0,09$	$28,51 \pm 0,19$	$1,49 \pm 0,01$
P11,5g, 15%	$21,06 \pm 0,73$	$29,37 \pm 0,70$	$1,39 \pm 0,02$
P11,5g, 20%	$19,59 \pm 0,03$	$26,31 \pm 0,05$	$1,34 \pm 0,00$
P15g, 10%	$17,28 \pm 0,21$	$25,91 \pm 0,08$	$1,50 \pm 0,02$
P15g, 15%	$18,93 \pm 0,16$	$26,33 \pm 0,09$	$1,39 \pm 0,01$
P15g, 20%	$21,13 \pm 0,17$	$27,34 \pm 0,27$	$1,29 \pm 0,01$
AcS 10%	$20,89 \pm 0,04$	$33,51 \pm 0,22$	$1,60 \pm 0,01$
AcS 15%	$20,34 \pm 0,41$	$31,53 \pm 0,39$	$1,55 \pm 0,01$
AcS 20%	$23,86 \pm 0,32$	$35,51 \pm 0,41$	$1,49 \pm 0,01$

Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Tabela 14 percebe-se que os experimentos P8g, 15%, P11,5g, 15% e P15g, 20% apresentaram os maiores resultados de absorção d'água entre os experimentos contendo parafina encapsulada (P8g, 15% = $20,11 \pm 0,25\%$; P11,5g, 15% = $21,06 \pm 0,73\%$ e P15g, 20% = $21,13 \pm 0,17\%$). Todos esses resultados foram superiores ao resultado de absorção d'água obtida no experimento ref ($17,98 \pm 0,15\%$). O maior teor de ar incorporado obtido nos experimentos contendo parafina

encapsulada no seu estado fresco pode ter influenciado no surgimento de poros no estado endurecido, facilitando o teor d'água absorvida (Jochem *et al*, 2020; p. 3).

Quanto aos experimentos AcS 10% e AcS 15%, percebe-se que os resultados de absorção d'água chegaram a $20,89 \pm 0,04 \%$ e $20,34 \pm 0,41 \%$. Tais valores também são superiores ao experimento de referência ($17,98 \pm 0,15 \%$). O experimento AcS 20% apresentou um resultado ainda maior ($23,86 \pm 0,32 \%$). A recristalização dos sais durante a hidratação cimentícia pode ter contribuído para o aumento de poros no estado endurecido e, conseqüentemente, maior absorção d'água (Jiang; Mu; Liu, 2022).

A absorção de água aumenta com a utilização dos PCMs na argamassa. O aumento da absorção está diretamente relacionado com a porcentagem de PCMs, à medida que aumenta a porcentagem de substituição do agregado miúdo, ocorre um aumento na absorção de água (Gomes, 2018). Um aumento da absorção acompanhado da redução do índice de vazios indica refinamento da estrutura de poros, maior área superficial capilar e interação da água com o PCM incorporado. A incorporação de PCMs pode alterar a microestrutura da matriz cimentícia, promovendo refinamento da estrutura de poros e modificando a distribuição do tamanho de poros. Mesmo com redução do índice de vazios, poros capilares mais finos podem continuar participando ativamente do processo de absorção de água devido ao aumento da área superficial e dos mecanismos capilares (Vigor *et al.*, 2024).

Observa-se que ocorreu uma redução progressiva da massa específica, com o aumento do teor de PCMs na argamassa, dados correspondentes em todos os experimentos relacionados com o aumento do teor de ar incorporado na argamassa de reboco. O menor valor encontrado foi para o experimento P15g, 20% de $1,29 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, no qual possui maior quantidade de PCMs incorporado e este com maior teor de grafite expansível, além de um maior teor de ar incorporado. Para o AcS a redução também é progressiva conforme o aumento do teor de substituição (AcS 10% = $1,60 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, AcS 15% = $1,55 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e AcS 20% = $1,49 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$). Este fato se deve em função da baixa massa unitária e da massa específica dos PCMs utilizados (Pczieczek, 2017).

Cabe destacar que, durante a execução do ensaio de absorção de água e índice de vazios, realizado conforme a ABNT NBR 9778, os corpos de prova foram submetidos à etapa de saturação por ebulição durante 5 horas. Nessas condições foi observada a exsudação parcial da

parafina a partir da matriz cimentícia, em função da temperatura superior ao seu ponto de fusão e do longo tempo de exposição, conforme ilustrado na Figura 27. Tais condições não representam o regime térmico típico de aplicação de argamassas de reboco em fachadas, nas quais as temperaturas de serviço dificilmente ultrapassam 70 °C e não permanecem elevadas por períodos prolongados. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como uma avaliação sob condição normatizada, válida para fins comparativos entre os traços estudados, mas conservadora em relação ao comportamento esperado em condições reais de uso.

Figura 27 - Exsudação de parafina observada após a ebulição dos corpos de prova de argamassa de reboco contendo PCM.



Fonte: Do autor (2026).

5.3.5. Absorção de água por capilaridade

A Tabela 15 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade das argamassas de reboco.

Tabela 15 - Absorção de água por capilaridade

Experimento	A _{10min} (g/cm ²)	A _{90min} (g/cm ²)
Ref.	0,31 ± 0,02	1,03 ± 0,15
P8g, 10%	0,23 ± 0,04	0,57 ± 0,09
P8g, 15%	0,17 ± 0,02	0,45 ± 0,08
P8g, 20%	0,21 ± 0,02	0,51 ± 0,05
P11,5g, 10%	0,20 ± 0,00	0,56 ± 0,02
P11,5g, 15%	0,15 ± 0,02	0,40 ± 0,06
P11,5g, 20%	0,21 ± 0,02	0,48 ± 0,02
P15g, 10%	0,32 ± 0,03	0,74 ± 0,05
P15g, 15%	0,28 ± 0,02	0,60 ± 0,03
P15g, 20%	0,25 ± 0,03	0,53 ± 0,07
AcS 10%	0,09 ± 0,18	0,23 ± 0,25
AcS 15%	0,10 ± 0,04	0,18 ± 0,02
AcS 20%	0,04 ± 0,03	0,09 ± 0,06

Fonte: Do autor (2026).

Percebe-se que a argamassa de referência apresentou os maiores valores de absorção, com $0,31 \pm 0,02$ g/cm² aos 10 min e $1,03 \pm 0,15$ g/cm² aos 90 min. Nas argamassas contendo parafina encapsulada, observa-se uma redução da absorção capilar em ambos os tempos analisados, evidenciando menor facilidade de ingresso de água por ação capilar, com reduções mínimas superiores a 28% em relação à argamassa de referência, como observado para o traço P15g, 10% ($A_{90min} = 0,74 \pm 0,05$ g/cm²). As formulações com P8g registraram valores de A_{90min} entre 0,45 e 0,57 g/cm² reduzindo até 56,3% a absorção de água por capilaridade, enquanto as argamassas com P11,5g nos mesmos 90 min variaram entre 0,40 e 0,56 g/cm². Sendo assim, percebe-se nos resultados apresentados que a absorção de água por capilaridade é influenciada pela granulometria e pelo teor de incorporação na argamassa de reboco. A absorção de água por capilaridade é variada pela distribuição do tamanho dos poros e pela continuidade da rede capilar (Innocentini *et al.*, 2009). A incorporação de parafina na argamassa reduz a absorção de água por capilaridade devido ao seu caráter hidrofóbico. A presença do PCM de parafina aumenta o ângulo de contato entre a água e as superfícies dos poros e forma uma película nas paredes capilares, dificultando a penetração da água e reduzindo a sorvidade do material (Yuan *et al.*, 2024).

Para as argamassas com AcS, obteve-se ainda menor os resultados da absorção de água por capilaridade, com A_{10min} variando entre 0,04 e 0,09 g/cm² e A_{90min} entre 0,09 e 0,23 g/cm², correspondendo a reduções mínimas de aproximadamente 68% e 77%, respectivamente,

em relação à argamassa de referência. Esse comportamento pode ser explicado pela menor granulometria do PCM de AcS em comparação ao agregado natural, o que favorece o empacotamento das partículas na matriz cimentícia, reduz o tamanho médio dos poros capilares e dificulta a percolação de água (Aguayo *et al.*, 2016; Yang; Dong; Zhang, 2024).

5.3.6. Ensaios Mecânicos

A Tabela 16 apresenta os resultados da resistência à compressão e a resistência à tração na flexão das argamassas de reboco.

Tabela 16 - Resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas de reboco.

Experimento	Resistência à compressão média (Mpa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
Ref.	$10,78 \pm 0,91$	$2,57 \pm 0,35$
P8g, 10%	$5,86 \pm 0,32$	$2,27 \pm 0,07$
P8g, 15%	$6,08 \pm 0,55$	$2,00 \pm 0,08$
P8g, 20%	$4,59 \pm 0,73$	$1,86 \pm 0,10$
P11,5g, 10%	$5,90 \pm 0,52$	$2,07 \pm 0,14$
P11,5g, 15%	$4,60 \pm 0,51$	$2,00 \pm 0,10$
P11,5g, 20%	$4,79 \pm 0,53$	$2,69 \pm 0,08$
P15g, 10%	$4,99 \pm 0,66$	$3,00 \pm 0,10$
P15g, 15%	$4,41 \pm 0,44$	$2,47 \pm 0,17$
P15g, 20%	$3,98 \pm 0,49$	$2,57 \pm 0,40$
AcS 10%	$3,76 \pm 0,34$	$2,28 \pm 0,11$
AcS 15%	$3,33 \pm 0,44$	$2,25 \pm 0,05$
AcS 20%	$2,74 \pm 0,41$	$1,99 \pm 0,10$

Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Tabela 16 percebe-se que os experimentos de referência apresentaram os maiores resultados de resistência mecânica (resistência à compressão = $10,78 \pm 0,91$ MPa; resistência à tração na flexão = $2,57 \pm 0,35$ MPa). Esses resultados se justificam pela menor porosidade do experimento (absorção d'água = 17,98%) e pelos picos acentuados 1 e 2 mostrados nos resultados de difração de raios X, indicando a formação de cristais de Silicato de Cálcio Hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Os cristais de Silicato de Cálcio Hidratado ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a menor porosidade contribuem para o aumento da resistência mecânica dos materiais cimentícios (Neville, 2016).

Quanto aos experimentos contendo parafina encapsulada, percebe-se uma redução dos resultados de resistência mecânica com o aumento do teor de substituição e aumento do teor de grafite no encapsulamento (Compressão: P8g, 10% = $5,86 \pm 0,32$ MPa; P8g, 15% = $6,08 \pm 0,55$ MPa; P11,5g, 10% = $5,90 \pm 0,52$ MPa; P15g, 20% = $3,98 \pm 0,49$ MPa; Tração na flexão: P8g, 10% = $2,27 \pm 0,07$ MPa; P8g, 15% = $2,00 \pm 0,08$ MPa; P11,5g, 10% = $2,07 \pm 0,14$ MPa; P15g, 20% = $2,57 \pm 0,40$ MPa). Tal diminuição coincide com o aumento apresentado nos resultados de absorção d'água (P8g, 10% = 19,59%; P8g, 15% = 20,11%; P11,5g, 10% = 19,08%; P15g, 20% = 21,13%) dando indicativos de que o aumento de porosidade possa ter influenciado na queda da resistência mecânica (Elaqra *et al.*, 2019, p. 681 e 682). Além disso, estudos de Das *et al.*, (2020) e Min; Kim; Kim, (2017) demonstraram que a parafina, retarda a hidratação do cimento devido à sua natureza hidrofóbica, que limita o contato direto entre a pasta de cimento e os agregados. Essa interrupção na hidratação afeta negativamente a resistência à compressão

As formulações P15g 10% e P15g 20% apresentaram resistências de $4,99 \pm 0,66$ MPa e $3,98 \pm 0,49$ MPa, correspondendo a reduções de aproximadamente 54% e 63%, respectivamente, em relação ao traço de referência.

Esse comportamento coincide com resultados reportados por (Mahvash; Mostofinejad; Saljoughian, 2026), que observaram reduções progressivas na resistência à compressão em misturas cimentícias contendo PCMs (parafina e polietilenoglicol estabilizados com sílica ativa), com perdas que alcançaram aproximadamente 55% para maiores teores de incorporação, quando comparadas à mistura de referência.

Quanto aos experimentos contendo AcS, os valores de resistência mecânica também caíram com o aumento do teor de substituição (Compressão: AcS 10% = $3,76 \pm 0,34$ MPa; AcS 15% = $3,33 \pm 0,44$ MPa e AcS 20% = $2,74 \pm 0,41$ MPa; Tração na Flexão: AcS 10% = $2,28 \pm 0,11$ MPa; AcS 15% = $2,25 \pm 0,05$ MPa e AcS 20% = $1,99 \pm 0,10$ MPa). Além das mesmas relações envolvendo porosidade e resistência (maior porosidade, menor resistência), os experimentos com AcS podem ter tido seus valores de resistência mecânica declinados pelo processo de superresfriamento e recristalização dos sais (Dong *et al.*, 2022).

Embora os resultados de resistência à tração na flexão da maioria dos experimentos contendo parafina encapsulada e AcS tenham dado inferiores ao experimento de referência (Ref. = 2,57 MPa), o experimento P15g, 10% apresentou um resultado superior (3,00 MPa). Além disso, de acordo com a NBR 13281-1 (2023), todos os experimentos podem ser

utilizados como argamassa de classe R3, por apresentarem resultados entre 1,50 MPa a 3,00 MPa.

De forma geral, verifica-se uma relação consistente entre os parâmetros analisados. A resistência à compressão das argamassas com PCM é fortemente governada pela combinação entre empacotamento granulométrico, porosidade (índice de vazios) e absorção de água, sendo esses fatores determinantes para o desempenho mecânico final do material (Neville, 2016). Apesar da redução da resistência, os valores obtidos para parte das argamassas com PCM permanecem compatíveis com aplicações em revestimentos não estruturais, como argamassas de reboco.

A Figura 28 apresenta os corpos de prova após a ruptura no ensaio de resistência à tração na flexão, evidenciando a presença das cápsulas de PCMs dispersas na matriz das argamassas de reboco.

Figura 28 - Aspecto dos corpos de prova de argamassa de reboco após a ruptura no ensaio de resistência à tração na flexão, com visualização das cápsulas de PCM.



Fonte: Do autor (2026).

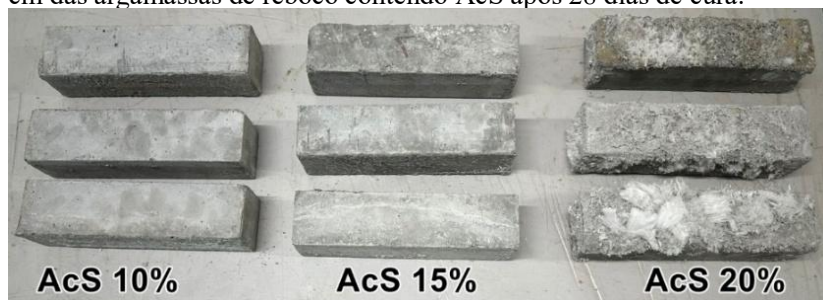
5.4 SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS PARA OS ENSAIOS DE DESEMPENHO TÉRMICO

Com base nos resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e no estado endurecido, com destaque para os valores de resistência à compressão, procedeu-se à seleção das argamassas que apresentaram desempenho físico-mecânico compatível com a aplicação como revestimento. A partir dessa análise foram selecionadas cinco composições, incluindo a argamassa de referência, para a realização dos ensaios de desempenho térmico. Assim, os ensaios térmicos foram conduzidos com a argamassa de referência e com as seguintes argamassas modificadas: P8g, 10%, P8g, 15%, P11,5g, 10% e AcS 10%.

As argamassas contendo PCM à base de parafina foram selecionadas com base nos maiores valores de resistência mecânica. Para as argamassas com PCM à base de AcS, optou-se pela realização dos ensaios térmicos apenas com a composição AcS 10%, uma vez que essa argamassa manteve-se visualmente estável após 28 dias de cura. Já as argamassas AcS 15% e AcS 20% apresentaram formação de depósitos cristalinos na superfície, indicando possível instabilidade associada à presença de sais solúveis. Esse comportamento ficou mais pronunciado com o aumento do teor de AcS especialmente na composição AcS 20%.

A Figura 29 apresenta o aspecto visual das argamassas contendo AcS após 28 dias de cura. As amostras correspondem a corpos de prova prismáticos de $4 \times 4 \times 16$ cm, utilizados nos ensaios mecânicos das argamassas.

Figura 29 - Aspecto visual dos corpos de prova prismáticos de $4 \times 4 \times 16$ cm das argamassas de reboco contendo AcS após 28 dias de cura.



Fonte: Do autor (2026).

Os corpos de prova AcS 20% apresentaram a formação de dentritos fibrosos de sódio decorrentes da recristalização de sais pós

reação exotérmica na hidratação cimentícia da mistura. Esses dentritos normalmente se desenvolvem a partir dos poros iniciais das superfícies cimentícias, provocando dissolução dos cristais de Silicato de Cálcio Hidratado, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência mecânica dos materiais cimentícios (Jiang; Mu; Liu, 2022).

Jiang; Mu; Liu, (2022) investigaram o denominado ataque físico por sais em argamassas cimentícias, no qual a cristalização de sais nos poros e na superfície do material pode levar à sua deterioração, especialmente sob condições de variação de umidade. Segundo os autores, os sais dissolvidos podem migrar e se cristalizar durante a evaporação da água, gerando pressões de cristalização capazes de comprometer a integridade da matriz cimentícia.

A Figura 30 apresenta em detalhe o aspecto superficial da argamassa AcS 20% após 28 dias de cura.

Figura 30 - Dentritos fibrosos de sódio decorrentes da recristalização de sais na superfície dos corpos de provas AcS 20%.



Fonte: Do autor (2026).

Desta forma, o comportamento observado na argamassa AcS 20% justifica sua exclusão dos ensaios de desempenho térmico, reforçando a necessidade de limitar o teor desse material em argamassas de reboco.

As argamassas confeccionadas para esses ensaios apresentaram bom acabamento superficial após 28 dias de cura, evidenciado pela uniformidade da superfície, ausência de fissuração aparente, baixa rugosidade e adequada coesão da matriz cimentícia, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Amostras das argamassas selecionadas para os ensaios de desempenho térmico



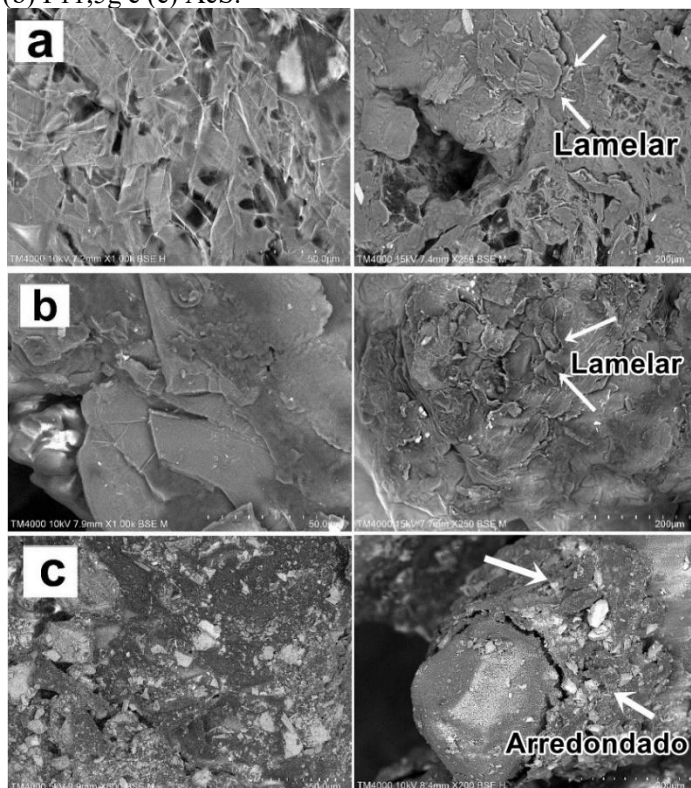
Fonte: Do autor (2026).

5.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

5.5.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos PCMs

A Figura 32 (a), (b) e (c) apresenta a morfologia dos PCMs utilizados nas argamassas de reboco, observada em ampliações correspondentes às escalas de 50 μm e 200 μm , evidenciando as características superficiais e o formato das partículas.

Figura 32 - MEV dos PCM's utilizados nas argamassas de reboco (a) P8g, (b) P11,5g e (c) AcS.



Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Figura 32 (a) e (b) observa-se a presença de estruturas lamelares e superfícies lisas, associadas à parafina encapsulada e ao grafite expansível utilizado como agente de encapsulamento. Já na figura 32 (c) o PCM de AcS apresenta uma morfologia diferente das observadas anteriormente com parafina percebe-se estruturas arredondadas.

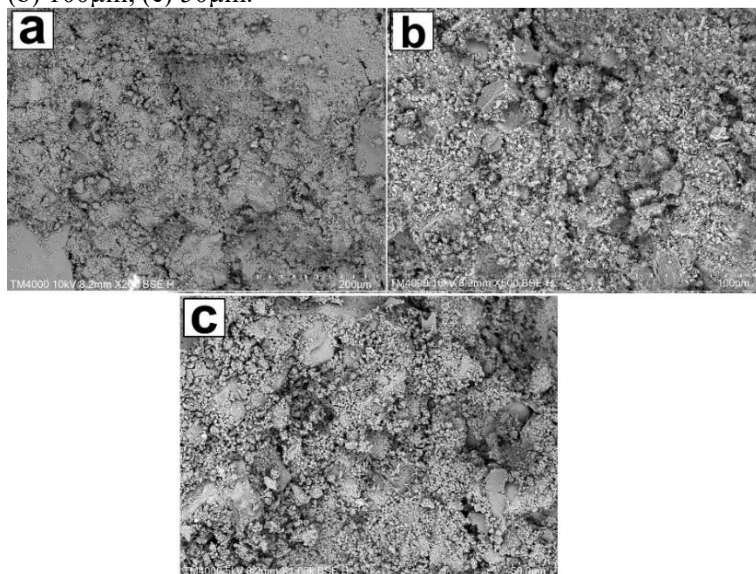
As morfologias observadas são semelhantes às obtidas por Li *et al.*, (2024), que avaliaram cápsulas de parafina com grafite expansível em diferentes teores (0 a 20% em massa). Para baixos teores de grafite expansível (2 a 5%), as micrografias evidenciaram a presença de aglomerados de cápsulas com morfologias irregulares, atribuídos à incapacidade do grafite expansível em absorver integralmente a parafina,

resultando em acúmulo do PCM na superfície do material suporte. Em teores intermediários (8 a 10%), a estrutura microporosa do grafite expansível forneceu volume de vazios adequado para a incorporação mais homogênea da parafina, promovendo maior estabilidade de forma e reduzindo o risco de vazamentos durante os ciclos térmicos. Por outro lado, para teores elevados (15 a 20%), observaram-se vazios não preenchidos e aumento da porosidade do compósito, o que pode comprometer tanto a eficiência do armazenamento térmico quanto as propriedades físico-mecânicas do material.

5.5.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das argamassas de reboco com PCMs

Com o objetivo de se analisar a porosidade do material, a ruptura do corpo de prova ocorreu por fratura. Por meio das imagens de MEV, é possível verificar que a microestrutura da argamassa é porosa em toda a sua extensão. A Figura 33 (a), (b) e (c) apresentam imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argamassa referência, em diferentes ampliações.

Figura 33 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa Ref. (a) 200 μm ; (b) 100 μm ; (c) 50 μm .

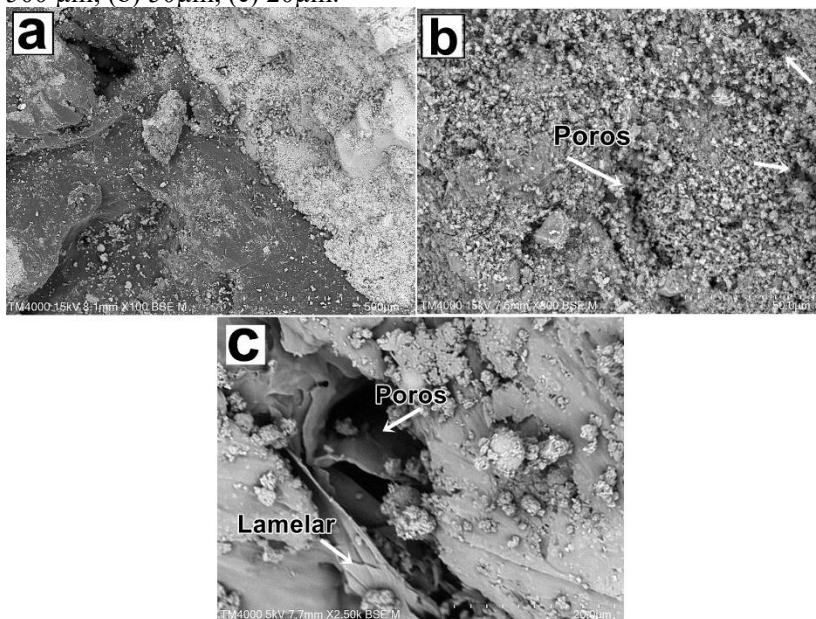


Fonte: Do autor (2026).

Avaliando a Figura 33, observa-se que a micrografia da argamassa de referência, sem incorporação de PCMs apresenta uma microestrutura como encontrada por Li; Xu; Zhang, (2024), típica de argamassas cimentícias convencionais. Percebe-se partículas de agregado miúdo e poros distribuídos de forma irregular na matriz. A textura observada é predominantemente contínua e de aspecto granular, sem a identificação de fases estranhas, inclusões atípicas ou estruturas morfológicas distintas, sendo característica de argamassas de reboco convencionais e serve como referência comparativa para a análise das argamassas modificadas com a incorporação de PCMs, permitindo avaliar as alterações microestruturais decorrentes da adição desses materiais (Rubio-Aguinaga *et al.*, 2025).

A Figura 34 (a), (b) e (c) apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argamassa de reboco P8g, 10% em diferentes ampliações.

Figura 34 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P8g, 10%. (a) 500 μm ; (b) 50 μm ; (c) 20 μm .

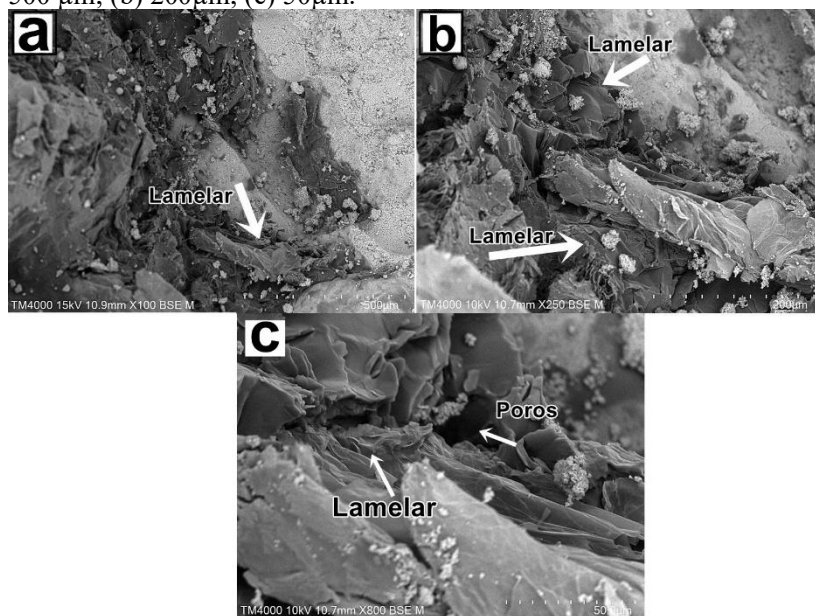


Fonte: Do autor (2026).

Observa-se que a micrografia da argamassa P8g, 10% apresenta a presença de partículas de agregado miúdo e regiões de porosidade distribuídas e morfologia diferente da argamassa referência, sendo possível visualizar na Figura 34 (c), uma morfologia em aspecto lamelar, devido a incorporação das cápsulas de PCM de parafina compatíveis com a estrutura característica do grafite expansível (Li *et al.*, 2024).

A Figura 35 (a), (b) e (c) apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argamassa de reboco P8g, 15% em diferentes ampliações.

Figura 35 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P8g, 15%. (a) 500 μm ; (b) 200 μm ; (c) 50 μm .

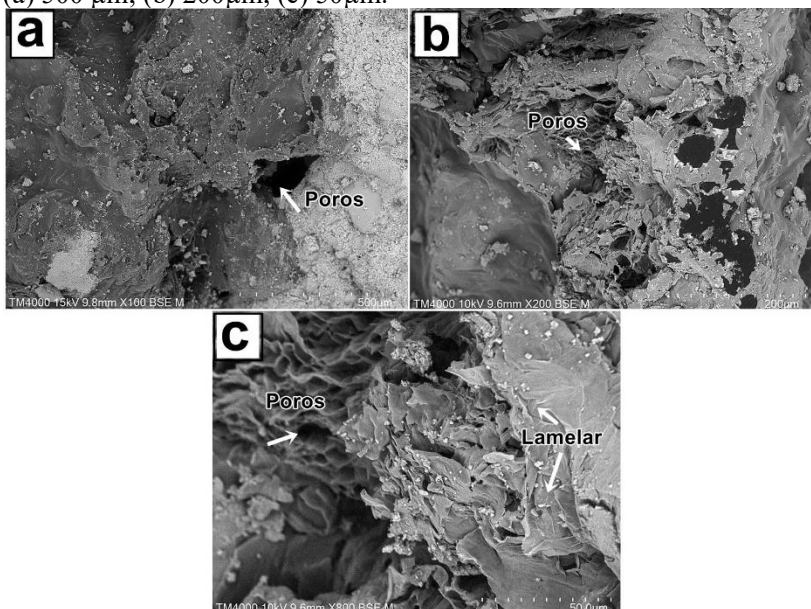


Fonte: Do autor (2026).

Avaliando a Figura 35, percebe-se que a micrografia da argamassa P8g, 15% apresenta presença de partículas de agregado miúdo e regiões de porosidade além de uma maior concentração de estruturas lamelares devido ao aumento de teor da incorporação de PCM (P8g, 15%), esse aspecto lamelar está associado ao grafite expansível o material encapsulante (Li *et al.*, 2024). A microestrutura apresenta regiões mais heterogêneas, com zonas de maior rugosidade e empilhamento de partículas.

A Figura 36 (a), (b) e (c) apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da argamassa P11,5g, 10% em diferentes ampliações.

Figura 36 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa P11,5g, 10%. (a) 500 μm ; (b) 200 μm ; (c) 50 μm .

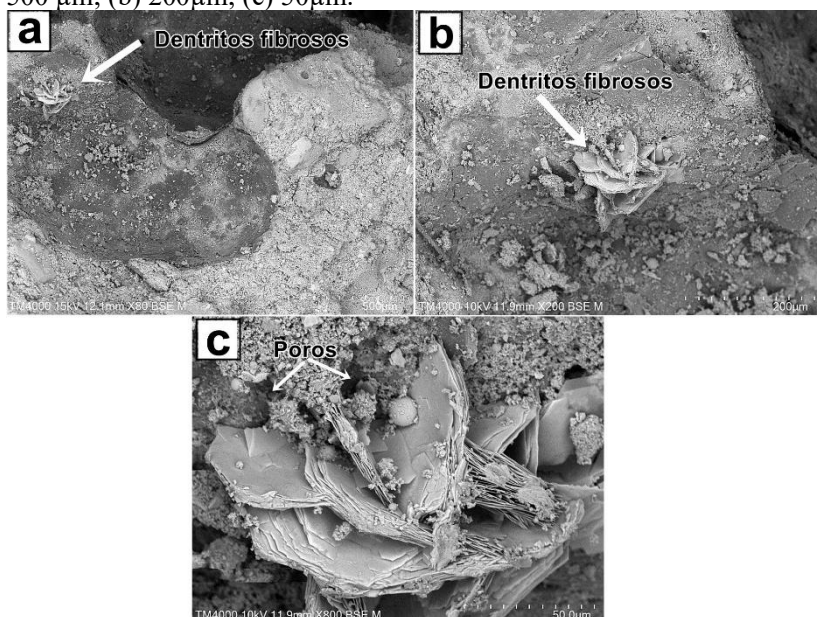


Fonte: Do autor (2026).

Analisando a Figura 36 percebe-se a micrografia da argamassa P11,5g, 10% o aspecto lamelar presente, e que conforme o aumento do teor de grafite e de incorporação do PCM nas argamassas de reboco a presença de porosidade e vazios de diferentes dimensões é evidenciada, podendo estar associada tanto à incorporação de ar durante o processo de mistura quanto à introdução PCMs e do grafite expansível na argamassa de reboco. Percebe-se ainda pontos escuros distribuídos ao longo da microestrutura, os quais podem ser atribuídos à presença de poros, vazios internos ou regiões de arrancamento de partículas durante a fratura do material.

A Figura 37 (a), (b) e (c) apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das argamassas contendo AcS, em diferentes ampliações.

Figura 37 - Micrografias obtidas por MEV da argamassa AcS10%. (a) 500 μm ; (b) 200 μm ; (c) 50 μm .



Fonte: Do autor (2026).

Analizando a Figura 37 percebe-se a presença de formações cristalinas, distribuída na região superficial e próxima aos poros. Essas formações diferem dos usuais de hidratação do cimento, indicando a presença de fases cristalizadas formadas após o endurecimento da argamassa. Considerando a ocorrência da recristalização (formação de dentritos fibrosos de sódio) observada macroscopicamente aos 28 dias, tais formações podem estar associadas à migração e posterior cristalização de sais solúveis, possivelmente relacionados a incorporação de AcS na argamassa de reboco (Jiang; Mu; Liu, 2022). Ressalta-se que a análise por MEV teve caráter qualitativo e morfológico. Na ausência de análises químicas complementares, como EDS ou DRX, não foi possível confirmar a composição das fases observadas, restringindo-se a interpretação aos aspectos morfológicos.

5.6. COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS ARGAMASSAS

A Tabela 17 apresenta as médias de temperatura do ensaio térmico realizado no aparato.

Tabela 17 - Resultados das médias das temperaturas (°C) coletadas do *FieldLogger – DataLogger* para os ensaios realizados com o aparato, reboco e a forno

Experi- mento	Ambi- ente (externo) (°C)	Forno (°C)	Rebo- co (°C)	Placa de fibroci- mento (°C)	Início do Apara- to (°C)	Meio do Apara- to (°C)
Ref.	21,16 ±0,14	69,27 ±0,41	47,07 ±0,15	36,37 ±0,20	26,55 ±0,68	26,40 ±0,32
P8g, 10%	21,30 ±0,16	69,31 ±0,32	43,27 ±0,49	33,15 ±0,92	24,59 ±1,61	24,24 ±1,09
P8g, 15%	21,16 ±0,04	69,28 ±0,53	44,62 ±0,77	34,30 ±0,50	25,91 ±0,47	25,20 ±0,24
P11,5g, 10%	21,24 ±0,82	69,31 ±0,24	42,91 ±1,26	31,97 ±1,10	24,44 ±0,78	23,96 ±0,72
AcS 10%	21,14 ±0,18	69,36 ±0,18	46,73 ±0,38	33,38 ±0,35	24,85 ±0,94	24,25 ±0,78

Fonte: Do autor (2026).

Observa-se que todas as argamassas foram submetidas a condições térmicas externas semelhantes, com temperatura ambiente média em torno de 21 °C e temperatura do forno próxima de 69 °C, garantindo a comparabilidade dos ensaios.

Percebe-se que a argamassa de referência apresentou temperatura média no reboco de $47,07 \pm 0,15^{\circ}\text{C}$, valor superior aos observados para as argamassas contendo PCM. Nas argamassas com incorporação de PCM a base de parafina, verificou-se uma redução da temperatura superficial do reboco, cujas temperaturas variaram entre $42,91 \pm 1,26^{\circ}\text{C}$ e $44,62 \pm 0,77^{\circ}\text{C}$, indicando maior eficiência na absorção e no retardamento da transferência de calor. O comportamento térmico observado está diretamente associado à capacidade de armazenamento de calor latente dos PCMs incorporados à matriz, que durante a transição sólido-líquido absorvem energia térmica do sistema, retardando o aumento da temperatura do material (Li; Xu; Zhang, 2024). Outro motivo que levaram à redução na absorção de calor é a menor condutividade térmica das argamassas com o aumento da porosidade. A menor condutividade térmica sugere uma maior dificuldade para difusão do

calor para o interior do corpo de prova, o que sugere uma menor temperatura da argamassa quando exposta ao calor (Li *et al.*, 2022).

Percebe-se também redução nas temperaturas medidas no início e no meio do aparato, que simulam o ambiente interno. Pode-se observar que no meio do aparato a argamassa com parafina encapsulada P11,5g, 10% apresentou o melhor desempenho térmico, possuindo o menor valor de temperatura registrada, com redução de 2,44 °C em relação à argamassa de referência (Ref. = $26,40 \pm 0,32$ °C e P11,5g, 10% = $23,96 \pm 0,72$ °C). As formulações com parafina encapsulada (P8g, 10% = $24,24 \pm 1,09$ °C) e com AcS (AcS 10% = $24,25 \pm 0,78$ °C) também apresentaram reduções, próximas de 2,15 °C, evidenciando que ambos os tipos de PCM contribuem para a melhoria do desempenho térmico do sistema de revestimento devido à sua capacidade de armazenar calor na forma de calor latente durante a mudança de fase, retardando a elevação da temperatura do material. Além disso, a presença desses materiais pode reduzir a condutividade térmica do compósito, influenciando o fluxo de calor no sistema (Pielichowska; Pielichowski, 2014; Baccega; Bottarelli; Cesari, 2023; Jiang *et al.*, 2024). Destaca-se ainda que os resultados correspondem a um período de ensaio de 1 h 30 min, sendo esperado que, com o prolongamento do tempo, ocorra a tendência de aproximação térmica entre as superfícies analisadas.

A Tabela 18 apresenta as variações de temperatura das argamassas contendo PCM em relação à argamassa de referência, medidas na face da placa de fibrocimento permitindo avaliar a eficiência térmica proporcionada pela incorporação dos PCMs.

Tabela 18 - Diferença de temperatura das argamassas com PCM em relação a argamassa referência na face da placa de fibrocimento

Experimento	Arg. Ref. – Arg. com PCM na face da placa de fibrocimento (°C)
P8g, 10%	3,21
P8g, 15%	2,07
P11,5g, 10%	4,40
AcS 10%	2,99

Fonte: Do autor (2026).

Observa-se redução de temperatura na placa de fibrocimento, em que a argamassa de referência apresentou temperatura média de 36,37 °C, enquanto a argamassa P11,5g, 10% registrou valor de 31,97 °C, resultando em uma redução de 4,4 °C. Esse comportamento evidencia a capacidade dos PCMs em absorver e armazenar parte da energia térmica

incidente, reduzindo sua transmissão para as camadas internas do sistema e contribuindo para a melhoria do conforto térmico e da eficiência energética da edificação.

Dessa forma a incorporação dos PCMs possibilita o armazenamento de energia térmica durante a transição de fase, enquanto as características microestruturais da argamassa influenciam os mecanismos de transferência de calor no material, controlando a forma como essa energia é absorvida, armazenada e posteriormente liberada (Asadi *et al.*, 2022; Li; Xu; Tao, 2023).

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a incorporação de PCMs encapsulados, à base de parafina e AcS, apresentam potencial para aplicação em argamassas de reboco por meio da substituição parcial da areia, visando à melhoria do desempenho térmico do material. Conclui-se que:

- A análise da densidade de massa evidenciou redução de 10% a 20% com o aumento do teor de PCM à base de parafina. Essa redução contribui para a diminuição do peso próprio dos revestimentos, aspecto favorável do ponto de vista construtivo;
- No que se refere à absorção de água por capilaridade, os resultados indicaram que as argamassas contendo PCM, especialmente aquelas com parafina encapsulada atuam como um mecanismo de proteção contra umidade, reduzindo a absorção capilar de até 56,3% e 77,7% em comparação a referência;
- Em relação ao desempenho mecânico verificou-se redução das resistências à compressão (de até 63% para parafina e 74,5% para AcS) em comparação à argamassa de referência e à tração na flexão (valores entre 1,50 MPa e 3,00 MPa). Apesar dessa redução, os valores obtidos mantiveram-se compatíveis com as exigências para argamassas de reboco, não inviabilizando sua aplicação como revestimento não estrutural.
- Os ensaios de ciclagem térmica evidenciaram que os PCMs à base de parafina apresentaram elevada estabilidade térmica e mássica após 50 ciclos entre 30 °C e 70 °C, mantendo sua funcionalidade ao longo dos ciclos. Em contrapartida, o AcS apresentou limitações de estabilidade, estabilizando-se apenas após o décimo ciclo, com massa remanescente em torno de 70%. Esse comportamento esteve associado ao surgimento de manifestações superficiais com processos de cristalização de sais nas argamassas, sendo necessário rever o método de encapsulamento.
- Os ensaios de desempenho térmico confirmaram a capacidade dos PCMs em reduzir as temperaturas. No interior do aparato que simula o cômodo, destacou-se a argamassa P11,5g, 10%, com redução de até 9,2% em relação à argamassa de referência, seguida pelas formulações P8g, 10% e AcS 10%, ambas com redução de 8,2%. Na face da placa de fibrocimento, os efeitos foram ainda mais expressivos, com a argamassa P11,5g, 10% apresentando redução de 4,4 °C, correspondente a 12,1% em relação à

referência. Esses resultados evidenciam o potencial das argamassas modificadas para a atenuação de picos térmicos e a melhoria do conforto térmico em edificações.

Dessa forma, conclui-se que a incorporação de PCMs encapsulados em argamassas de reboco é tecnicamente viável, com destaque para a parafina encapsulada, que apresentou desempenho térmico consistente aliado a estabilidade físico-química e comportamento mecânico compatível com a aplicação proposta. Por outro lado, os resultados obtidos com o AcS contribuem para a compreensão das limitações atuais do uso de PCMs salinos em matrizes cimentícias, reforçando a necessidade de soluções de encapsulamento mais compatíveis para sua aplicação em revestimentos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas deste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliar o desenvolvimento e a aplicação de novas estratégias de encapsulamento para PCMs de acetato de sódio, visando aumentar a compatibilidade química com matrizes cimentícias e reduzir a migração de sais solúveis para a superfície;
- Avaliar o desempenho térmico das argamassas contendo PCM em dupla camada (interna e externa da parede), considerando condições climáticas reais e ciclos térmicos naturais;
- Avaliar o desempenho térmico e mecânico de outros tipos de PCMs encapsulados, bem como a combinação com diferentes ligantes e adições minerais;
- Avaliar o comportamento térmico das argamassas contendo PCM durante o processo de liberação do calor armazenado, analisando a cinética de descarga térmica do sistema;
- Determinar a temperatura máxima de operação das argamassas contendo PCM verificando a estabilidade térmica.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ABSI, Zeyad Amin *et al.* Properties of PCM-based composites developed for the exterior finishes of building walls. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], vol. 16, 2022,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia Normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009;

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. 2 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.;

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, 2005. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-1**: 2023. Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023. 2 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: 2005. 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;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.;

AGUAYO, Matthew *et al.* The influence of microencapsulated phase change material (PCM) characteristics on the microstructure and strength of cementitious composites: Experiments and finite element simulations. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], vol. 73, p. 29–41, 2016;

ALVAREZ-RODRIGUEZ, Matias *et al.* Numerical model for determining the effective heat capacity of macroencapsulated PCM for building applications. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 242, p. 122478, 2024;

AMER SALIH, Moslih *et al.* Effect of elevated temperatures on mechanical and microstructural properties of alkali-activated mortar made up of POFA and GGBS. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 328, p. 127041, 2022;

ANDRÉ, Thiago da Silva. **Desenvolvimento de um material de mudança de fase aditivado com nanopartículas à base de carbono.**

2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022;

ASADI, Iman *et al.* Phase change materials incorporated into geopolymer concrete for enhancing energy efficiency and sustainability of buildings: A review. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], vol. 17, 2022;

AZZALI, N. *et al.* Spectral emittance of ceramics for high temperature solar receivers. **Solar Energy**, [s. l.], vol. 222, p. 74–83, 2021;

BACCEGA, Eleonora; BOTTARELLI, Michele; CESARI, Silvia. Addition of granular phase change materials (PCMs) and graphene to a cement-based mortar to improve its thermal performances. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 229, p. 120582, 2023;

BAÍA, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa. 4 ed. São Paulo: Nome da Rosa, 2008;

BATISTA, Walter Rubens Ribeiro Feitosa *et al.* **Determinação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da cal hidratada visando uso na construção civil**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS – CONAPESC, 1., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005;

BORGES, Anne K. de S. M.; MELO NETO, Osires de M.; MENDONÇA, Ana M. G. D. **Análise química-mineralógica de cimentos Portland comerciais**. *Revista Eletrônica da Universidade Católica de Petrópolis (REUCP)*, Petrópolis, v. 15, n. 1, p. 66–73, 2021. ISSN 2318-0692.

CABEZA, L. F. *et al.* Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1675–1695, 2011;

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Org.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2;

CARASEK, H. **Argamassas**. Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 863-891;

CASTRO, Luiz Cesar de. **Estudo e desenvolvimento de materiais “frios” para pavimentação urbana**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017;

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, [s. l.], vol. 55, nº 333, p. 18–32, 2009;

CHEN, Fan *et al.* Study on the preparation and thermal storage performance of flexibly encapsulated hydrate salt phase change capsules. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 153, 2026;

CHEN, Wei; ZHOU, Guobing; HOU, Yu. Experimental study on electrically triggered nucleation of supercooled salt hydrate composites. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 148, 2026;

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995;

COSTA, Susana Pereira Lemos. **Armazenamento de energia térmica através de materiais de mudança de fase**. 2014. 162 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2014;

COURA, Jean Cota; PROFETI, Demetrius; PROFETI, Luciene Paula Roberto. Eco-friendly chitosan/quartzite composite as adsorbent for dye removal. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], vol. 256, 2020;

CUNHA, Sandra; LIMA, Marine; AGUIAR, José B. Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 127, p. 1–10, 2016;

CUNHA, Sandra; SANTOS, Liliana; AGUIAR, José. Recovery paraffin wax waste as phase change material for application in cement mortars for exterior coatings of buildings. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 129, 2025;

DANTAS, Sérgio Roberto Andrade; VITTORINO, Fúlvio; LOH, Kai. Comparison of reflectance to solar radiation between mortars treated with TiO₂ and painted mortars after three years of exposure. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], vol. 46, p. 103829, 2022;

DAS, Dudul *et al.* A novel form stable PCM based bio composite material for solar thermal energy storage applications. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 30, 2020;

DIACONU, Bogdan Marian; CRUCERU, Mihai; ANGHELESCU, Lucica. Phase change materials in space systems. Fundamental applications, materials and special requirements-A review. **Acta Astronautica**, [s. l.], vol. 216, p. 163–213, 2024;

DONG, Chuanshuai *et al.* Electrically-controlled crystallization of supercooled sodium acetate trihydrate solution. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 260, 2022;

ELALFY, Dina A. *et al.* Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], vol. 54, p. 101482, 2024;

ELAQRA, Hossam A. *et al.* Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, Palestine, v. 206, p. 674-682, 18 feb. 2019;

EL MAJD, Abdelkoddouss *et al.* Advancing PCM research in building efficiency: A comprehensive investigation into PCM selection and critical integration strategies. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], vol. 96, p. 110485, 2024;

ERKIZIA, E. *et al.* Study of paraffinic and biobased microencapsulated PCMs with reduced graphene oxide as thermal energy storage elements in cement-based materials for building applications. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 84, p. 110675, 2024;

FEIJOO, J. *et al.* Effects of paraffin additives, as phase change materials, on the behavior of a traditional lime mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 361, 2022,

FELIX, E. F.; AGUIAR, J. L. B. Avaliação da absorção de água por capilaridade em argamassas de revestimento. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 8., 2009, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ANTAC, 2009,

GBEKOU, Franck Komi *et al.* Mechanical and thermophysical properties of cement mortars including bio-based microencapsulated phase change materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 352, 2022,

GENG, Chenzi *et al.* Reusing waste glass powder to improve the strength stability of cement at HTHP. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, China, v. 213, p. 1-8, 12 mar. 2022;

GOMES, L. G. **Utilização de resíduos de recapagem de pneus para produção de concreto leve estrutural**. Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, v. 5, p. 1–18, 2018;

GOVIN, Alexandre *et al.* Modification of water retention and rheological properties of fresh state cement-based mortars by guar gum derivatives. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 122, p. 772–780, 2016;

GUARDIA, Cynthia; BARLUENGA, Gonzalo; PALOMAR, Irene. Evaluation of the energy storage capacity of Phase Change Material cement-lime mortars by using heat flux meters and ultrasonic pulse transmission. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 50, 2022,

GUARDIA, Cynthia; BARLUENGA, Gonzalo; PALOMAR, Irene. PCM cement-lime mortars for enhanced energy efficiency of multilayered building enclosures under different climatic conditions. **Materials**, [s. l.], vol. 13, nº 18, 2020,

INNOCENTINI, M. D. M. et al Permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using foam incorporated alumina suspension. **Journal of Hazardous Materials**, v. 162, p. 212-221, 2009;

JIANG, Lili *et al.* Research of the thermal storage properties of thermally conductive carbon fiber-reinforced paraffin/olefin block copolymer composite phase change materials with thermotropic flexibility. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 76, p. 109761, 2024;

JIANG, Xing; MU, Song; LIU, Jiaping. Influence of chlorides and salt concentration on salt crystallization damage of cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], vol. 61, 2022;

JOCHEM, Lidiane Fernanda et al. Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. **Construction and Building Materials**, Brazil, v. 273, p. 1-13, 19 dec. 2020;

JOSÉ, Anu et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. **Construction and Building Materials**. India, vol. 263, pp. 120136, dez 2020;

KALNAES, S E; JELLE, B P. Citation for the published version. [s. l.], vol. 94, p. 150–176, 2015. Disponível em: <http://brage.bibsys.no/sintef>. Acesso em: 5 jan. 2025;

KARKRI, Mustapha *et al.* Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], vol. 88, p. 183–192, 2015;

KUPWADE-PATIL, Kunal *et al.* Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 158, p. 574–590, 2018;

LI, Xiang et al. Preparation of high closed porosity foamed ceramics from coal gangue waste for thermal insulation applications. **Ceramics International**. China, vol. 48, pag. 37055-37063, dez 2022;

LI, Wei *et al.* One-pot in situ synthesis of expandable graphite-encapsulated paraffin composites for thermal energy storage. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 481, 2024;

LI, Guo; XU, Guoqiang; TAO, Zhiyi. Effect on the Thermal Properties of Building Mortars with Microencapsulated Phase Change Materials for Radiant Floors. **Buildings**, [s. l.], vol. 13, n° 10, 2023;

LI, Guo; XU, Guoqiang; ZHANG, Jintao. Experimental investigation of thermal and mechanical characteristics of slag cement mortars with PCM for radiant floors. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], vol. 20, p. 02958, 2024;

LIU, Yizhe *et al.* **Carbon-Enhanced Hydrated Salt Phase Change Materials for Thermal Management Applications**. [S. l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024;

LIU, Yushi *et al.* Experimental exploration of incorporating form-stable hydrate salt phase change materials into cement mortar for thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 140, p. 112–119, 2018,

LOPEZ-ARIAS, Marina; FRANCIOSO, Vito; VELAY-LIZANCOS, Mirian. High thermal inertia mortars: New method to incorporate phase change materials (PCMs) while enhancing strength and thermal design models. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 370, p. 130621, 2023;

MAHVASH, Alireza; MOSTOFINEJAD, Davood; SALJOUGHIAN, Alireza. Mechanical and thermal properties of fiber-reinforced concrete incorporating shape-stabilized phase change materials: Evaluation of paraffin-silica fume and PEG-silica fume. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], p. 05816, 2026;

MEDJAHED, Bendida et al. Paraffin/beeswax/plaster as thermal energy storage composite: Characterization and application in buildings. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 88, 2024;

MESHGIN, P. et al. Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 713–721, 2012;

MEURER, Karine Weber et al. Evaluation of thermal and mechanical behavior of pavers with waste additions. **REM - International Engineering Journal**, [s. l.], vol. 77, n° 3, 2024;

MIN, Hae Won; KIM, Sumin; KIM, Hee Sun. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 149, p. 749–762, 2017;

NABER, C.; BELLMANN, F.; NEUBAUER, J. Influence of w/s ratio on alite dissolution and C-S-H precipitation rates during hydration. **Cement and Concrete Research**, Germany v. 134, p. 1-10, 20 apr. 2020;

NAVEEN KUMAR, G.; VINAYAKA RAM, V.; PARAMESHWARAN, R. Thermal and structural properties of cement mortar embedded with hybrid nanocomposite based phase change nanocapsules for building application. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 385, p. 131481, 2023;

NEVILLE, Adam M.. **PROPRIEDADES DO CONCRETO**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2016. 888 p.;

OLIVEIRA, Andrielli Morais de et al. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. **Journal of Building Engineering**. Brasil, vol.64, pp. 105616, abr. 2023;

OLIVEIRA, Matheus Menezes; LUCARELLI, Caio de Carvalho; CARLO, Joyce Correna. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, [s. l.], vol. 22, n° 3, p. 67–111, 2022;

PALACIOS, A. *et al.* A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 72, p. 108597, 2023;

PCZIECZEK, Adriane. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. 2017. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017;

PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. **Phase change materials for thermal energy storage**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2014;

PIRASACI, Tolga; SUNOL, Aydin. Potential of phase change materials (PCM) for building thermal performance enhancement: PCM-composite aggregate application throughout Turkey. **Energy**, [s. l.], vol. 292, p. 130589, 2024;

PIZZATTO, Sara Medeiros dos Santos. **Desempenho de placas cerâmicas porosas obtidas a partir de resíduo de beneficiamento de basalto e lama de cal para emprego em fachada ventilada**. 2020. 164 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2020;

RAMAKRISHNAN, Sayanthan *et al.* Development of thermal energy storage cementitious composites (TESC) containing a novel paraffin/hydrophobic expanded perlite composite phase change material. **Solar Energy**, [s. l.], vol. 158, p. 626–635, 2017;

REDDY, K. S.; MUDGAL, Vijay; MALLICK, T. K. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 15, p. 205–227, 2018;

REFAHI, Amirhossein; ROSTAMI, Abolfazl; AMANI, Mohammad. Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 82, p. 110556, 2024;

ROMERO, F. J. *et al.* Experimental method to determine specific heat capacity and transition enthalpy at a first-order phase transition: Fundamentals and application to a Ni-Mn-In Heusler alloy. **Thermochimica Acta**, [s. l.], vol. 706, p. 179053, 2021;

RUBIO-AGUINAGA, A. *et al.* Microstructural analysis of bio-based PCM-enhanced lime mortars: Durability and energy efficiency for sustainable buildings. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 481, 2025;

RUBITHER, RT22HC. **Phase change materials (PCM) – Applications and products**. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu>. Acesso em: 10 mar. 2024;

SADEGHI, Habibollah; JALALI, Ramin; SINGH, Rao Martand. A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 192, p. 114236, 2024;

SALIH, Moslih Amer *et al.* Effect of elevated temperatures on mechanical and microstructural properties of alkali-activated mortar made up of POFA and GGBS. **Construction and Building Materials**. Iraque, vol. 328, pp. 127041, abr 2022;

SARCINELLA, Antonella *et al.* Thermal properties of PEG-based form-stable Phase Change Materials (PCMs) incorporated in mortars for energy efficiency of buildings. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 67, p. 107545, 2023;

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2006;

SKALAR, Tina *et al.* Optimized composite lime cement plasters with phase change materials for enhanced building energy efficiency and comfort. **Ceramics International**, [s. l.], 2025;

VARGAS, Vicente Zetola *et al.* Experimental assessment of energy storage in microencapsulated paraffin PCM Cement mortars. [s. l.], 2024;

VIGOR, James E. *et al.* The pore structure and water absorption in Portland/slag blended hardened cement paste determined by synchrotron X-ray microtomography and neutron radiography. **RSC Advances**, v. 14, p. 4389, 2024;

WANG, Jin *et al.* Construction and investigation of paraffin based phase change composite containing chitosan expanded graphite aerogel as structure skeleton for low temperature thermal energy storage. **Energy Reports**, [s. l.], vol. 14, p. 5330–5339, 2025;

WANG, Jiabin *et al.* Investigations on the heat transfer performance of phase change material (PCM)-based heat sink with triply periodic minimal surfaces (TPMS). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], vol. 234, p. 126078, 2024;

WANG, Chuang *et al.* Preparation and thermal properties of a new hydrated salt phase change material without phase separation. **Materialia**, [s. l.], vol. 42, 2025;

WANG, Lei *et al.* Hydration, shrinkage, pore structure and fractal dimension of silica fume modified low heat Portland cement-based materials. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 272, p. 1-13, 4 dec. 2020;

WANG, Xinming *et al.* The effects of silica fume on C₃A hydration. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 250, p. 1-10, 15 mar. 2020;

WANG, Yingbin *et al.* Effects of wet-grinded superfine waste glass on the fresh properties and reaction characteristic of cement pastes. **Construction and Building MATERIALS**, China, v. 247, p. 1-9, 20 feb. 2020;

WU, Xiaowei *et al.* Multi-scale performance of underwater-castable ultra-high-volume fly-ash eco-friendly engineered cementitious composites: Microstructural characterization, workability, mechanical properties and environmental effects. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 506, 2026;

YANG, Zhengbo *et al.* Thermal performance of gypsum plasters with paraffin–expanded vermiculite coated by composite cementitious materials for building temperature management. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s. l.], vol. 290, 2025;

YANG, Zhengxian; DONG, Shilin; ZHANG, Yong. Particle packing optimization and pore structure assessment of ternary cementitious system based on X-ray computed tomography and mercury intrusion porosimetry. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 413, 2024;

YOO, Dong Ho *et al.* Performance of energy storage system containing cement mortar and PCM/epoxy/SiC composite fine aggregate. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], vol. 198, 2021;

YUAN, Qiang *et al.* Understanding the water transport behaviors of hydrophobic cement mortar by paraffin modification. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 435, 2024;

ZAHIR, Md Hasan *et al.* Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 64, p. 107156, 2023;

ZHAO, Ningrui *et al.* Density, vapor pressure, enthalpy of vaporization and heat capacity of (E)-isobutyl cinnamate. **Thermochimica Acta**, [s. l.], vol. 731, p. 179627, 2024;

ZHENG, Ruowei *et al.* Synergistic phase change and heat conduction of low melting-point alloy microparticle additives in expanded graphite shape-stabilized organic phase change materials. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 482, 2024.