

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Avaliação da influência dos Materiais De Mudança De Fase no conforto térmico  
de um espaço com desempenho monitorado na Zona Bioclimática 2M**

João Pedro Martins Pereira  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2026**

**JOÃO PEDRO MARTINS PEREIRA**

**Avaliação da influência dos Materiais De Mudança De Fase no conforto térmico de um espaço com desempenho monitorado na Zona Bioclimática 2M**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Joyce Correna Carlo

Coorientador: Matheus Menezes Oliveira

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P436a  
2026  
Pereira, João Pedro Martins, 1999-  
Avaliação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico de um espaço com desempenho monitorado na zona bioclimática 2M / João Pedro Martins Pereira. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (130 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Joyce Correna Carlo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.272>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Materiais - Propriedades térmicas. 2. Transformações de fase (Física estatística). 3. Isolamento térmico. 4. Simulação (Computadores). I. Carlo, Joyce Correna, 1973-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 620.11296

**JOÃO PEDRO MARTINS PEREIRA**

**Avaliação da influência dos Materiais De Mudança De Fase no conforto térmico de um espaço com desempenho monitorado na Zona Bioclimática 2M**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

---

João Pedro Martins Pereira  
Autor

---

Joyce Correna Carlo  
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 26/05/2026 às 09:14:34 e pela orientadora em 26/05/2026 às 11:07:09. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **1VRS.TZY6.KBFL** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos Deuses.

À minha mãe, Ana, meu pai, Pedro, e minhas irmãs Patrícia, Bruna e Flaviana, além das minhas sobrinhas Angelina, Maria Alice e Ana Clara.

À Beyoncé.

Aos meus amigos de Ervália e Viçosa.

Ao LATECAE.

À minha orientadora, Joyce Carlo, e ao Co-orientador, Matheus Oliveira.  
À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Também contou com financiamento do projeto APQ-02622-23 – Criação do ERDEM, ambiente para ensaios e monitoramento do desempenho termoenergético do edifício e seus componentes, financiado pela Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais. Contou com apoio do projeto 406426/2022-8 – Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e do Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).

## RESUMO

PEREIRA, João Pedro Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Avaliação da influência dos Materiais De Mudança De Fase no conforto térmico de um espaço com desempenho monitorado na Zona Bioclimática 2M.** Orientadora: Joyce Correna Carlo. Coorientador: Matheus Menezes Oliveira.

Esta pesquisa avalia a contribuição de Materiais de Mudança de Fase (PCM) no desempenho termoenergético e no conforto térmico de uma edificação na Zona Bioclimática 2M, em Viçosa-MG. Diante do elevado consumo energético para climatização predial, o estudo busca verificar a eficácia dessa tecnologia para Zona Bioclimática 2M. A metodologia integra o monitoramento experimental in loco no Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) e simulações computacionais no software EnergyPlus. Instalou-se o PCM RT21HC macroencapsulado em uma estrutura de suporte integrado a paredes de alvenaria, comparando uma Zona De Análise a uma Zona De Controle. O modelo numérico foi validado conforme a ASHRAE Guideline 14, apresentando Coeficientes de Variação do Erro Quadrático Médio (CVRMSE) entre 4,81% e 5,45%. Foram testados diferentes cenários de ventilação natural noturna, ar-condicionado e ventilação alternada (ventilação natural durante o dia e ar-condicionado no período noturno). Com base nos dados apresentados nas fontes, os resultados indicam que o PCM atua como um buffer térmico, aumentando a inércia térmica da envoltória ao promover um atraso térmico de até 5 horas e coeficientes de amortecimento significativamente superior à zona de controle, com um aumento de até 50% na capacidade de amortecimento térmico. Contudo, a aplicação passiva isolada, nas condições específicas da edificação no monitoramento, reduziu o percentual de horas em conforto anual de 63,74% para 40,76%, devido à retenção de baixas temperaturas que intensificaram o desconforto por frio no inverno. Essa limitação foi investigada pela integração do material a estratégias de ventilação noturna ou condicionamento alternado, que garantiram a solidificação completa do PCM e reduziram a demanda de aquecimento em até 31%. A dissertação conclui que o PCM é uma ferramenta robusta para a eficiência energética, desde que sua aplicação seja integrada a decisões de projeto e regimes de ventilação adequados. O protocolo técnico e o modelo validado consolidam uma base científica para a promoção de edificações mais resilientes no cenário brasileiro.

Palavras-chave: materiais de mudança de fase; conforto térmico; desempenho termoenergético; monitoramento experimental; simulação computacional

## ABSTRACT

PEREIRA, João Pedro Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Evaluation of the influence of Phase Change Materials on the thermal comfort of a space with monitored performance in Bioclimatic Zone 2M.** Adviser: Joyce Correna Carlo. Co-adviser: Matheus Menezes Oliveira.

This research evaluates the contribution of Phase Change Materials (PCM) to the thermal energy performance and thermal comfort of a building in Bioclimatic Zone 2M, in Viçosa-MG. Given the high energy consumption for building air conditioning, the study seeks to verify the effectiveness of this technology for Bioclimatic Zone 2M. The methodology integrates experimental monitoring in situ in Monitored Performance Space (EDEM) and computer simulations using EnergyPlus software. Macroencapsulated PCM RT21HC was installed in a support structure integrated with masonry walls, comparing an Analysis Zone with a Control Zone. The numerical model was validated according to ASHRAE Guideline 14, presenting Coefficients of Variation of Mean Square Error between 4.81% and 5.45%. Different scenarios of natural ventilation, artificial conditioning, and hybrid regimes were tested. Based on the data presented in the sources, the results indicate that PCM acts as a thermal buffer, increasing the thermal inertia of the envelope by promoting a thermal delay of up to 5 hours and damping coefficients significantly higher than the control zone, with an increase of up to 50% in thermal damping capacity. However, passive application alone, under the specific conditions of the building under monitoring, reduced the percentage of hours in annual comfort from 63.74% to 40.76%, due to the retention of low temperatures that intensified discomfort from cold in winter. This limitation was investigated by integrating the material with night ventilation or hybrid conditioning strategies, which ensured complete PCM solidification and reduced heating demand by up to 31%. The dissertation concludes that PCM is a robust tool for energy efficiency, provided that its application is integrated with appropriate design decisions and ventilation regimes. The technical protocol and validated model consolidate a scientific basis for promoting more resilient buildings in the Brazilian scenario

Keywords: phase change materials; thermal comfort; thermoenergetic performance; experimental monitoring; computer simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta Esquemática EDEM .....	27
Figura 2 - Lógica de Instalação do PCM (a) e célula testes (b).....	28
Figura 3 - Etapas laboratoriais de envase do PCM.....	30
Figura 4 - Sequência fotográfica do procedimento de medição (a) e envase do PCM (b), destacando a marcação dos invólucros.....	32
Figura 5 - PCM envasado sendo selados (c) e após a selagem passando por uma verificação de estanqueidade (d) .....	33
Figura 6 - Invólucros envasados com PC - Estado Líquido (a) e Estado Sólido (b) .....	34
Figura 7 - Projeto (a) e Execução (b) da estrutura de suporte para os invólucros de PCM...36	
Figura 8 - Esquema 3D da Parede com PCM macroencapsulado.....	37
Figura 9 - Projeto (a) e Execução (b) da fixação do PCM macroencapsulados na estrutura de suporte .....	37
Figura 10 - Projeto (a) e Execução (b) da fixação do PCM macroencapsulados na estrutura de suporte .....	38
Figura 11 - Identificação da umidade na parede de PCM Macroencapsulados.....	42
Figura 12 - Avaliação dos invólucros plásticos.....	42
Figura 13 - Modelo 3D EDEM.....	53
Figura 14- Planta Esquemática EDEM .....	53
Figura 15 - Esquema Isométrico: Fixação do PCM.....	55
Figura 16 - Vista superior de um modelo 3D mostrando o posicionamento dos sensores. ...56	
Figura 17- Distribuição e a variabilidade das temperaturas simuladas e medidas .....	65
Figura 18 – Temperatura externa e internas da Zona de Análise (ZA) e da Zona de Controle (ZC), simuladas e monitoradas, no período de 20 de julho a 20 de dezembro. ....	66
Figura 19 - Séries temporais horárias das temperaturas internas monitoradas e simuladas nas zonas de controle (ZC, sem PCM) e de análise (ZA, com PCM), em comparação à temperatura externa, no período de 14 a 30 de setembro. ....	68
Figura 20 - Atraso térmico nos dias de menor mínima (02/08, dia anterior e posterior) e de maior máxima (07/10, dia anterior e posterior). ....	71
Figura 21 - Amortecimento Térmico das Zonas de Controle e Análise observado por meio das temperaturas externas do ar.....	72
Figura 22 - Percentual mensal de horas em conforto na Zona de Análise, obtido por simulação considerando ocupação entre 08:00h e 18:00h ao longo do ano.....	74
Figura 23 - Percentual mensal de horas em conforto na Zona de <i>Controle</i> , obtido por simulação considerando ocupação entre 8h00 e 18h00 ao longo do ano.....	74
Figura 24 - Planta Esquemática EDEM .....	86
Figura 25 - Temperatura externa e internas da Zona de Análise (ZA) e da Zona de Controle	

(ZC), simuladas e monitoradas com ventilação noturna – simulação 2 .....	98
Figura 26 - Temperatura externa e internas da Zona de Controle (ZC) e da Zona de Análise (ZA) simuladas com ar-condicionado noturno, simulação 1.2.....	99
Figura 27 - Atraso térmico médio de três dias representativos para Simulação 1.2 (ar-condicionado) e Simulação 2 (ventilação natural noturna).....	100
Figura 28 - Amortecimento Térmico das Zonas de Controle e Análise observado por meio das temperaturas externas do ar para Simulação 1.2 (a) e Simulação 2 (b) .....	101
Figura 29 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 3 (ar-condicionado com carga interna) para as zonas (a) ZC e (b) ZA.....	102
Figura 30 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 4 (ventilação natural noturna com carga interna) para as zonas (a) ZC e (b) ZA .....	103
Figura 31 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 5 (ar-condicionado) para as zonas (a) ZC e (b) ZA .....	104
Figura 32 - Lógica de Instalação do PCM.....	121
Figura 33 - Projeto Executivo Estrutura de Suporte .....	122
Figura 34 - Esquema da fixação invólucros - PCM .....	124
Figura 35 - Projeto corte placas ACM .....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade dos PCMs .....	28
Tabela 2 - Materiais utilizados em cada etapa laboratorial.....	30
Tabela 3 - Materiais e ferramentas utilizadas na etapa de fixação da estrutura de suporte ..	35
Tabela 4 - Memorial do Dimensionamento do Volume de PCM utilizado .....	39
Tabela 5 - Propriedade dos PCMs .....	54
Tabela 6 - Equipamentos utilizados para o monitoramento da edificação .....	56
Tabela 7 - Componentes adotados na simulação. ....	58
Tabela 8 - Propriedades dos componentes adotadas na simulação. ....	59
Tabela 9 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA) .....	63
Tabela 10 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Controle (ZC) .....	63
Tabela 11 - Métricas para os dados de Temperatura Superficial da Parede com PCM .....	64
Tabela 12 - Métricas para os dados de Temperatura Superficial da parede com PCM na Zona de Análise e a equivalente sem PCM na Zona de Controle .....	64
Tabela 13 - Temperaturas mínimas e máximas diárias (oC) monitoradas em 3 dias da Figura 19.....	69
Tabela 14 - Percentual de Horas em Conforto a partir das temperaturas operativas simuladas. ....	73
Tabela 15 - Configurações do ambiente durante o período de monitoramento. ....	86
Tabela 16 - Equipamentos utilizados para o monitoramento da edificação .....	87
Tabela 17 - Condições ambientais internas das simulações.....	89
Tabela 18 – Propriedades térmicas dos componentes adotados na simulação. ....	90
Tabela 19 - Propriedades térmicas dos materiais adotados na simulação. ....	91
Tabela 20 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA) - Simulação 1.1, Ar-condicionado noturno. ....	95
Tabela 21 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZC) - Simulação 1.1, Ar-condicionado noturno. ....	96
Tabela 22 Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA) - Simulação 2, Ventilação Natural Noturna.....	96
Tabela 23 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZC) - Simulação 2, Ventilação Natural Noturna.....	96
Tabela 24 - Graus-Hora (°C.h) das simulações 3 a 5 com para as duas zonas térmicas ....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACM	Aluminum Composite Material (Alumínio Composto)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CondFD	Conduction Finite Difference
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrático Médio)
EDEM	Espaço de Desempenho Monitorado
EPS	Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido)
GH	Graus-Hora
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IEA	International Energy Agency
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Latecae	Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética
MBE	Mean Bias Error (Erro Médio de Tendência)
NMBE	Normalized Mean Bias Error (Erro Médio de Tendência Normalizado)
PCM	Phase Change Material (Material de Mudança de Fase)
PHC	Percentual de Horas em Conforto
PTHP	Pumped Thermal Heat Pump (Bomba de Calor)
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais
SHS	Sensible Heat Storage (Armazenamento de Calor Sensível)
SSPCM	Shape-Stabilized Phase Change Material
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TES	Thermal Energy Storage (Armazenamento de Energia Térmica)
TMF	Temperatura de Mudança de Fase
UR	Umidade Relativa
ZA	Zona de Análise (com PCM)
ZB	Zona Bioclimática
ZC	Zona de Controle (sem PCM)

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área útil efetiva da parede onde o PCM é instalado
E	Espessura da camada de PCM
M	Massa específica do PCM (Eq. 1) ou Massa total de PCM (Tabela 4)
M <sub>i</sub>	Valor medido (variável estatística)
$\bar{M}$	Média dos valores medidos
n	Número de invólucros ou Número de observações/pontos de dados
S <sub>i</sub>	Valor simulado (variável estatística)
T <sub>ext</sub>	Temperatura externa
T <sub>h</sub>	Temperatura horária
T <sub>int</sub>	Temperatura interna
V	Volume total de PCM por invólucro
$\alpha$	Absortância (referente à pintura externa e superfícies)
$\Delta T_{ext}$	Amplitude da temperatura externa
$\Delta T_{int}$	Amplitude da temperatura interna
$\mu$	Coefficiente de Amortecimento Térmico
$\varphi$	Atraso Térmico (ou deslocamento de fase)
GHA	Graus-hora de aquecimento
GHR	Graus-hora de resfriamento
°C	Graus Celsius
W/(m·K)	Watt por metro Kelvin (condutividade térmica)
J/(kg·K)	Joule por quilograma Kelvin (calor específico)
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico (densidade)

## SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>15</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2.1 Objetivos específicos .....	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	18
<b>2. CAPÍTULO 2 – INSTALAÇÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM) MACROENCAPSULADO EM UMA EDIFICAÇÃO DE DESEMPENHO MONITORADO (EDEM)</b> .....	<b>20</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	21
2.2 OBJETIVO .....	22
2.3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	22
2.4 MATERIAS E PROCESSO METODOLÓGICO .....	26
2.4.1 Edifício experimental e sistema ensaiado.....	26
2.4.2 Material de mudança de fase e macroencapsulamento.....	28
2.4.3 Preparação do ambiente e pré-condicionamento do PCM .....	30
2.4.4 Extração do PCM do recipiente original (Etapa A).....	31
2.4.5 Medição volumétrica do PCM (Etapa B).....	32
2.4.6 Envase dos invólucros plásticos (Etapa C).....	32
2.4.7 Selagem e verificação de estanqueidade (Etapa D).....	33
2.4.8 Refrigeração, solidificação e armazenamento temporário (Etapa E) .....	33
2.4.9 Transporte dos módulos ao edifício experimental.....	34
2.4.10 Estrutura de suporte em madeira .....	35
2.4.11 Fixação dos invólucros de PCM na estrutura .....	36
2.4.12 Instalação das placas de ACM e acabamento .....	38
2.4.13 Avaliação Pós-Instalação .....	38
2.5 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	39
2.5.1 Adequação do dimensionamento e configuração final do sistema .....	39
2.5.2 Desempenho construtivo e operacional da macroencapsulação .....	40
2.5.3 Qualidade geométrica e estabilidade do painel de PCM .....	41
2.5.4 Comportamento pós-instalação e integridade dos invólucros.....	41
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
2.7 AGRADECIMENTOS .....	44
2.8 REFERÊNCIAS.....	44

<b>3. CAPÍTULO 3: DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM UM ESPAÇO DE DESEMPENHO MONITORADO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULADA .....</b>	<b>48</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	49
3.2 OBJETIVO GERAL .....	50
3.3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	50
3.3.1 PROCESSO METODOLÓGICO.....	52
3.3.2 Caracterização e levantamento da edificação .....	52
3.3.3 Monitoramento do EDEM .....	54
3.3.4 Simulações Termoenergéticas .....	56
3.3.5 Análise e Comparação dos Resultados.....	60
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
3.4.1 Simulação Comparada ao Monitoramento .....	63
3.4.2 Avaliação: Zona de Controle (ZC) x Zona de Análise (ZA) .....	66
3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
3.2 AGRADECIMENTOS .....	78
3.3 REFERÊNCIAS.....	78
<b>4. CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) ASSOCIADOS A SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL NOTURNO E AR-CONDICIONADO NO ENERGYPLUS .....</b>	<b>82</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	83
4.1 REFERENCIAL TEÓRICO .....	83
4.2 OBJETIVO .....	85
4.3 METODOLOGIA OU MATERIAIS E MÉTODOS .....	85
4.3.1 Monitoramento .....	85
4.3.2 Simulação .....	87
4.3.3 Análise e Comparação dos Resultados.....	91
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	95
4.4.1 Simulação Comparada ao Monitoramento .....	95
4.4.2 Avaliação: Zona de Controle (ZC) x Zona de Análise (ZA) .....	97
4.4.3 Simulações com ocupação e com condicionamento combinado (ventilação natural 102	
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
4.1 AGRADECIMENTOS .....	108
4.2 REFENRÊCIAS.....	108
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>114</b>

# 1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com o relatório *World Energy Outlook 2022*, o setor residencial e o setor de serviços (comércio e instituições) respondem por 30% e 25%, respectivamente, do consumo global de energia, com projeção de aumento de até 75% até 2070 (IEA, 2022). Essas edificações são responsáveis por cerca de 35% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sendo que 25% da energia mundial consumida nos edifícios destina-se a aquecimento e resfriamento artificial (Jia et al., 2021). A Agência Internacional de Energia (IEA, 2022) projetou um crescimento na demanda energética para refrigeração até 2050, com um aumento aproximado de 150% globalmente e de 300% a 600% em países de clima quente, incluindo nações do Sudeste Asiático, América Latina, Índia e China.

Para reduzir o impacto ambiental, é necessário investir em medidas que aumentem a eficiência energética das edificações. Uma das estratégias indicadas para climas com grande amplitude térmica e com temperaturas externas próximas a faixa de conforto é a inércia térmica, que pode ser utilizada para manter a temperatura interna dos edifícios mais estável. Idealmente, materiais com alta inércia térmica absorvem e armazenam calor durante o dia, liberando-o à noite, o que reduz a necessidade de aquecimento ou resfriamento (Brito, 2015). Em sistemas de construções leves e com restrições ao uso de materiais pesados e densos tradicionalmente associados a alta capacidade térmica, como tijolo, argila, concreto e rocha, é possível aumentar a inércia térmica com Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Material* - PCMs) (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

Os PCMs são uma tecnologia emergente no cenário da construção civil brasileira com potencial para a conservação de energia em edifícios. Eles armazenam energia na forma de calor latente, que pode ser liberado quando necessário para manter o conforto térmico dos ocupantes. Em comparação ao armazenamento de calor sensível (*Sensible Heat Storage* - SHS), os PCMs oferecem vantagens como: ausência de emissão de gases de efeito estufa durante a fase de operação, estabilidade de temperatura e maior eficiência energética, tornando-se uma tecnologia promissora para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa em edifícios (Zhan et al., 2023).

O desempenho térmico da incorporação de PCMs como sistemas passivos em edificações já foi comprovado em regiões de latitudes médias e clima temperado (Wang et al., 2022). No entanto, uma pesquisa internacional destacou limitações no uso passivo de PCMs em sistemas de armazenamento de energia térmica para refrigeração em edifícios. Faraj et al.

(2020) apontaram que algumas dessas limitações incluem baixos valores de transferência de calor convectiva, cristalização incompleta dos PCMs durante a noite e área de contato limitada entre os PCMs e o ar. Além disso, a integração de PCMs a sistemas ativos pode contornar as baixas transferências de calor convectivas (Faraj et al., 2020).

No Brasil, onde predominam climas quentes e úmidos, há escassez de pesquisas sobre o desempenho dos PCMs. Oliveira, Lucarelli e Carlo (2022) avaliaram o aumento anual das horas de conforto térmico em um escritório tipo para 26 cidades, obtendo os melhores resultados nas antigas zonas bioclimáticas (ZBs) mais frias (ZB 1 e 4) (ABNT, 2005). No entanto, os resultados não consideraram sazonalidades, como diferenças de temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, e cobertura do céu, entre meses frios e quentes. Além disso, a tipologia de escritório utilizada não incluiu o condicionamento artificial. Devido à limitação temporal (das 8h às 18h), as variações do conforto térmico decorrentes do uso de PCMs não foram avaliadas nos horários mais frios da noite, especialmente no inverno nas ZBs 1, 2 e 3 (Oliveira, 2023).

Outro fator limitante é a falta de pesquisas que investiguem a viabilidade técnica da aplicação real de PCMs em edificações no Brasil, excluindo-se a análises econômicas periféricas a este estudo. Os artigos existentes baseiam-se em simulações calibradas por outros autores ou na robustez de programas de simulações termoenergéticas consolidados, como o *EnergyPlus* (Sharma e Rai, 2020; Wang et al., 2020; Oliveira et al., 2025). Com a criação do Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) na Universidade Federal de Viçosa (UFV), investigar o desempenho termoenergético de uma edificação real para calibrar simulações com PCMs tornou-se viável no contexto climático de Viçosa, MG (20,75° S e 42,88° O) na Zona Bioclimática 2M (ABNT, 2024). Por sua vez, a utilização de um modelo de simulação devidamente calibrado aumenta a confiabilidade dos dados de saída e, conseqüentemente, das análises realizadas sobre o desempenho termoenergético da edificação.

Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: Como a incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCMs), avaliada por meio de simulações calibradas com dados monitorados no Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM), influencia o desempenho termoenergético de uma edificação real no clima de Viçosa-MG?

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a contribuição do Material de Mudança de Fase (PCM) no desempenho termoenergético de um espaço de desempenho monitorado no contexto climático de Viçosa-MG na Zona Bioclimática 2M (ABNT, 2024).

### 1.2.1 Objetivos específicos

- a) Detalhar, padronizar e validar um método replicável de instalação de PCM macroencapsulados em paredes de uma edificação experimental monitorada, com ênfase na documentação técnica, na compatibilidade construtiva e nos principais desafios práticos do processo;
- b) Quantificar e comparar o desempenho térmico e as condições de conforto em ambiente monitorado com e sem PCM, no clima de Viçosa-MG, por meio de dados experimentais e simulações, avaliando a confiabilidade dos modelos numéricos e a efetividade do material em diferentes cenários de uso;
- c) Avaliar o impacto da integração do PCM associados a sistemas de ventilação natural e ar-condicionado, no desempenho termoenergético de um espaço monitorado, identificando as configurações que aprimoram o conforto térmico e a eficiência energética do sistema.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos e um apêndice, apresentados a seguir:

- a) Capítulo 1 – Introdução geral:
- b) Apresenta a contextualização e formulação do problema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, a relevância e o ineditismo da pesquisa, além de um breve resumo dos capítulos que compõe o texto da dissertação;
- c) Capítulo 2 – Instalação de material de mudança de fase macroencapsulado em uma edificação de desempenho monitorado (EDEM):  
Descreve o desenvolvimento, a padronização e a aplicação do método de macroencapsulamento, dimensionamento e instalação do PCM RT21HC na parede interna do EDEM, incluindo etapas laboratoriais, critérios de escolha dos invólucros, memorial de cálculo e avaliação pós-instalação;
- d) Capítulo 3 – Desempenho térmico de materiais de mudança de fase em um espaço de desempenho monitorado, análise experimental e simulada:  
Avalia o desempenho térmico do PCM RT21HC no EDEM a partir do monitoramento experimental e de simulações termoenergéticas no EnergyPlus, com calibração do modelo numérico e comparação entre zona com PCM e zona de controle. Parâmetros como deslocamento de fase, coeficiente de amortecimento e Percentual de Horas em Conforto foram analisados.

- e) Capítulo 4 – Avaliação do desempenho termoenergético do uso de Materiais de Mudança de Fase (PCM) associados a sistemas de ventilação natural noturno e ar-condicionado no EnergyPlus:
- f) Investiga o impacto da integração do PCM a diferentes estratégias de ventilação (natural, ar-condicionado e modo alternado) no desempenho termoenergético do EDEM ao longo do ano. Considera diferentes cenários de operação para identificar configurações de ventilação que maximizem o conforto térmico e a eficiência energética.
- g) Capítulo 5 – Conclusão geral:  
Sintetiza e articula os principais resultados e conclusões dos Capítulos 2, 3 e 4, retomando a hipótese e a pergunta de pesquisa, discutindo as contribuições do estudo e apresentando recomendações para trabalhos futuros.
- h) Apêndice A – Relatório técnico e procedimentos de instalação do PCM no EDEM:  
Reúne o protocolo detalhado de extração, envase, selagem, refrigeração, transporte e fixação dos invólucros de PCM, bem como o projeto executivo da estrutura de suporte, cronograma de execução e registros fotográficos do processo.

#### 1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro por desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BRITO, A. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-13062016-102613>

FARAJ, K.; KHALED, M.; FARAJ, J.; *HACHEM, F.*; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109579, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>>. Acesso em: 08 de

Janeiro de 2025.

JIA, J.; LIU, B. MA, L.; WANG, H.; LI, D.; WANG, Y. Energy saving performance optimization and regional adaptability of prefabricated buildings with PCM in different climates. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 26, p. 101164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101164>

OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C.; CARLO, J. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 67-111, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610>

OLIVEIRA, M.; LUCARELLI, C.; CARLO, J. Influência do uso de PCMs em escritório nos climas brasileiros. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024006, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v15i00.8673208>

OLIVEIRA, M. **Investigação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico em modelo de escritório nos climas brasileiros**. 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

WANG, X.; LI, W.; LUO, Z.; WANG, K.; SHAH, S. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. **Energy & Buildings**, v. 260, p.1-25, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>

ZHAN H.; MAHYUDDIN N.; SULAIMAN R.; KHAYATIAN F. Phase Change Material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and thermal comfort: A review. **Construction and Building Materials**, v. 397, p. 1-37, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132312>.

## **2. CAPÍTULO 2 – INSTALAÇÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM) MACROENCAPSULADO EM UMA EDIFICAÇÃO DE DESEMPENHO MONITORADO (EDEM)**

### **Resumo**

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a aplicação de procedimentos para macroencapsulamento, dimensionamento e instalação do material de mudança de fase RT21HC em uma parede de edificação experimental de desempenho monitorado (EDEM). O objetivo deste artigo foi viabilizar, em escala real, a instalação de um painel de PCM construtivamente estável, reproduzível e apto a futuros monitoramentos termoenergéticos e simulações numéricas. O procedimento abrangeu etapas laboratoriais de envase, selagem, solidificação e transporte dos invólucros plásticos, bem como o projeto e execução de uma estrutura de suporte em madeira e o fechamento em placas de alumínio composto. Em função da disponibilidade de material, a massa total de PCM instalada correspondeu a cerca de 70% da condição ideal inicialmente projetada, mantendo, contudo, a homogeneidade da camada ativa sobre 6,00 m<sup>2</sup> de área útil. A avaliação pós-instalação permitiu identificar e corrigir problemas construtivos, como umidade localizada próxima aos sistemas e abaulamento das placas de revestimento, solucionados com ajustes de fixação. Os resultados demonstram a viabilidade técnica de instalação do sistema em estado puro e fornecem um protocolo detalhado passível de replicação em outros estudos, constituindo base experimental para investigações futuras sobre a influência do RT21HC no desempenho térmico de edificações em clima de Viçosa - MG.

### **Abstract**

This article presents the development and application of procedures for macroencapsulation, sizing, and installation of the RT21HC phase-change material in a wall of an experimental building with monitored performance (EDEM). The objective of this article was to enable, on a full-scale basis, the installation of a PCM panel that is structurally stable, reproducible, and suitable for future thermal-energy monitoring and numerical simulations. The procedure included laboratory stages of filling, sealing, solidification, and transport of the plastic casings, as well as the design and construction of a wooden support structure and the cladding with aluminum composite panels. Due to material availability, the total mass of PCM installed corresponded to approximately 70% of the initially designed ideal condition, while maintaining the homogeneity of the active layer over a 6.00 m<sup>2</sup> usable area. The post-installation evaluation allowed for the identification and correction of construction issues, such as localized moisture near the systems and bulging of the cladding panels, which were resolved through fastening adjustments. The results demonstrate the technical feasibility of installing the system in its pure form and provide a detailed protocol that can be replicated in other studies, constituting an experimental basis for future investigations into the influence of RT21HC on the thermal performance of buildings in the climate of Viçosa - MG.

**Palavras-Chaves:** Materiais de mudança de fase (PCM); Macroencapsulado; Edificação Experimental.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela do consumo global de energia (30%) e das emissões de dióxido de carbono (35%), impulsionando a busca por materiais inovadores que promovam a eficiência energética (Cunha; Aguiar, 2020; Liu et al., 2024). Neste cenário, os Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* – PCMs) destacam-se pela capacidade de armazenar e liberar energia térmica na forma de calor latente, mantendo a temperatura quase constante durante a transição de fase (Rathore; Shukla, 2020). Para aplicações em edificações, destacam-se PCMs orgânicos, como parafinas microencapsuladas, e PCMs inorgânicos, como sais hidratados, que podem ser integrados em paredes, tetos, pisos e tijolos (Faraj et al., 2020; Cunha; Aguiar, 2020; Suresh; Hotta; Saha, 2022).

No entanto, a aplicação prática desses materiais em componentes construtivos enfrenta desafios técnicos, especialmente no que tange à compatibilidade com os materiais de construção tradicionais e à prevenção de vazamentos durante a fase líquida (Osibodu; Adeyinka; Mbelu, 2024).

A literatura classifica as técnicas de incorporação em métodos diretos e de encapsulamento. Embora a incorporação direta seja econômica, ela frequentemente resulta em redução da resistência mecânica dos elementos construtivos e riscos elevados de exsudação do material (Cunha; Aguiar, 2020). Para mitigar esses problemas em aplicações de grande escala, o macroencapsulamento, que consiste em confinar o PCM em recipientes maiores que 1 cm, como painéis, tubos ou invólucros, apresenta-se como uma solução eficaz. Esta técnica evita o contato direto do PCM com a matriz construtiva, preservando a integridade estrutural da edificação e facilitando a instalação em obras novas ou reformas (Rathore; Shukla, 2020).

Além da contenção física, a geometria e o material do encapsulamento desempenham um papel crucial na eficiência da troca térmica. Recipientes com alta condutividade térmica e formatos que maximizem a área superficial são preferíveis para garantir que o PCM responda adequadamente às variações de temperatura diárias (Suresh; Hotta; Saha, 2022). Contudo, a implementação prática exige um protocolo rigoroso de dimensionamento e execução para assegurar que a quantidade de material instalada seja suficiente para gerar a inércia térmica desejada sem comprometer a estabilidade física do sistema de vedação.

No contexto de climas quentes, a estabilidade do PCM dentro dos invólucros é crítica, pois as temperaturas operacionais podem manter o material em estado líquido por períodos prolongados. Estudo recente indica que o macroencapsulamento, quando bem executado, oferece proteção contra interações ambientais adversas e permite a integração de volumes significativos de material, o que é essencial para modular a carga térmica em edificações leves

(Ait Laasri et al., 2024). A validação de métodos construtivos que sejam replicáveis e viáveis é, portanto, uma etapa indispensável para a difusão dessa tecnologia. Por isso, apesar do embasamento teórico, a eficácia do PCM depende do clima local e da sua instalação *in loco*, sendo fundamental validar seu desempenho experimentalmente (Rathore; Shukla, 2020; Al-Absi et al., 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022; Liu et al. 2024; Alvarez-Rodriguez et al., 2025).

Diante do exposto, este capítulo descreve o processo de desenvolvimento e execução de um sistema de instalação de PCM macroencapsulado (RT21HC) nas paredes do Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) na Zona Bioclimática 2M (ABNT, 2024). São detalhadas as etapas de envase, selagem e fixação, bem como os desafios práticos enfrentados para garantir a estanqueidade e a homogeneidade da camada de armazenamento térmico.

## 2.2 OBJETIVO

Desenvolver um processo replicável de instalação de materiais de mudança de fase (PCM) macroencapsulados na parede de uma edificação experimental de desempenho monitorado (EDEM).

## 2.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* – PCMs) são materiais inteligentes com grande capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). O mecanismo de funcionamento dos PCMs consiste na absorção e liberação de energia térmica, mantendo uma temperatura superficial praticamente constante durante a transição de fase. Idealmente, o PCM absorve energia (passando do estado sólido para o líquido) quando a temperatura do ar se eleva, proporcionando um efeito de resfriamento. Quando a temperatura do ar se reduz para valores inferiores à temperatura de solidificação do material, o PCM retorna ao estado sólido, liberando o calor armazenado e proporcionando efeito de aquecimento (Rathore; Shukla, 2020; Faraj et al., 2020; Cunha; Aguiar, 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022; Reddy; Ghazali; Kumarasamy, 2024).

Em comparação com componentes construtivos tradicionais de alta capacidade térmica, como concreto, argila e rocha, os PCMs podem armazenar entre 5 e 14 vezes mais energia por unidade de volume (Wahid et al., 2017). Essa propriedade é fundamental para promover o atraso térmico e o amortecimento da amplitude da temperatura interna, elevando, conseqüentemente, o conforto térmico e a eficiência energética das edificações (Faraj et al., 2020).

Os PCMs são classificados em três grupos principais: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Faraj et al., 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). Os PCMs orgânicos, compostos por cadeias de carbono e hidrogênio, subdividem-se em parafinados e não parafinados, incluindo ácidos graxos, polietilenoglicol e álcoois (Faraj et al., 2020).

As parafinas destacam-se por serem quimicamente inertes, não corrosivas, duráveis, atóxicas e ecológicas (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). Apresentam um ponto de fusão constante e pouca subfusão, embora possuam baixa condutividade térmica, fator que pode ser mitigado pela adição de materiais metálicos (Kurdi et al., 2021).

Já os PCMs inorgânicos incluem sais hidratados e metálicos, sendo os sais hidratados preferenciais para aplicações na construção civil devido à maior densidade, o que lhes confere maior capacidade de armazenamento de calor latente por unidade volumétrica, além de melhor condutividade e caráter não inflamável (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). A temperatura de fusão (TMF) dos sais hidratados geralmente varia entre 5 °C e 130 °C (Osibodu; Adeyinka; Mbelu, 2024). Por sua vez, os PCMs eutéticos são formados pela combinação de dois ou mais PCMs (orgânicos e/ou inorgânicos) que apresentam ciclos de mudança de fase concordantes e agem como um material único (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

Para uso em edificações, é crucial selecionar PCMs com alta capacidade de armazenamento de calor latente, elevada capacidade de calor específico, alta condutividade térmica e mínima subfusão (Cunha; Aguiar, 2020; Pereira et al., 2025). Idealmente, a temperatura de fusão dos PCMs usados em edifícios deve estar alinhado com a faixa de conforto térmico interno (Pereira et al., 2025). Além disso, a incorporação adequada do PCM nos sistemas construtivos é, portanto, essencial para o desempenho térmico (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024). Considerando que a mudança de fase frequentemente implica a transição para o estado líquido, é necessário empregar métodos que limitem sua incorporação direta e previnam vazamentos (Bagazi et al., 2021).

O encapsulamento é a técnica mais comum, pois envolve revestir o PCM com outro material para garantir durabilidade, resistência e estabilidade térmica, além de evitar vazamentos (Cunha; Aguiar, 2020; Wahid et al., 2017). No microencapsulamento, o PCM é confinado em partículas com dimensões entre 0,1 µm e 1 mm, o que otimiza a transferência de calor ao aumentar a superfície de contato. No macroencapsulamento, são utilizados invólucros maiores que 1 mm, técnica frequentemente empregada em PCMs inorgânicos encapsulados em cápsulas metálicas (Cunha; Aguiar, 2020; Pereira et al., 2025). Além do encapsulamento, há outras formas de incorporação, como a incorporação direta, em que o PCM em pó ou líquido é misturado a materiais de construção, como gesso ou concreto (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). Embora seja o método mais econômico, apresenta riscos de incompatibilidade

e vazamento. Uma alternativa é o uso de PCM na forma estabilizada (*Shape-Stabilized Phase Change Material* - SSPCM), onde o material é distribuído em uma matriz polimérica ou em um suporte poroso, como vermiculita ou sílica (Suresh; Hotta; Saha, 2022). Essa técnica permite que o PCM realize ciclos repetidos de mudança de fase sem deformação ou vazamento, sendo eficaz para uso em cimento e argamassas.

Os PCMs podem ser integrados passivamente a vários componentes do envelope das edificações, sendo especialmente úteis em construções leves (Alvarez-Rodriguez et al., 2025). Entre as aplicações típicas, destacam-se as paredes, coberturas e fechamentos translúcidos. Nas paredes, aplicação mais comum, sua eficácia depende do tipo de PCM, da TMF, da orientação solar, das condições climáticas e da espessura (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

Nas coberturas e telhados, devido à alta incidência solar, o PCM (geralmente com TMF entre 30 °C e 40 °C) tem demonstrado reduzir o fluxo de calor descendente. Já nos fechamentos translúcidos, como janelas, a incorporação de PCMs pode reduzir o ganho de energia solar em mais de 50% durante o verão. No entanto, mesmo no estado líquido, o material não apresenta a mesma transparência do vidro comum (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

O desempenho térmico dos PCMs é multifatorial, dependendo das condições climáticas locais, da orientação, da TMF, da quantidade de PCM e, sobretudo, da sua localização no sistema construtivo (Al-Absi et al., 2020). Quanto à localização da camada de instalação, embora haja divergência sobre o posicionamento ideal (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022), a colocação do PCM na camada mais próxima ao ambiente interno tende a maximizar o desempenho, pois aumenta a inércia térmica (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

A posição ideal depende, entretanto, do objetivo principal, seja ele aquecimento ou resfriamento (Arici et al., 2020). Em relação à espessura, o aumento não resulta em benefícios lineares: duplicar a espessura de 3 cm para 6 cm teve influência média inferior a 2% no Percentual de Horas de Conforto (PHC) (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024). Camadas mais espessas podem agir apenas como isolante térmico ou armazenador de calor sensível se o ciclo de fase não for completado, podendo até prejudicar o desempenho (Sovetova; Memon; Kim, 2019; Al-Yasiri; Szabó, 2021).

Outro fator determinante é a ventilação, uma vez que o PCM deve completar seus ciclos de carga e descarga para ser eficaz (Bai et al., 2020). A ventilação natural seletiva, especialmente a noturna, é essencial para a descarga do calor armazenado (Berardi & Soudian, 2019; Bai et al., 2020). Sem ventilação noturna, pode ocorrer superaquecimento (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

No contexto brasileiro, o volume de pesquisas sobre PCMs em climas quentes e úmidos ainda é limitado quando comparado a estudos em regiões de altas latitudes (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). Simulações indicam que o uso de PCMs é mais promissor nas antigas Zonas Bioclimáticas (ZBs) mais frias (ZB1 a ZB5) (ABNT, 2005), com reduções significativas no consumo energético em edifícios naturalmente ventilados (Brito et al., 2017; Pons & Stanesco, 2017; Oliveira et al., 2025). Em Brasília, ZB4 (ABNT, 2005), observou-se uma redução de até 49% no consumo de energia para resfriamento ao utilizar PCM com TMF de 25 °C (Marin et al. 2016). Oliveira, Lucarelli e Carlo (2024) confirmaram esse desempenho, verificando aumento do PHC para 95%, representando uma melhoria de 33% em relação ao caso base. Em contrapartida, cidades da ZB8 (ABNT, 2005), como Manaus e Fortaleza, apresentaram desempenho inferior. Em Manaus, o consumo de energia aumentou 9%, enquanto em Fortaleza a economia foi de apenas 0,23% (Saffari et al. (2017). Em Belém ZB8 (ABNT, 2005), o PHC reduziu em média 2% em relação ao caso base, demonstrando que o efeito dos PCMs depende fortemente do clima local (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

Essa variabilidade entre cidades do mesmo grupo climático evidencia que o Zoneamento Bioclimático na época do desenvolvimento da pesquisa em 2023 (ABNT, 2005) ou a classificação Köppen–Geiger não são parâmetros suficientes para prever o desempenho dos PCMs. Estudos recentes apontam que a análise de parâmetros climáticos específicos, como Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Umidade Relativa (UR) e Direção do Vento, é mais apropriada. A combinação ideal de condições para o uso de PCMs no Brasil envolve temperaturas médias anuais entre 15 °C e 22 °C e radiação solar média anual acima de 3.750 W/m<sup>2</sup> (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

Resultados experimentais e numéricos em paredes de alvenaria com macrocápsulas de PCM demonstraram capacidade de reduzir e atrasar o fluxo de calor (Rathore; Shukla, 2020). Pesquisas em células-teste sob climas tropicais mostraram uma dualidade sazonal: o PCM proporcionou benefícios durante o inverno, mas no verão, a retenção excessiva de calor tornou-se problemática, destacando a importância da seleção adequada do material (Liu et al., 2020).

Cidades da ZB3 (ABNT, 2005), como Belo Horizonte e Diamantina, apresentaram melhorias significativas de conforto térmico com o uso de PCMs (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024). Para edificações com fechamentos leves, as recomendações mais adequadas incluem PCMs com TMF de 21 °C, que proporcionaram os melhores resultados e maior PHC. PCMs com TMF de 25 °C e 28 °C também mostraram desempenho satisfatório, embora inferior. A seleção por TMFs mais baixas difere das recomendações de Brito et al. (2017), que sugeriam TMFs próximas a 30 °C para zonas mais frias, refletindo variações entre produtos comercializados

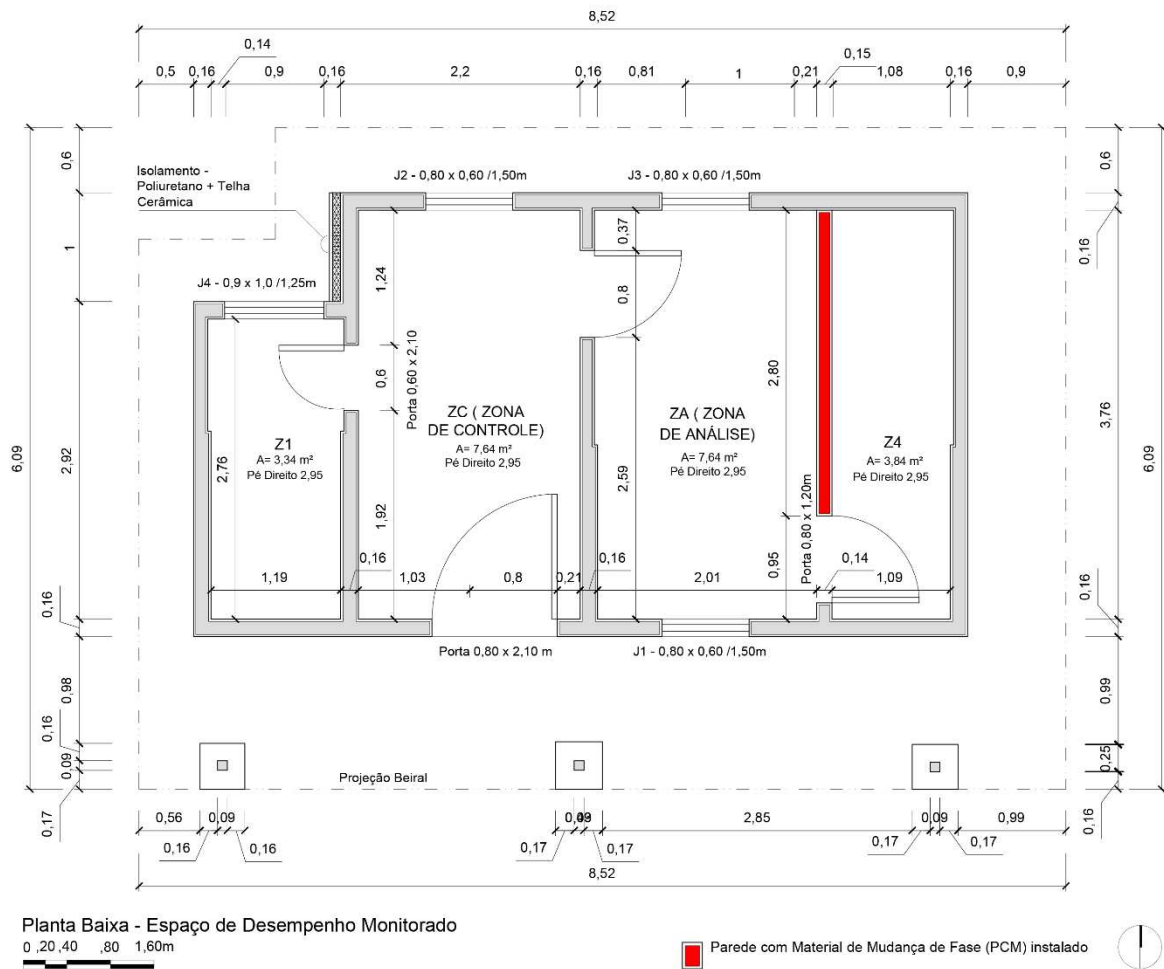
e teóricos. A instalação do PCM na camada mais próxima ao ambiente interno maximiza o desempenho, elevando o PHC médio entre 12% e 15%, enquanto camadas intermediárias ou externas resultam em ganhos menores (<4%). Quanto à espessura, a de 3 cm mostrou-se mais eficiente; o aumento para 6 cm não gerou melhorias significativas (variação <2%) e, em 64% dos casos, reduziu o PHC devido à troca de fase incompleta. Por fim, PCMs orgânicos industrializados, como o RT-HC (*Rubitherm® Technologies GmbH*), requerem integração com ventilação natural seletiva, especialmente a noturna (19h –7h), o que aumentou o PHC em 90% dos casos simulados e garantiu ciclos completos de carga e descarga (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

## 2.4 MATERIAS E PROCESSO METODOLÓGICO

### 2.4.1 Edifício experimental e sistema ensaiado

Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Latecae), em ambiente laboratorial, e no edifício experimental EDEM, vinculado ao projeto Fapemig APQ-02622-23. O Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) corresponde ao antigo escritório da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa (UFV), desativado desde a adoção da coleta automática dos dados climáticos em 2005. A edificação, concebida para ensaios e monitoramento do desempenho termoenergético de componentes construtivos, possui área aproximada de 24 m<sup>2</sup>, composta por quatro ambientes, com destaque para a Zona de Controle (ZC) e a Zona de Análise (ZA) (Figura 1)

Figura 1 - Planta Esquemática EDEM



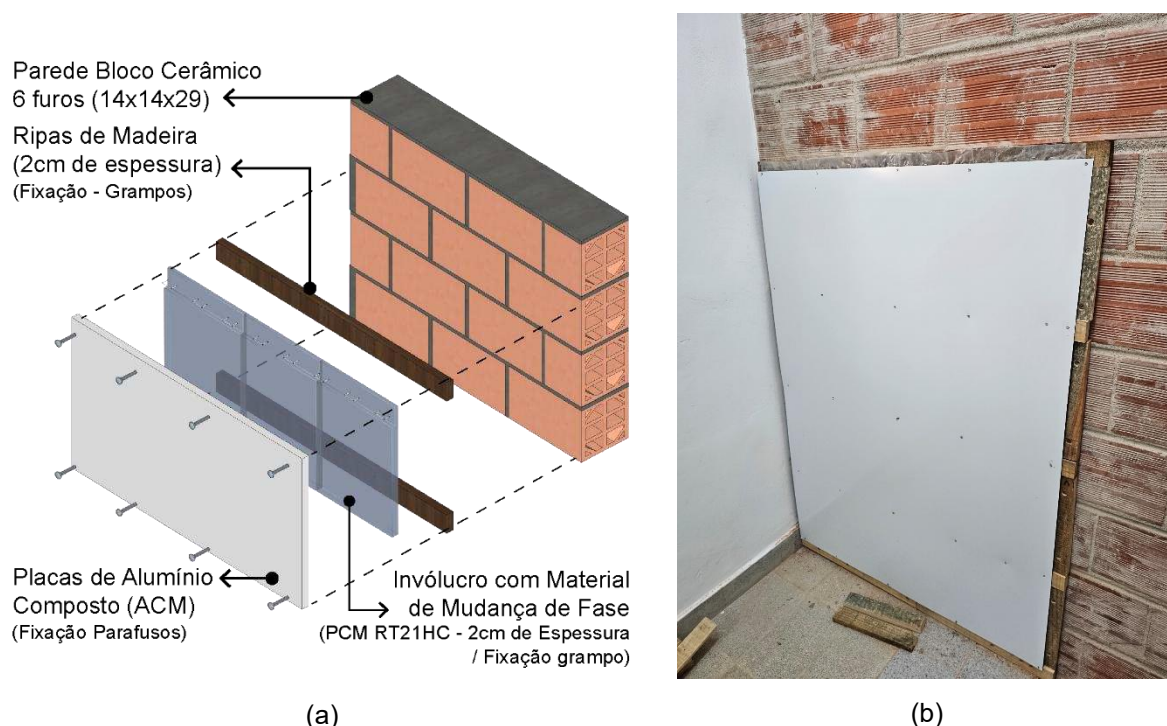
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A construção do edifício é caracterizada pelo uso de blocos cerâmicos maciços na parte externa e blocos de seis furos no interior, lajes de concreto e cobertura de telha cerâmica. Não há elementos de sombreamento ao redor da edificação, que está situada dentro do perímetro da estação meteorológica da UFV (20,75° S e 42,88° O), a aproximadamente 20 metros dos equipamentos de medição e apresenta orientação a 0° norte.

Além disso, com o objetivo de garantir padronização nas condições experimentais, as aberturas dos ambientes foram vedadas para evitar infiltrações, as superfícies de vidro receberam película quase opaca para bloquear o efeito da radiação direta, e a janela com a parede externa adjacente ao banheiro foram isoladas por placas de poliestireno expandido (EPS).

A implementação da solução com PCM foi estruturada em duas etapas principais, seguindo a lógica construtiva de instalação (Figura 2a): (I) produção e instrumentação da célula-teste (Figura 2b) e (II) instalação do sistema completo na parede de referência. Por fim, a lista completa de materiais, ferramentas e parâmetros operacionais foi sistematicamente documentada de modo a assegurar a rastreabilidade e a reprodutibilidade do procedimento, sendo apresentada nos apêndices do trabalho (APÊNDICE A).

Figura 2 - Lógica de Instalação do PCM (a) e célula testes (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

#### 2.4.2 Material de mudança de fase e macroencapsulamento

O PCM utilizado neste estudo corresponde ao modelo RT21HC, material de base orgânica, produzido pela empresa alemã Rubitherm® Technologies GmbH (Rubitherm, 2020), conforme caracterização apresentada pela empresa e adaptada por Oliveira (2023) (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedade dos PCMs

Parâmetro	Valor Típico	Unidade
Faixa de fusão	20–23	°C
Faixa de solidificação	21–19 (pico: 21)	°C
Capacidade de armazenamento de calor	190	kJ/kg
Calor específico	2	kJ/kg·K
Densidade no estado líquido a 25 °C	0,77	kg/l
Condutividade térmica	0,2	W/m·K

Adaptado de Oliveira (2024) e Rubitherm (2020).

Segundo Oliveira (2023), para a Zona Bioclimática 3 (ZB3) (ABNT, 2005), a recomendação mais eficaz para aumentar o Percentual de Horas em Conforto (PHC) é a incorporação do PCM que possui uma Temperatura de Mudança de Fase (TMF) de 21°C ou TMFs próximas (entre 21°C e 28°C). O autor utilizou espessura de 3 cm de PCM, que demonstrou melhor desempenho em 64% dos casos simulados, instalado na camada mais próxima ao ambiente interno da parede, sendo o encapsulamento (micro ou macro) a forma de incorporação mais comum e recomendada para PCMs utilizados como componente em elementos construtivos.

O material foi macroencapsulado em invólucros plásticos flexíveis, com dimensões aproximadas de 25 cm × 35 cm, configurando módulos planos aptos a formar uma camada quase contínua sobre a superfície interna da parede. Previamente, foram realizados testes de estanqueidade, selagem e fixação, utilizando o mesmo volume de água previsto para o PCM afim de evitar desperdícios, com três espessuras diferentes de invólucros, a fim de definir qual seria empregada: Invólucro A, com 60 micras; Invólucro B, com 100 micras; e Invólucros C, com 170 micras.

Inicialmente, o projeto considerava a aplicação de uma espessura de 3 cm para maximizar a capacidade de armazenamento térmico da parede conforme Oliveira (2023). Entretanto, durante o planejamento, verificou-se que a quantidade de PCM disponível era insuficiente para essa espessura, necessitando um ajuste para uma espessura de 2 cm como referência de projeto.

O cálculo seguiu a lógica volumétrica (Equação 1), utilizando a relação entre espessura, área útil e volume total do PCM, expressa como:

Equação (1)

$$V = ((A \times E) \times M) / n$$

onde:

*E* é a espessura da camada de PCM (m);

*V* é o volume total de PCM por invólucro;

*A* é a área útil efetiva da parede onde o PCM é instalado (m<sup>2</sup>);

*M* é a massa específica do PCM (g);

*n* é o número de invólucros.

Os parâmetros de projeto foram definidos com base na área útil descontada de faixas não úteis e vãos e no volume total acessível de PCM, assegurando que todos os módulos fossem distribuídos de maneira homogênea. A densidade do PCM, relevante para cálculos de massa, foi utilizada para confirmação da compatibilidade entre o volume ajustado e o peso efetivamente instalado. Assim, a metodologia garantiu que o sistema fosse dimensionado de

modo reproduzível e replicável, considerando tanto os limites físicos quanto os requisitos de desempenho térmico esperados.

#### 2.4.3 Preparação do ambiente e pré-condicionamento do PCM

As atividades laboratoriais ocorreram no Latecae, em uma etapa de Pré-envase, destinada a garantir condições adequadas de manipulação do PCM e a organização dos equipamentos. O PCM estava armazenado em um tonel de 100 L. O ar-condicionado foi utilizado para garantir as condições ambientais base, cuja temperatura deveria ser superior à temperatura de mudança de fase, visto que o procedimento foi realizado no inverno, quando o PCM estava sólido. Com antecedência mínima de 48 horas, o estado físico do PCM foi verificado e, sempre que necessário, o material foi aquecido com apoio de soprador térmico, para promover a mudança de fase para o estado líquido e facilitar sua extração.

Simultaneamente, a geladeira destinada à solidificação dos invólucros foi esvaziada, descongelada e descontaminada para utilização. A bancada de trabalho foi organizada segundo a sequência experimental, conforme Figura 3, com todos os materiais e ferramentas necessários (Tabela 2) posicionados de forma a reduzir deslocamentos desnecessários e riscos de contaminação.

Figura 3 - Etapas laboratoriais de envase do PCM



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 2 - Materiais utilizados em cada etapa laboratorial

Etapa A - Materiais e ferramentas	
PCM	Tonel 100L
Alicates	2 un.
Mangueira (2m)	2,00 m
Haste metálica (1.5m)	1,50 m
Abraçadeiras Nylon	3 un.
Pisseta	1000ml / 1 un.
Óculos	-
Máscara	-
Luvas	-

Etapa A - Materiais e ferramentas	
Jaleco	-
Bandeja plástica	1 un.
Etapa B - Materiais e ferramentas	
Pisseta plástica graduada	1000ml/ 1un.
Pisseta plástica graduada	500ml / 1 un.
Etapa C - Materiais e ferramentas	
Caneta	-
Régua	-
Invólucros plástico	25x35 cm / 80 un.
Balde plástico	2000 ml
Bandeja Plástica	1 un.
Etapa D - Materiais e ferramentas	
Filtro de linha (extensão de luz)	-
Seladora	220 V
Etapa E - Materiais e ferramentas	
Bandejas plásticas	4 un.
Geladeira	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Todos os procedimentos foram executados em ambiente de laboratório com uso obrigatório de equipamentos de proteção individual. Porém, durante o processo observou-se que óculos de proteção e máscara não foram necessários. O manuseio do PCM em estado líquido, assim como das ferramentas de corte e da seladora elétrica, foi realizado por operadores treinados, observando-se boas práticas de organização, não cruzamento de fluxos e contenção de derramamentos eventuais.

#### 2.4.4 Extração do PCM do recipiente original (Etapa A)

Após verificado o PCM em estado líquido, a extração do tonel metálico foi realizada mediante um sistema de sucção manual dimensionado para minimizar contaminações e perdas de material. Uma quantidade de 20 l foi extraída a cada rodada, necessária para suprir 16 envases. Ela foi transferida para uma bandeja de coleta que era transportada para a bancada a fim de se iniciar os procedimentos B a D.

#### 2.4.5 Medição volumétrica do PCM (Etapa B)

A partir da bandeja de coleta, o PCM líquido era fracionado em volumes de acordo com o dimensionamento, correspondentes a cada invólucro, utilizando-se pissetas plásticas graduadas de 1000 ml e 500 ml (Figura 4a). A combinação desses recipientes graduados permitiu leituras precisas do volume destinado a cada módulo, reduzindo variações entre invólucros e facilitando o controle de qualidade do processo de envase.

#### 2.4.6 Envase dos invólucros plásticos (Etapa C)

O envase foi realizado em dupla, com separação de funções entre o operador que preparava o invólucro e o operador responsável pela transferência do PCM. Em cada invólucro plástico, duas linhas foram traçadas paralelamente à borda superior, a 6 cm e 5 cm, respectivamente, delimitando as faixas destinadas à dobra de fixação e à região de selagem final (Figura 4b).

Figura 4 - Sequência fotográfica do procedimento de medição (a) e envase do PCM (b), destacando a marcação dos invólucros.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O operador responsável pelo invólucro dobrava a borda até a marca de 6 cm, posicionando o invólucro aberto no interior de um balde plástico de 2000 ml apoiado sobre bandeja, o que conferia estabilidade durante o enchimento. Em seguida, o segundo operador despejava o PCM líquido no interior do invólucro por meio de pisseta graduada. Após o preenchimento, o invólucro era cuidadosamente retirado, mantido na posição vertical e encaminhado imediatamente à etapa de selagem.

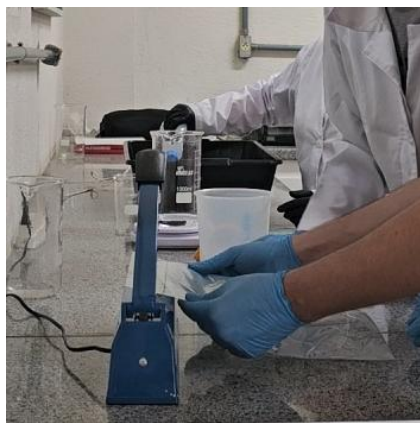
A faixa de 6 cm estabelecida garantiu que o PCM, material viscoso e de elevada capilaridade, não extravasasse para a borda do plástico, o que geraria superaquecimento do material no momento da selagem.

#### 2.4.7 Selagem e verificação de estanqueidade (Etapa D)

A selagem foi conduzida em uma Seladora Manual Térmica ligada, ajustada para nível de selagem igual a 6 (valor previamente determinado em ensaios experimentais anteriores), e realizada em duas etapas sucessivas. Inicialmente, o invólucro era disposto horizontalmente sobre a bancada, com a marca de 6 cm alinhada à área de selagem; nessa etapa, realizava-se uma primeira selagem, deixando-se uma margem lateral de 1 cm para permitir a retirada posterior do ar residual (Figura 5c).

Na sequência, o invólucro era colocado na posição vertical e ligeiramente pressionado, visando expulsar quase todo o ar interno, e depois retornava à seladora com alinhamento na marca de 5 cm, onde se efetuava a selagem final da aba superior. Após o fechamento, cada módulo era inspecionado visualmente quanto à presença de bolhas de ar, falhas de selagem e sinais de vazamento. Os invólucros não conformes eram descartados ou retrabalhados, sem desperdício de material, que era reutilizado em aproximadamente 99%, assegurando a estanqueidade do conjunto produzido (Figura 5d).

Figura 5 - PCM envasado sendo selados (c) e após a selagem passando por uma verificação de estanqueidade (d)



(c)



(d)

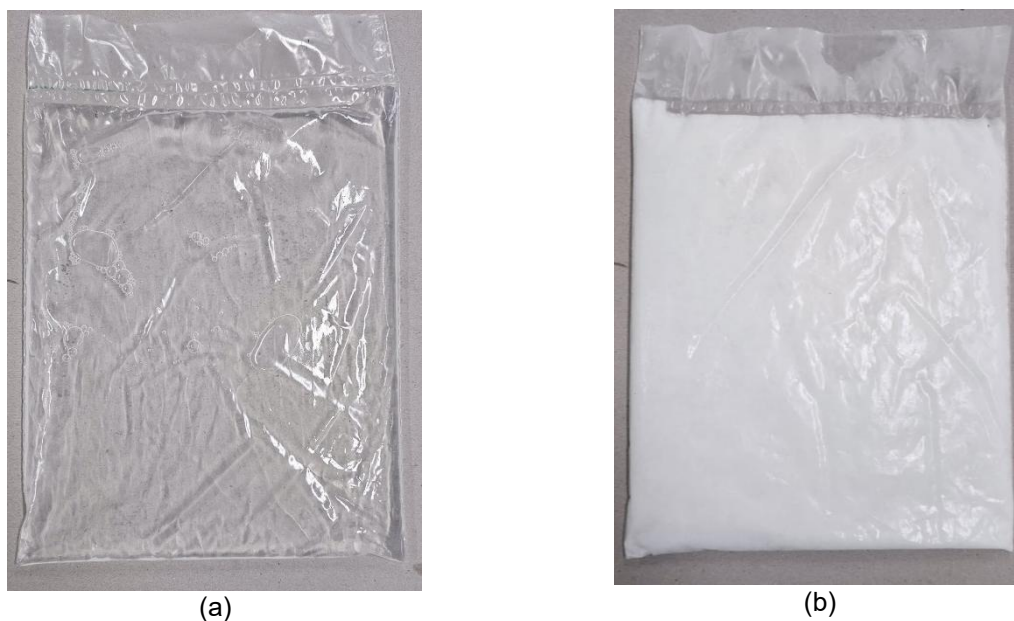
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

#### 2.4.8 Refrigeração, solidificação e armazenamento temporário (Etapa E)

Concluída a selagem, os invólucros eram dispostos na posição horizontal em bandejas plásticas, organizadas em até quatro camadas por bandeja, de modo a evitar deformações mecânicas causadas pelo peso e a garantir eficiência de transferência de calor durante a solidificação (Figura 6e). As bandejas eram então colocadas na geladeira, permanecendo até a completa solidificação do PCM, condição em que eram mantidas até o momento do transporte para o EDEM (Figura 6f).

Durante o armazenamento refrigerado, realizavam-se inspeções visuais para verificar integridade física, ausência de exsudação e manutenção do estado sólido. Após atingida a quantidade necessária de invólucros produzidos, estes eram organizados para transporte, sempre preservando a orientação horizontal.

Figura 6 - Invólucros envasados com PCM - Estado Líquido (a) e Estado Sólido (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

#### 2.4.9 Transporte dos módulos ao edifício experimental

O transporte dos módulos de PCM do laboratório ao EDEM foi realizado em *coolers* térmicos, com o objetivo de garantir que o material permanecesse em estado sólido até a instalação. Os invólucros eram acomodados horizontalmente, evitando-se dobras e compressões excessivas nas regiões seladas, e o trajeto foi planejado para minimizar o tempo de exposição a temperaturas mais elevadas.

Ao chegar ao edifício experimental, os invólucros eram imediatamente transferidos para a área de montagem, seguindo a sequência de instalação definida no projeto executivo, de forma a reduzir o risco de início de fusão durante o manuseio.

A área bruta da parede considerada no projeto é de 11,10 m<sup>2</sup>, a partir da qual foram descontadas faixas não úteis e vãos, resultando em uma área útil efetiva de 6,00 m<sup>2</sup> destinada à instalação do PCM, já desconsiderando a estrutura de suporte. A intervenção concentrou-se em uma parede de alvenaria interna, selecionada para receber módulos macroencapsulados de PCM, formando uma camada de armazenamento térmico aplicada à face interna do fechamento. A modulação dos invólucros e da estrutura de suporte foi definida

a partir de um modelo esquemático tridimensional, o qual orientou a distribuição dos módulos e assegurou a compatibilidade geométrica com o fechamento em placas de alumínio composto (ACM), material cuja composição e espessura foram selecionadas de modo a não interferir significativamente nas trocas térmicas do PCM e a favorecer a homogeneidade dos invólucros.

#### 2.4.10 Estrutura de suporte em madeira

A estrutura de suporte foi construída com filetes de madeira de 2 cm de espessura, dimensionados a partir das dimensões dos invólucros, de forma a acomodar 8 fileiras com 10 módulos cada, sem folgas excessivas, adotando-se pelo menos três pontos de ancoragem por ripa. Durante a instalação, assegurou-se que a superfície de apoio estaria plana e contínua para os invólucros de PCM. Os materiais e ferramentas utilizados estão descritos na Tabela 3.

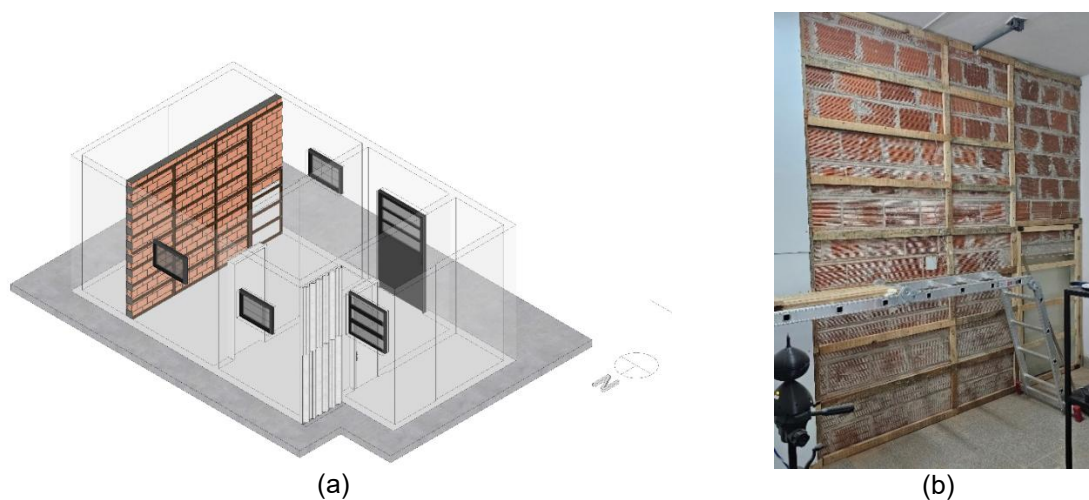
Tabela 3 - Materiais e ferramentas utilizadas na etapa de fixação da estrutura de suporte

Materiais e ferramentas	Observação
Filetes de madeira 2 cm de espessura	Dimensões conforme o projeto (APÊNDICE A)
Parafuso e bucha para fixação dos files na alvenaria (6mm)	-
Furadeira (c/ broca para alvenaria) / Parafusadeira	-
Kit Chaves	-
Nível de mão e trena*	-
Escada	-
Grampeador de Madeira	-
Grampo de Madeira	-
Placas de ACM (Alumínio Composto) –	Dimensões conforme o projeto (APÊNDICE A)
Parafuso para placas de alumínio (3mm)	-
Acrílico (16cm de diâmetro)	-
Placas de Isopor	Dimensões conforme o projeto (APÊNDICE A)
Chapa MDF (0,80 x 1,20) – vedação vão porta.	-
Dobradiça (4 pequenas)	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A porta de acesso ao interior do sistema foi construída em módulo independente, utilizando chapa de MDF de 0,80 m × 1,20 m para vedação do vão correspondente. Após a montagem, o conjunto foi fixado à estrutura com dobradiças e parafusos, empregando os mesmos critérios de alinhamento adotados nas ripas, de modo a permitir inspeções futuras sem a desmontagem completa do painel (Figura 7 a e b).

Figura 7 - Projeto (a) e Execução (b) da estrutura de suporte para os invólucros de PCM

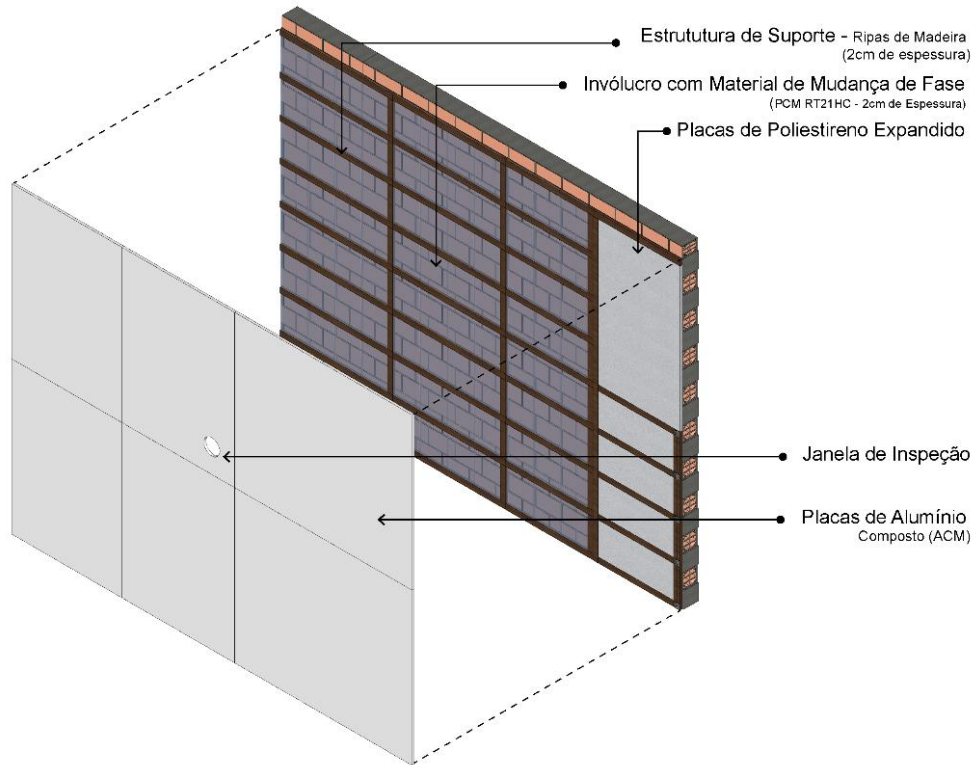


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

#### 2.4.11 Fixação dos invólucros de PCM na estrutura

A instalação dos 80 invólucros de PCM na estrutura de suporte foi realizada por dois operadores, em conformidade com o esquema de montagem definido previamente (Figura 8) e com grampeador de madeira para prender a aba do invólucro diretamente às ripas.

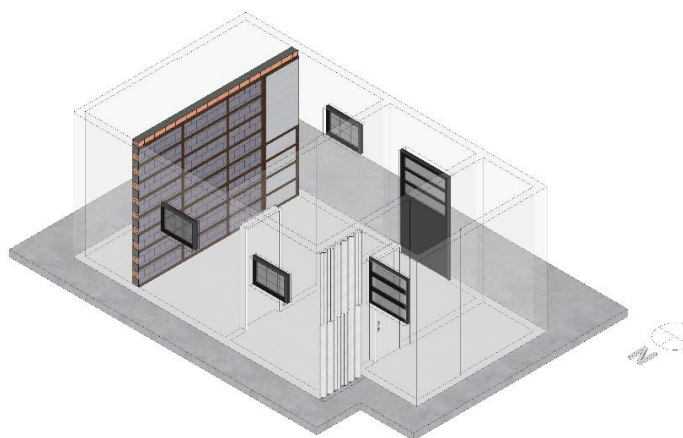
Figura 8 - Esquema 3D da Parede com PCM macroencapsulado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O procedimento foi repetido até o preenchimento de todas as 8 fileiras com 10 invólucros, garantindo cobertura integral da área útil de 6,00 m<sup>2</sup> (Figura 9). Na região lateral adjacente à porta, em que não havia inserção de invólucros, foram posicionadas placas de isopor fixadas por pressão, com a finalidade de complementar o fechamento, reduzir pontes térmicas e conferir estabilidade ao conjunto.

Figura 9 - Projeto (a) e Execução (b) da fixação do PCM macroencapsulados na estrutura de suporte



(a)



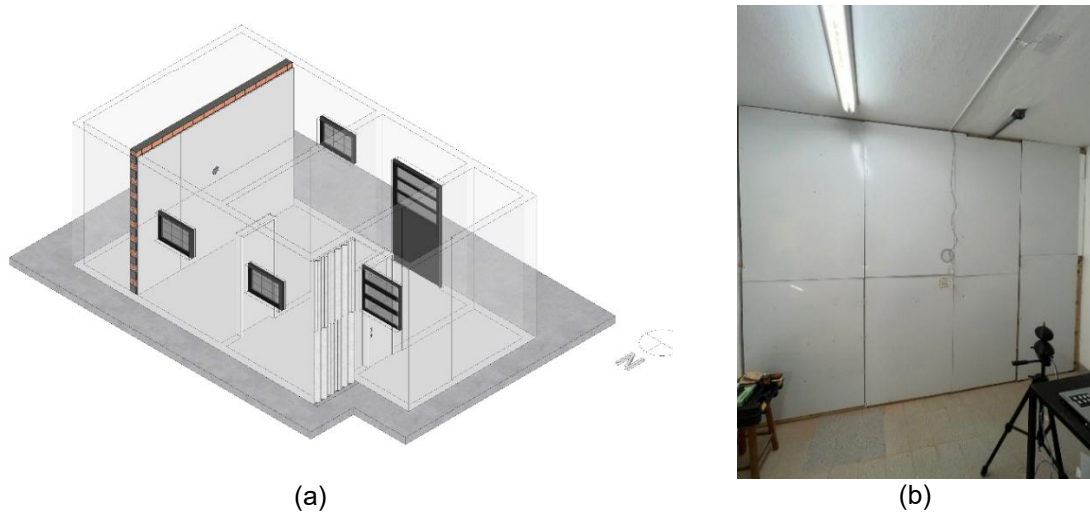
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

#### 2.4.12 Instalação das placas de ACM e acabamento

A etapa final consistiu no fechamento do sistema por meio de placas de alumínio composto, previamente cortadas conforme o projeto executivo de revestimento (Figura 10).

Figura 10 - Projeto (a) e Execução (b) da fixação do PCM macroencapsulados na estrutura de suporte



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As placas de ACM foram instaladas conforme o projeto (APÊNDICE A), cobrindo a área de cada módulo para garantir a planicidade dos PCMs macroencapsulados e a estanqueidade da estrutura. Além disso, foi mantida uma janela de observação em acrílico, com 15 cm de diâmetro, permitindo a verificação visual do estado de transição dos PCMs. Concluída a fixação das placas de ACM, a parede de PCM foi considerada finalizada, apresentando um painel modular mecanicamente estável, com confinamento adequado dos invólucros e apto para o monitoramento termoenergético subsequente no EDEM.

#### 2.4.13 Avaliação Pós-Instalação

Após a conclusão da instalação, foram realizadas visitas semanais ao local de ensaio, com o objetivo de inspecionar visualmente a integridade da estrutura e identificar, de forma precoce, eventuais anomalias ou falhas de desempenho do sistema. Sempre que algum problema ou indício de degradação era detectado, eram adotadas medidas corretivas imediatas, de modo a assegurar a continuidade adequada do experimento e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Sendo assim, foi necessária uma nova análise da estanqueidade dos invólucros utilizados com PCM. Foram envasados novos invólucros, seguindo o mesmo processo dos invólucros já instalados, para serem novamente analisados em laboratório. Eles foram acondicionados

em uma bandeja plástica durante um dia completo, até a conclusão da troca de fase, a fim de verificar se ocorreria transferência de material para a bandeja devido à porosidade do polímero utilizado.

## 2.5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados indicam que a metodologia de macroencapsulamento, transporte e instalação do PCM RT21HC na parede interna do EDEM foi bem-sucedida do ponto de vista construtivo e operacional, garantindo a formação de um painel contínuo, mecanicamente estável e apto ao monitoramento experimental, ainda que com ajustes.

### 2.5.1 Adequação do dimensionamento e configuração final do sistema

O dimensionamento da camada de PCM foi realizado a partir da área útil da parede interna ensaiada, de 6,00 m<sup>2</sup> com 8 fileiras com 10 invólucros de PCMs cada, adotando-se espessura de referência de 2 cm para o material RT21HC, conforme indicado na tabela de memorial de cálculo (Tabela 4).

Tabela 4 - Memorial do Dimensionamento do Volume de PCM utilizado

MEMORIAL DE CÁLCULO COM ESPESSURA IDEAL		
DESCRIÇÃO	CÁLCULO	RESULTADO
Área da parede	-	6,00 m <sup>2</sup>
Espessura do PCM	-	3 cm = 0,03 m
Volume de PCM necessário	V= Área × Espessura	V = 6,00×0,03 V= 0,18 m <sup>3</sup>
Conversão para litros	1m <sup>3</sup> = 1000 L	0,18 m <sup>3</sup> = 180 L
Densidade do PCM	-	0,77 kg/L
Massa de PCM necessária	M=Volume × Densidade	M=180×0,77 M = 138,60 kg
Massa por invólucro	M / 80	≈ 1,700 g ou 1700ml
MEMORIAL DE CÁLCULO COM ESPESSURA ADOTADA		
DESCRIÇÃO	CÁLCULO	RESULTADO
Área da parede	-	6,00 m <sup>2</sup>
Espessura do PCM	-	2 cm = 0,02 m
Volume de PCM necessário	V= Área × Espessura	V = 6,00×0,02 V= 0,12 m <sup>3</sup>
Conversão para litros	1m <sup>3</sup> = 1000 L	0,12m <sup>3</sup> = 120 L
Densidade do PCM	-	0,77 kg/L
Massa de PCM necessária	M = Volume × Densidade	M=120×0,77 M = 92,40 kg
Massa por invólucro	M / 80	≈ 1,200 g ou 1200ml
Percentual em relação ao ideal	-	≈ 70%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para essa condição ideal, o volume total de PCM necessário é de 0,12 m<sup>3</sup> (120 L), o que, considerando densidade média de 0,77 kg/L, resulta em massa aproximada de 92,4 kg distribuída em 80 invólucros, com massa teórica de cerca de 1,70 kg (≈ 1700 ml) por invólucro.

No cenário efetivamente implantado, a limitação de material disponível conduziu à adoção de massa unitária próxima de 1,20 kg (≈ 1200 ml) de PCM por invólucro, mantendo-se o número de 80 módulos e a mesma área útil de 6,00 m<sup>2</sup>. Nessa configuração real, o volume total de PCM instalado foi de aproximadamente 0,09 m<sup>3</sup> (90 L), o que corresponde a um percentual em torno de 70% em relação ao caso ideal de projeto.

Essa redução volumétrica implica espessura efetiva de PCM inferior ao valor de referência, preservando, contudo, a homogeneidade da distribuição dos invólucros e a lógica modular de oito fileiras com dez unidades cada. Do ponto de vista experimental, a solução obtida supre parte das restrições de disponibilidade de material e a necessidade de manter um sistema reprodutível, permitindo avaliar o impacto de um painel com aproximadamente 70% da capacidade térmica idealizada sobre o desempenho termoenergético do EDEM.

Em relação aos ensaios com os invólucros, o B (100 micras) foi selecionado, por ter sido o único a atender simultaneamente aos critérios de estanqueidade, selagem e fixação. O Invólucros A (60 micras) apresentou vazamentos, selagem inadequada, com fusão excessiva do polímero, inviabilizando a sua fixação. Já o Invólucro C (170 micras) não apresentou vazamentos, porém a selagem não pôde ser concluída de forma satisfatória, o que também impossibilitou sua fixação.

### 2.5.2 Desempenho construtivo e operacional da macroencapsulação

Do ponto de vista construtivo, a sequência de extração, medição volumétrica, envase, selagem e refrigeração dos invólucros com PCM macroencapsulado garantiu o controle adequado do volume por módulo e a estanqueidade global do conjunto, com descarte ou retrabalho de unidades não conformes.

A adoção de pissetas graduadas de 1000 ml e 500 ml para fracionamento do PCM permitiu padronizar o volume de 1,200 L por invólucro, reduzindo a variabilidade entre módulos e assegurando distribuição uniforme de massa ao longo da superfície da parede. Ensaios prévios de calibração do equipamento de selagem possibilitaram definir um parâmetro de operação (nível 6 na seladora manual) que resultou em selagem seguras, com baixa incidência de falhas ou vazamentos visíveis durante a inspeção visual e o período de armazenamento sob refrigeração.

A etapa de refrigeração assegurou a solidificação completa do PCM antes do transporte e da

instalação, com organização dos invólucros em bandejas horizontais e limitação do número de camadas, mitigando deformações mecânicas e tensões nas zonas de selagem. O transporte em *coolers* térmicos até o EDEM manteve o material em estado sólido, reduzindo o risco de início de fusão durante o manuseio e contribuindo para que a instalação fosse executada com o PCM em condição estável, imprescindível para manter a espessura de projeto e o bom contato com a estrutura de suporte.

### 2.5.3 Qualidade geométrica e estabilidade do painel de PCM

A estrutura de suporte em madeira, dimensionada a partir das dimensões dos invólucros (aproximadamente 25 cm × 35 cm), garantiu o alojamento de oito fileiras de módulos, com alinhamento vertical e horizontal controlado por meio de verificações sistemáticas de prumo, esquadro e nivelamento durante a montagem. A utilização de ripas com espessura de 2 cm, ancoradas à alvenaria com buchas específicas para blocos cerâmicos e parafusos distribuídos em pelo menos três pontos de fixação por peça, resultou em um plano de apoio rígido e contínuo, adequado para receber o conjunto de invólucros grampeados pela aba superior.

A fixação em dupla operação – um operador posicionando o invólucro e outro realizando o grampeamento – permitiu manter o alinhamento da aba de 5 cm, previamente demarcada, e minimizar danos mecânicos sobre a região selada. Na porção lateral em que não houve inserção de PCM, a adoção de placas de poliestireno expandido (isopor) contribuiu para o fechamento do plano, reduzindo descontinuidades geométricas e potenciais pontes térmicas, além de favorecer a estabilidade global do painel. Com a instalação subsequente das placas de alumínio composto (ACM), o sistema passou a apresentar um acabamento final homogêneo, com confinamento adequado dos módulos, interface protegida com o ambiente interno e condições favoráveis ao monitoramento termoenergético subsequente.

### 2.5.4 Comportamento pós-instalação e integridade dos invólucros

A avaliação pós-instalação, realizada por meio de inspeções semanais no EDEM, revelou a ocorrência localizada de umidade na região inferior do painel, associada à gramatura do invólucro utilizado. Essa umidade se manifestou na interface próxima ao piso, sem evidências de ruptura, perfuração ou perda de material para o meio externo, caracterizado pela porosidade do invólucro e não um vazamento direto do PCM (Figura 11). Importante destacar que esse comportamento não havia sido observado na etapa de ensaios em célula-teste em escala reduzida, indicando que o aumento da área de aplicação e o tempo de exposição em condições reais de operação intensificaram efeitos higrotérmicos que não se manifestaram em ensaios preliminares mais curtos ou com menor área ativa, realizados em laboratório.

Figura 11 - Identificação da umidade na parede de PCM Macroencapsulados



(a)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os testes laboratoriais comparativos com os três tipos de invólucros, com gramaturas diferentes, preenchidos com PCM demonstraram que apenas o material de maior gramatura (Invólucro C - 170 micras) foi capaz de impedir totalmente a transferência de umidade ou traços de PCM para o meio externo, enquanto o filme com gramatura inferior (Invólucro A - 60 micras) intensificou a permeabilidade, e o Invólucro escolhido (Invólucro B- 100 micras) situou-se em condição intermediária (Figura 12).

Figura 12 - Avaliação dos invólucros plásticos



(I)



(II)



(III)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Porém, dada a natureza exploratória do estudo e o fato de o sistema já estar completamente instalado, optou-se pela manutenção do experimento com o material originalmente empregado, acompanhada de monitoramento contínuo e registro sistemático de eventuais alterações, de modo a não comprometer a série de dados experimentais programada e, simultaneamente, produzir evidências para especificações futuras de invólucros com maior

barreira à passagem de umidade.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa alcançou o objetivo de desenvolver e aplicar uma metodologia de macroencapsulamento, dimensionamento e instalação do PCM RT21HC em parede de edificação experimental de desempenho monitorado, demonstrando a viabilidade técnica do sistema em escala real. A implementação do painel em alvenaria interna do EDEM resultou em um arranjo construtivo estável, com distribuição homogênea do material de mudança de fase sobre 6,00 m<sup>2</sup> de área útil, e em um dimensionamento ajustado para aproximadamente 70% da massa inicialmente indicada na literatura, preservando a continuidade da camada ativa. Adicionalmente, as ações de acompanhamento pós-instalação permitiram identificar e mitigar efeitos colaterais, como a umidade na base da parede e abaulamento pontual das placas de ACM, este último corrigido por meio do reforço da fixação mecânica.

Do ponto de vista científico e tecnológico, o estudo contribuiu ao detalhar um protocolo de produção seriada, transporte e montagem de PCM macroencapsulado em contexto de campo, articulando procedimentos laboratoriais. A descrição sistemática das etapas, dos ajustes de dimensionamento e das ocorrências em uso fornece subsídios para projetos futuros em climas semelhantes e em tipologias de fechamento comparáveis, ao mesmo tempo em que reforça a importância de integrar decisões de projeto, execução e monitoramento quando se busca avaliar o desempenho termoenergético de PCMs em condições reais.

Assim, a instalação do sistema no EDEM cria uma base experimental apta a monitoramentos subsequentes e à calibração de modelos numéricos, permitindo a configuração do painel em estudos de simulação termoenergética. Além disso, o protocolo detalhado de dimensionamento, produção e montagem torna o procedimento passível de replicação em outros edifícios experimentais ou em aplicações em escala real, favorecendo a comparação sistemática entre diferentes contextos construtivos e climáticos.

## 2.7 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Com financiamento do projeto APQ-02622-23 – Criação do ERDEM, ambiente para ensaios e monitoramento do desempenho termoenergético do edifício e seus componentes, financiado pela Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Também contou com apoio do projeto 406426/2022-8 – Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e do Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).

## 2.8 REFERÊNCIAS

AL-ABSI, Z. A.; MOHD HAFIZAL, M. I.; ISMAIL, M.; MARDIANA, A.; GHAZALI, A. Peak indoor air temperature reduction for buildings in hot-humid climate using phase change materials. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 22, e100762, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100762.

ALVAREZ-RODRIGUEZ, M.; ALONSO-MARTINEZ, M.; DEL COZ DIAZ, J. J.; ESPINA, A.; GARCIA-GRANDA, S. Macroencapsulated phase change material assessment for envelope applications: effect of low temperature variation rates and actual size. **Journal of Building Engineering**, v. 112, e113865, p. 1-20, 2025. DOI: 10.1016/j.job.2025.113865.

AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M. Effect of encapsulation area on the thermal performance of PCM incorporated concrete bricks: A case study under Iraq summer conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, e00686, p. 1-10, 2021. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00686.

ARICI, M.; BILGIN, F.; NIŽETIĆ, S.; KARABAY, H. PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, e114560, p. 1-13, 2020. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114560.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro por desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AIT LAASRI, I.; ES-SAKALI, N.; CHARAI, M.; MGHAZLI, M. O.; OUTZOURHIT, A. Recent progress, limitations, and future directions of macro-encapsulated phase change materials for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 199, e114481, p. 1-19, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114481.

BAI, L.; XIE, J.; FARID, M. M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, p. 1–10, 2020. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106531.

BAGAZI, M. S.; MELAIBARI, A. A.; KHOSHAIM, A. B.; ABU-HAMDEH, N. H.; ALSAIARI, A. O.; ABULKHAIR, H. Using phase change materials (PCMs) in a hot and humid climate to reduce heat gain and energy consumption. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 19, e10965, p. 1-17, 2021. DOI:10.3390/su131910965.

BERARDI, U.; SOUDIAN, S. Assessing the effect of night ventilation on PCM performance in high-rise residential buildings. **Journal of Building Physics**, v. 43, p. 229–249, 2019. DOI: 10.1177/1744259119856957.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M.; SALLES, E. M; CASTRO, G. M. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, jan.-mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>.

CUNHA, S. R. L. da; AGUIAR, J. L. B. de. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. **Journal of Energy Storage**, v. 27, e101083, p. 1-13, 2020. DOI: 10.1016/j.est.2019.101083.

FARAJ, K.; KHALED, M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, e109579, p. 1-18 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109579.

KURDI, A.; ALMOATHAM, N.; MIRZA, M.; BALLWEG, T.; ALKAHLAN, B. Potential phase change materials in building wall construction – a review. **Materials**, Basel, v. 14, n. 18, e5328, p. 1-35, 2021. DOI: 10.3390/ma14185328.

LIU, L.; HAMMAMI, N.; BIGOT, D.; MALET-DAMOUR, B.; HABAS, J.-P. Multi-scale study of a phase change material on a tropical island for evaluating its impact on human comfort in the

building sector. **Materials**, Basel, v. 17, n. 13, e3241, p. 1-26, 2024. DOI: 10.3390/ma17133241.

MARIN, P.; SAFFARI M.; GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M. M.; CABEZA, L.; USHAK, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 274–283, Oct. 2016. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.08.007.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; CARLO, J. C. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 67–111, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000300610.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; CARLO, J. C. Influência do uso de PCMs em escritório nos climas brasileiros. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 15, e024006, p. 1-21, 2024. DOI: 10.20396/parc.v15i00.8673208.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; SILVA, M. A.; MARQUES, R. F. S.; MAGALHÃES, T. S.; PEREIRA, J. P. M.; CARLO, J. C. et al. A influência do clima no conforto térmico em escritórios com PCMs no Brasil. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 16, e024006, p. 1-17, 2025. DOI: 10.20396/parc.v16i00.8676127.

OSIBODU, S. J.; ADEYINKA, A. M.; MBELU, O. V. Phase change material integration in concrete for thermal energy storage: Techniques and applications in sustainable building. **Sustainable Energy Research**, v. 11, n. 45, p. 1-17 2024. DOI: 10.1186/s40807-024-00138-8.

PEREIRA, J.; SOUZA, J. P.; SILVA, R.; ALMEIDA, T. Phase change materials in residential buildings: challenges, opportunities, and performance. **Materials**, Basel, v. 18, n. 9, e2063, p. 1-79, 2025. DOI: 10.3390/ma18092063.

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 2, p. 127–139, jun. 2017. DOI: 10.20396/parc.v8i2.8650228.

RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1300–1313, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.130.

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH. **RT21HC – Ficha técnica**. Berlin, 2020. Disponível em: <[https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_RT21HC\\_EN\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT21HC_EN_09102020.PDF)>. Acesso em: janeiro de 2026.

REDDY, V. J.; GHAZALI, M. F.; KUMARASAMY, S. Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. **Journal of Energy Storage**, v. 81, p. 110494, 2024. DOI: 10.1016/j.est.2024.110494.

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, Sept. 2017a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.107>.

SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, v. 189, p. 357–371, 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2019.07.067.

SURESH, C.; HOTTA, T. K.; SAHA, S. K. Phase change material incorporation techniques in building envelopes for enhancing the building thermal comfort: A review. **Energy and Buildings**, v. 268, p.112225, 2022. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112225.

WAHID, M.; HOSSEINI, S.; HUSSEN, H.; AKEIBER, H.; SAUD, S.; MOHAMMAD, A. An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 1240–1259, 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032.

### 3. CAPÍTULO 3: DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE EM UM ESPAÇO DE DESEMPENHO MONITORADO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULADA

#### Resumo

Este trabalho avaliou o desempenho de Materiais de Mudança de Fase (PCM) sobre o conforto térmico dos usuários de uma edificação localizada em Viçosa-MG, Brasil, frente à limitada quantidade de estudos experimentais realizados no país em condições reais de clima quente. O objetivo foi avaliar a efetividade do PCM (RT21HC) na melhoria das condições de conforto térmico. A metodologia combinou monitoramento experimental (julho a dezembro de 2025) em duas zonas térmicas (Zona de Análise, com PCM, e Zona de Controle, sem o material) em um edifício real da UFV, com simulações computacionais no EnergyPlus. A validação do modelo demonstrou alta confiabilidade, apresentando baixo erro, com CV(RMSE) para temperaturas internas de 4,81% e 5,45%, valores bem abaixo do limite de 30% recomendado pela *ASHRAE Guideline 14*. Os resultados indicaram que a zona com PCM manteve amplitudes térmicas internas reduzidas: o deslocamento de fase ( $\phi$ ) atingiu entre 4 e 5 horas com PCM, contra 2 a 3 horas no controle, e o coeficiente de amortecimento ( $\mu$ ) manteve-se predominantemente entre 0,3 e 0,6, enquanto na zona de controle oscilou entre 0,1 e 0,4. O Percentual de Horas em Conforto foi superior sem o PCM (63,74%) em comparação ao cenário com o material (40,76%). A diferença é explicada pelo aumento significativo do desconforto por frio na Zona de Análise (59,33%) em relação à Zona de Controle (36,26%). Essa análise indicou que, sob as condições passivas e parâmetros de aplicação testados (ambiente vedado), a implantação isolada do material não foi suficiente para garantir melhorias no conforto térmico anual, devido à retenção de baixas temperaturas que intensificou o desconforto por frio nos meses de inverno.

#### Abstract

This study evaluated the performance of Phase Change Materials (PCM) on the thermal comfort of users of a building located in Viçosa-MG, Brazil, given the limited number of experimental studies conducted in the country under real hot climate conditions. The objective was to evaluate the effectiveness of PCM (RT21HC) in improving thermal comfort conditions. The methodology combined experimental monitoring (July to December 2025) in two thermal zones (Analysis Zone, with PCM, and Control Zone, without the material) in a real building at UFV, with computer simulations in EnergyPlus. The model validation demonstrated high reliability, presenting low error, with CV(RMSE) for internal temperatures of 4.81% and 5.45%, values well below the 30% limit recommended by ASHRAE Guideline 14. The results indicated that the zone with PCM maintained reduced internal thermal amplitudes: the phase shift ( $\phi$ ) reached between 4 and 5 hours with PCM, compared to 2 to 3 hours in the control, and the damping coefficient ( $\mu$ ) remained predominantly between 0.3 and 0.6, while in the control zone it fluctuated between 0.1 and 0.4. The Percentage of Hours in Comfort was higher without PCM (63.74%) compared to the scenario with the material (40.76%). The difference is explained by the significant increase in cold discomfort in the Analysis Zone (59.33%) compared to the Control Zone (36.26%). This analysis indicated that, under the passive conditions and application parameters tested (sealed environment), the isolated implementation of the material was not sufficient to guarantee improvements in annual thermal comfort, due to the retention of low temperatures that intensified cold discomfort in the winter months.

**Palavras-Chaves:** Material de mudança de fase (PCM); Conforto térmico; Monitoramento experimental; Simulação Térmica; Energyplus.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) são uma tecnologia passiva eficaz para o gerenciamento térmico em edificações, atuando por meio do armazenamento e da liberação de energia na forma de calor latente (Shree et al., 2025). Ao alternar entre as fases sólida e líquida, esses materiais elevam a capacidade de armazenamento térmico da envoltória, mitigando as flutuações de temperatura interna e reduzindo a demanda energética (Jia et al., 2021). No contexto climático de Viçosa-MG, classificada na Zona Bioclimática 2M (ABNT, 2024), em que ocorrem variações nas amplitudes de temperatura, a incorporação de PCMs apresenta-se como uma estratégia potencial para estabilizar a temperatura do ambiente interno e otimizar o conforto térmico dos usuários frente às condições locais.

A avaliação do desempenho dessas tecnologias em projetos de engenharia e arquitetura frequentemente recorre à modelagem computacional. O *software EnergyPlus*, amplamente utilizado para esse fim, emprega o algoritmo de Diferenças Finitas de Condução (CondFD) para simular o comportamento dinâmico dos PCMs (*EnergyPlus*, 2022). No entanto, a precisão dessas simulações está condicionada a uma parametrização rigorosa das propriedades termofísicas e das condições de contorno, de modo a representar adequadamente os fenômenos de histerese e transição de fase (Tabares-Velasco; Christensen; Bianchi, 2012). Nesse cenário, a validação dos modelos numéricos por meio da confrontação com dados experimentais reais torna-se um requisito indispensável para assegurar a confiabilidade dos resultados, devendo seguir diretrizes estatísticas consolidadas, como a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), por meio da *Guideline 14* (ASHRAE, 2023), utilizada por Souza (2024)

O desempenho do material é caracterizado por sua capacidade de promover o amortecimento da amplitude térmica e o atraso térmico (Lajimi et al., 2025). Esses fenômenos indicam a habilidade do sistema em atenuar os picos de temperatura externa e retardar a transmissão de calor para o ambiente interno, resultando em uma temperatura operativa mais estável e dentro dos limites de conforto estabelecidos. Já a eficácia de sua aplicação é verificada não apenas pelas variáveis físicas, mas, fundamentalmente, pelas condições de conforto térmico proporcionadas aos ocupantes, conforme os modelos normativos da ASHRAE *Standard 55* (ASHRAE, 2023).

O desempenho térmico da incorporação de PCMs como sistemas passivos em edificações já foi comprovado em regiões de latitudes médias e clima temperado (Wang et al., 2022). No Brasil, onde predominam climas quentes e úmidos, há escassez de pesquisas sobre o desempenho dos PCMs. Oliveira et al. (2025) avaliaram o aumento anual das horas de

conforto térmico em um escritório-tipo para 95 cidades, obtendo os melhores resultados nas antigas zonas bioclimáticas mais frias (ZBs 1 e 4) (ABNT, 2005). No entanto, devido ao recorte no horário de uso (das 8h às 18h), as variações do conforto térmico decorrentes do uso de PCMs não foram avaliadas nos períodos mais frios da noite, especialmente no inverno nas ZBs 1, 2 e 3 (Oliveira et al., 2025).

Outro fator limitante é a falta de pesquisas que investiguem medições e monitoramento de PCMs em edificações reais no Brasil. Os artigos existentes baseiam-se em simulações calibradas por outros autores ou na robustez de programas de simulação termoenergética consolidados, como o EnergyPlus (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024). Com a criação do Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) na Universidade Federal de Viçosa (UFV), a investigação do desempenho termoenergético com o PCM instalado viabilizou a calibração de simulações no contexto climático de Viçosa-MG. Isso aumentou a confiabilidade dos resultados simulados, além de evidenciar o desempenho real do PCM instalado em uma edificação no Brasil.

### 3.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de Material de Mudança de Fase (PCM) em ambiente monitorado no contexto climático de Viçosa-MG, por meio da comparação do comportamento térmico do ambiente com e sem sua incorporação, bem como da análise da confiabilidade das simulações realizadas e da efetividade do material na melhoria das condições de conforto térmico.

### 3.3 REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura descreve como os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) atuam no armazenamento térmico latente de maneira que, quando incorporados corretamente em edifícios, apresentam a capacidade de reduzir substancialmente as demandas de condicionamento térmico artificial (Zhan *et al.*, 2023). Para atingir essas reduções, eles acumulam energia térmica através da transição de fase sólido-líquido durante as horas mais quentes do dia, liberando posteriormente essa energia armazenada através da transição de fase oposta durante os períodos de temperaturas mais baixas (Cui et al., 2017; Baylis; Cruickshank, 2023; Masood et al., 2023).

Uma das vantagens da utilização de PCMs como meio de armazenamento térmico em edifícios, em comparação com materiais de armazenamento sensíveis convencionais, reside na capacidade dos PCMs de armazenar uma quantidade significativamente maior de energia por unidade de massa. Por exemplo, é possível armazenar a mesma quantidade de energia térmica em um material composto por uma parede de tijolos de 12 cm e uma placa de gesso

de 1,5 cm de espessura, sendo que esta última é composta por 45% de PCM e 55% de material de gesso convencional (Baylis; Cruickshank, 2023).

Por isso, técnicas de conservação de energia e gerenciamento térmico usando Materiais de Mudança de Fase (PCMs) tornaram-se populares nos últimos anos como estratégias de longo prazo para economizar energia em edificações. Uma vez que os pontos de fusão são compatíveis, eles liberam imediatamente o calor latente já absorvido pelos PCMs, permitindo melhor conforto térmico e economia de energia (Zhan et. al, 2023).

Segundo Cui et al. (2017), os materiais de mudança de fase (PCM) têm um papel fundamental na melhoria do conforto térmico na construção civil por três razões principais: reduzem o superaquecimento dos componentes construtivos, diminuem a temperatura superficial destas, melhorando a transferência de calor radiante, e reforçam a convecção natural do ar, evitando estratificações térmicas desconfortáveis no ambiente interno. Os autores ainda ressaltam que, para alcançar os melhores efeitos da economia de energia, alguns fatores importantes devem ser considerados no processo de aplicação do PCM na construção, como a estrutura do edifício, o meio ambiente, finalidade do uso e principalmente o clima (Cui et al. 2017).

A literatura sobre o uso de PCM nos climas quentes e úmidos, que são a maior parte dos climas brasileiros, é limitada em comparação às pesquisas internacionais. Autores como Brito et al. (2017), Pons e Stanescu (2017) e Oliveira (2024) obtiveram resultados de desempenho térmico satisfatórios para Zonas Bioclimáticas (ZBs) mais frias, especialmente para as zonas ZB1 a ZB5 do zoneamento anterior ao vigente (ABNT, 2005). No entanto, a pesquisa de Oliveira (2024) também apresentou bom potencial para aumento das horas em conforto térmico dos usuários em algumas cidades em ZBs com climas mais quentes. O autor conduziu investigações adicionais em relação à metodologia e às características da instalação de materiais de mudança de fase (PCM) em edifícios, onde foram identificadas as variáveis ambientais mais impactantes, como as espessuras e estratificações das camadas de PCM, orientação solar da construção e distintas condições de ventilação. Por meio dessas simulações, foi viável a avaliação e a identificação das configurações que tiveram os mais destacados resultados em termos de desempenho térmico (Oliveira, 2024).

As pesquisas brasileiras, citadas anteriormente, utilizaram médias anuais para avaliar o conforto térmico (Pons; Stanescu, 2017; Oliveira, 2024). No entanto, devido à natureza binária da métrica de conforto térmico adaptativo (conforto ou desconforto), a análise das médias anuais tende a mascarar a influência de condições sazonais específicas, como variações nas temperaturas do ar ao longo das diferentes estações do ano. Para uma compreensão mais

completa, é necessário analisar a influência mensal da incorporação de PCMs, inclusive em climas quentes.

Além dessas restrições, Cui et al. (2017) destacaram a ausência de estudos experimentais ou numéricos, que verifiquem a avaliação da PCM em condições reais, reforçando a necessidade de provar a autenticidade e confiabilidade das pesquisas atuais. Com base na revisão bibliográfica desenvolvida nesta dissertação, constatou-se a inexistência, ou ainda a ocorrência bastante incipiente, de pesquisas que associem a aplicação de materiais de mudança de fase em edifícios reais no contexto brasileiro à avaliação sistemática de seu desempenho térmico e das condições de conforto ambiental. Tal lacuna evidencia e reforça a relevância e a originalidade da presente investigação, tanto no cenário nacional quanto no internacional.

### 3.3.1 PROCESSO METODOLÓGICO

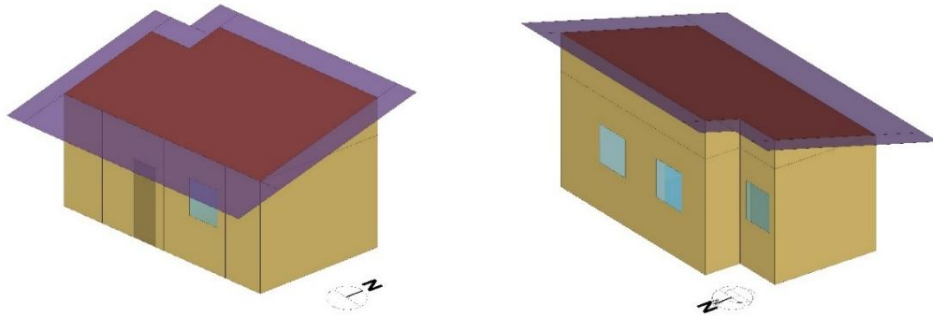
#### 3.3.2 Caracterização e levantamento da edificação

O Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) é o antigo escritório da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa (UFV), desativado desde a automatização da coleta dos dados climáticos (Fig.13 e Fig. 14) em 2005. A edificação possui cerca de 24 m<sup>2</sup>, é composta por 4 ambientes, sendo os principais a Zona de Controle (ZC) e a Zona de Análise (ZA), assim denominados como zonas térmicas. O PCM foi instalado neste último ambiente.

O EDEM foi construído com blocos cerâmicos maciços externamente e blocos de 6 furos internamente, lajes de concreto e cobertura em telha cerâmica; não possui sombreamentos no entorno, estando dentro da estação meteorológica da UFV (20,75° S e 42,88° O) e a 20 m dos equipamentos. A fachada com esquadrias expostas tem orientação norte de 0°.

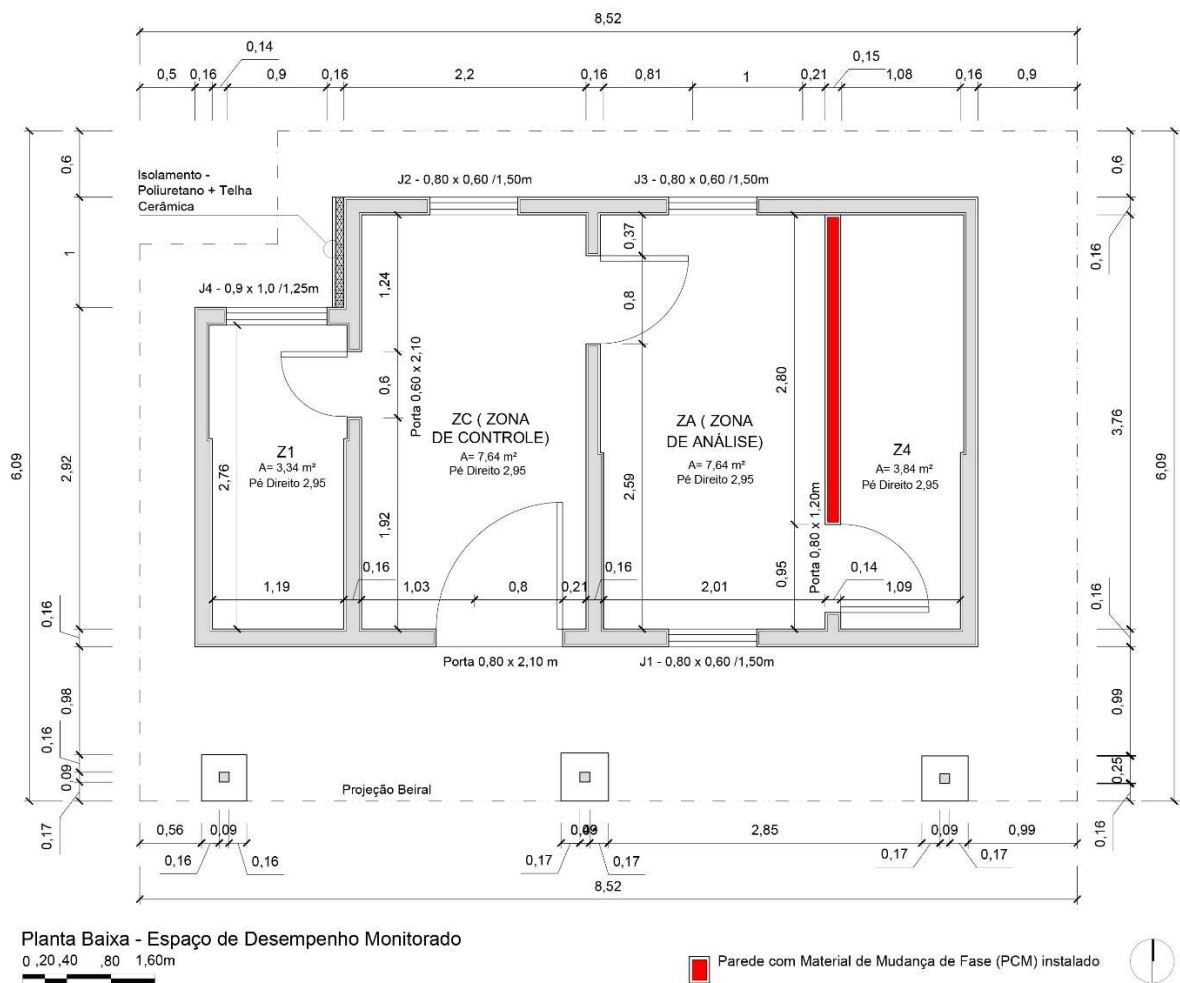
Para garantir a padronização das condições experimentais, as aberturas dos ambientes foram vedadas para evitar infiltrações, os vidros foram recobertos por uma película quase opaca com o intuito de bloquear a influência da radiação, e a janela e parede externa adjacente ao banheiro foram isoladas com placas de poliestireno expandido (EPS - *Expande Polystyrene*).

Figura 13 - Modelo 3D EDEM



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 14- Planta Esquemática EDEM



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

### 3.3.3 Monitoramento do EDEM

O monitoramento interno dos parâmetros climáticos e térmicos, como temperatura superficial das paredes, velocidade do vento, temperatura de bulbo seco (TBS), e temperatura de globo, foi realizado durante 5 meses (20 de julho a 20 de dezembro). Os parâmetros climáticos externos foram coletados diretamente da estação climática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os procedimentos anteriores foram idênticos na Zona de Controle (ZC) sem paredes com PCM e na Zona de Análise (ZA), exceto pela parede com PCM (Figura 2). O PCM adquirido foi fabricado pela empresa alemã *Rubitherm® Technologies GmbH* (Rubitherm, 2020), modelo RT21HC avaliado por Oliveira (2024, 2025) (Tabela 5). A instalação foi realizada de acordo com as recomendações do mesmo autor, que indicou que os PCMs podem aumentar o conforto térmico em até 25% em edificações da ZB3 (ABNT, 2005), atualmente Z2M (ABNT, 2024) mesmas Zonas Bioclimáticas de Viçosa – MG.

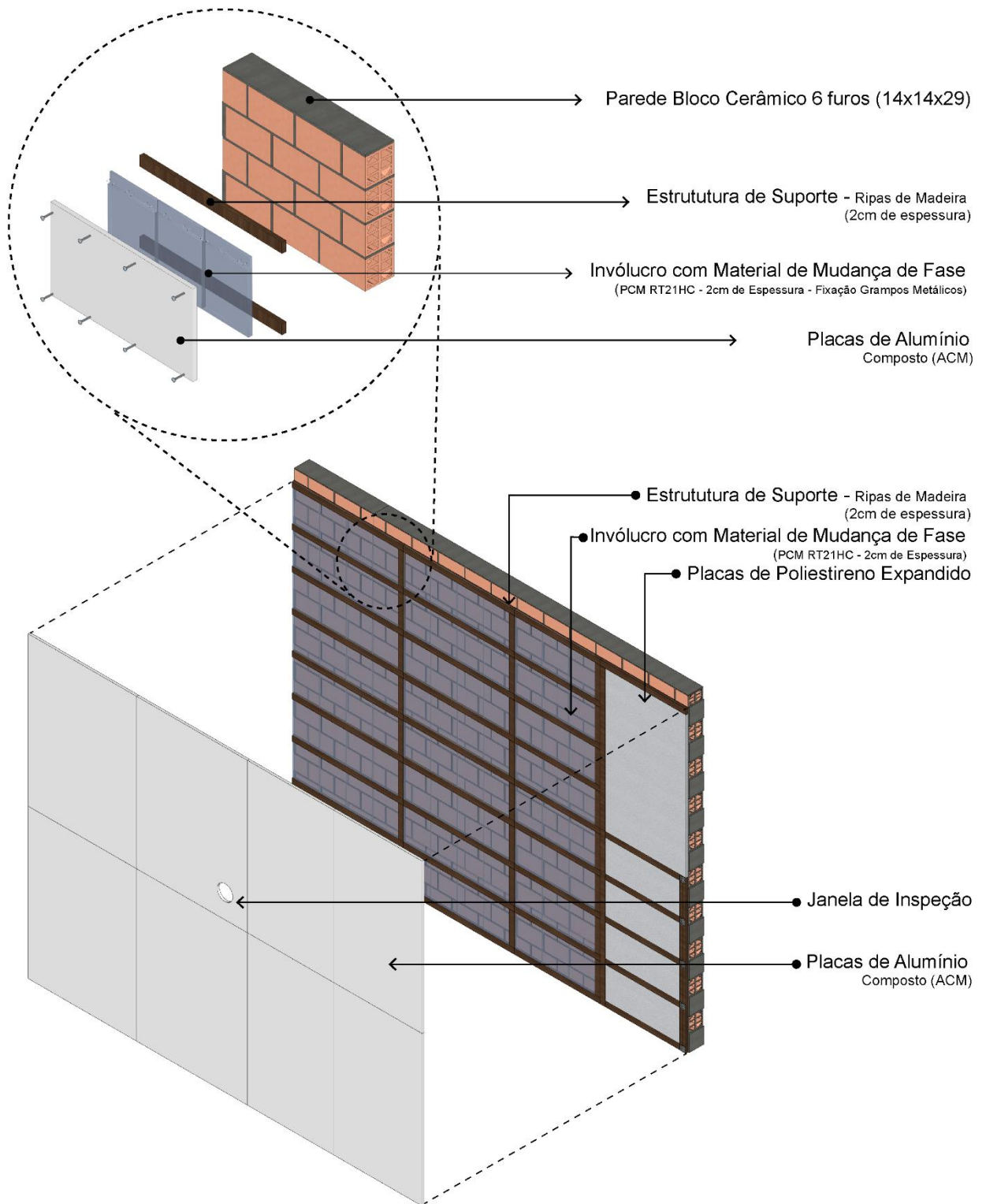
Tabela 5 - Propriedade dos PCMs

Parâmetro PCM - RT21HC	Valor Típico	Unidade
Faixa de fusão	20–23	°C
Faixa de solidificação	21–19 (pico: 21)	°C
Capacidade de armazenamento de calor	190	kJ/kg
Calor específico	2	kJ/kg·K
Densidade	2000	kg/m <sup>3</sup>
Condutividade térmica	0,2	W/m·K
Espessura	0,2	m
Abs. Térmica	0,9	-
Abs. Solar	0,5	-
Abs. Visível	0,5	-

Adaptado de Oliveira (2026) e Rubitherm (2020).

O PCM foi aplicado na face interna da parede com 2 cm de espessura, ocupando uma área de 6,0 m<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente 54% da área total da parede (11,10 m<sup>2</sup>). Ele cobre, portanto, cerca de 14% da área total das superfícies internas do ambiente (44,1 m<sup>2</sup>). Por fim, placas de alumínio composto (ACM) de 2 mm de espessura cobrem o PCM macroencapsulado, promovendo acabamento e proteção do material instalado em módulos conforme Figura 15.

Figura 15 - Esquema Isométrico: Fixação do PCM



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

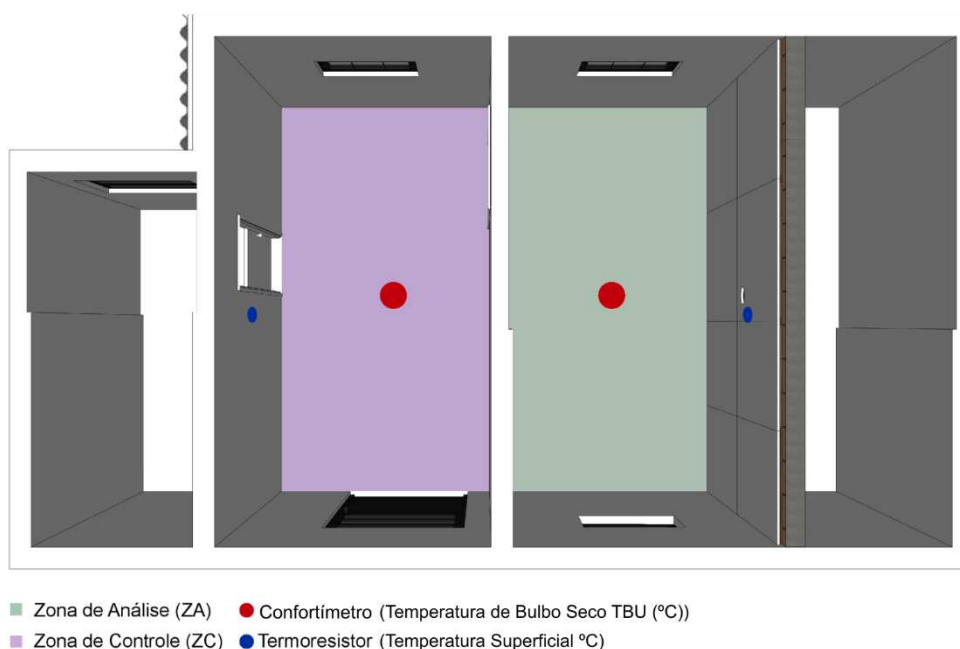
A seguir, na Tabela 6 são apresentados os instrumentos utilizados para a obtenção dos dados monitorados e o posicionamento dos sensores está indicado na Figura 16.

Tabela 6 - Equipamentos utilizados para o monitoramento da edificação

Instrumento	Grandeza Medida	Quantidade	Posição de Instalação
Confortímetro	Sensor de temperatura de bulbo seco (TBU) (°C)	2	Centro da zona de análise; 1,30 m de altura e Centro da Zona de Análise; fixado em um tripé situado a 1,30 m de altura.
Termoresistor	Temperatura Superficial (°C)	4	Centro das paredes leste (interno/externo) e oeste (interno/externo); 1,30 m do chão. Colado com cola TPU (Poliuretano Termoplástico).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 16 - Vista superior de um modelo 3D mostrando o posicionamento dos sensores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os dados experimentais foram coletados em intervalos de 5 minutos por meio de um *software* desenvolvido especificamente para essa finalidade, garantindo a automação e a precisão no registro das medições. Todos os dados coletados foram processados para uma base horária para análise.

### 3.3.4 Simulações Termoenergéticas

Foram realizadas duas etapas de simulação. Na primeira, o modelo foi executado sem a consideração de ocupação e de cargas internas de iluminação, com o objetivo de proceder à sua calibração e validação frente aos dados monitorados. Após a validação do modelo,

realizou-se uma nova rodada de simulações, incorporando os parâmetros de ocupação e cargas internas previamente definidos, a fim de avaliar o conforto térmico adaptativo segundo os critérios estabelecidos pela norma ASHRAE *Standard 55* (2023).

A modelagem incluiu os quatro ambientes, porém a simulação termoenergética focou em duas zonas principais: a Zona de Análise (em verde da Figura 16) e a Zona de Controle (em lilás na Figura 16). Ambas as zonas são semelhantes em termos de parâmetros e condições operacionais, o que permitiu uma comparação dos dados obtidos.

O programa *EnergyPlus* versão 22.1, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (EUA), foi utilizado para simular a edificação, a fim de se obter as cargas térmicas, temperaturas, ventilação e radiação solar. A modelagem de Materiais de Mudança de Fase (PCMs) no software *EnergyPlus* baseia-se no algoritmo de cálculo por Diferenças Finitas (*Conduction Finite Difference* - CondFD). Esse método matemático considera a relação entre a condutividade térmica e as temperaturas em um regime transiente de trocas de calor.

No processamento computacional, o algoritmo discretiza os componentes de fechamento do edifício (tais como paredes, pisos e tetos) em múltiplos nós, resolvendo numericamente as equações de transferência de calor em cada um deles. Para simular especificamente a mudança de estado físico, o método CondFD é acoplado a uma função entalpia-temperatura, o que permite representar a alteração do calor específico do material decorrente da troca de fase. Em seguida, as entalpias em cada nó são atualizadas a cada interação do cálculo, e esses valores resultantes são utilizados para definir o calor específico equivalente exato a cada passo de tempo (*time step*) da simulação (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

A inserção das propriedades termofísicas e do comportamento específico do PCM no simulador é feita através da adoção do método de histerese do material, em conformidade com as diretrizes e recomendações metodológicas de Al-Janabi e Kavgic (2019).

A adoção do *EnergyPlus* para este fim é consolidada, sendo considerado a ferramenta computacional mais difundida na literatura para a investigação dos efeitos passivos de PCMs em edificações (Saffari et al., 2017). A confiabilidade desta modelagem fundamenta-se no trabalho de Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012), que verificaram e validaram o algoritmo do *EnergyPlus* para PCMs adotando uma abordagem normativa fundamentada na ASHRAE 140 (ASHRAE, 2017), recomendando os parâmetros corretos de entrada para as simulações.

A geometria, materiais e condições de contorno são idênticos aos levantados na etapa de caracterização da edificação. Os componentes, assim como as propriedades construtivas que foram adotadas para simulação estão descritas na Tabela 7 e 8. As propriedades termofísicas, tais como absorvância solar, emissividade de ondas longas, condutividade térmica, calor específico e massa específica, de vários materiais, foram encontradas na NBR 15220 (ABNT, 2005). As simulações foram realizadas para o clima da cidade de Viçosa-MG com o arquivo climático VicosabRA\_ AMY\_ 2025\_ Jan-Dez.EPW criado a partir dos dados obtidos do Inmet para o ano de 2025 (Latecae, 2025).

Tabela 7 - Componentes adotados na simulação.

Componentes		Valores	Composição
Parede Externa – Sem PCM e Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	4,00[W/(m²K)]	Argamassa (2,5 cm) / Bloco cerâmico maciço / Argamassa (2 cm) / Pintura externa ( $\alpha$ )
	Capacidade Térmica	224,64 [kJ/m²K]	
Parede Externa – Sem PCM e com Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	1,32 [W/(m²K)]	Argamassa (2,5 cm) / Bloco cerâmico maciço (9×14×24) / Argamassa (2,5 cm) / EPS (2mm) / Telha Fibrocimento
	Capacidade Térmica	235,54 [kJ/m²K]	
Parede Interna – Com PCM	Transmitância Térmica	2,09 [W/(m²K)]	ACM (2mm) / PCM (2 cm) / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24) / Câmara de Ar / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24)
	Capacidade Térmica	150,8 [kJ/m²K]	
Parede Interna – Sem PCM e com Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	1,05 [W/(m²K)]	ACM (2mm) / EPS (2 cm) / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24) / Câmara de Ar (9×14×24)
	Capacidade Térmica	120,7 [kJ/m²K]	
Transmitância Térmica Piso	Transmitância Térmica	3,73 [W/(m²K)]	Laje maciça (10 cm)
Capacidade Térmica Piso	Capacidade Térmica	220 [kJ/m²K]	
Laje/Cobertura	Transmitância Térmica	2,05 [W/(m²K)]	Laje maciça / Câmara de ar (>5,0cm) / Telha Cerâmica
	Capacidade Térmica	238 [kJ/m²K]	
Absortância das Paredes ( $\alpha$ )		30	Branco Gelo (Acrílico Fosco)
Absortância da Cobertura ( $\alpha$ )		70	Telha (Acrílico Fosco)

Fonte: Fonte: Adaptado pelo autor da NBR 15220-2 (ABNT, 2005)

Tabela 8 - Propriedades dos componentes adotadas na simulação.

PROPRIEDADE	MATERIAL					
	EPS	Tijolo Maciço 9x9x14	Telha de Fibrocimento	Bloco Cerâmico sem revestimento 9x9x14	Bloco Cerâmico 9x9x14	Argamassa
Espessura (m)	0.00258	0.14	0.008	0.014	0.0134	0.025
Condutividade (W/ (m.K)	0.035	0.72	0.95	0.9	0.9	1.15
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	30	1800	1900	1600	1600	2000
Calor específico (J/kg. K)	1420	840	840	920	920	1000
Abs. Térmica	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Abs. Solar	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3
Abs. Visível	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3

PROPRIEDADE	MATERIAL				
	Laje de Concreto	PCM_RT21HC	Telha Cerâmica	Chapa de Madeira	Chapa de Aço
Espessura (m)	0.10	0.02	0.01	0.03	0.01
Condutividade (W/ (m.K)	1.75	0.20	1.05	0.15	35.00
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2000	825	2000	608	7823
Calor específico (J/kg. K)	900	2000	920	1630	500
Abs. Térmica	0.9	0.9	0.9	0.9	0.75
Abs. Solar	0.5	0.5	0.7	0.7	0.65
Abs. Visível	0.7	0.5	0.7	0.7	0.65

PROPRIEDADE	MATERIAL	
	Câmara de Ar Cobertura	Câmara de Bloco Cerâmico sem revestimento (9x9x14)
Resistência Térmica [m <sup>2</sup> K/W]	0,430	0,175

Fonte: Fonte: Adaptado pelo autor da NBR 15220 (ABNT, 2005)

Para a etapa de validação do modelo, a edificação foi considerada sem ocupação e sem iluminação, uma vez que a presença de usuários e o acionamento da iluminação artificial ocorriam apenas esporadicamente para manutenção do espaço. Uma carga de 70 W foi aplicada internamente devido à central dos equipamentos de monitoramento localizar-se na Zona de Análise (ZA) e do inversor de frequência de módulos fotovoltaicos localizado na Zona de Controle. O modelo de cálculo de ventilação foi de rede multizonas natural, por meio do *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*, permitindo a simulação do fluxo de ar multidirecional com o exterior e interzonas. No entanto, como na edificação real as portas e esquadrias

permaneceram sempre fechadas, somente a infiltração influenciou o ambiente durante a simulação.

Para a etapa de avaliação do conforto térmico adaptativo, por sua vez, adotou-se uma taxa de ocupação de 0,14 pessoas/m<sup>2</sup>, em conformidade com os parâmetros do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) (INMETRO, 2010) para edificações de escritórios, bem como uma carga de iluminação de 18 W, correspondente à lâmpada tubular instalada no ambiente. A verificação das condições de conforto segundo a ASHRAE *Standard 55* (2023) foi realizada para o período entre 08:00 e 18:00 horas, de modo a representar o horário típico de funcionamento de um escritório.

### 3.3.5 Análise e Comparação dos Resultados

Após o monitoramento dos parâmetros ambientais e simulações termoenergéticas, os dados coletados das duas zonas foram comparados para validação da simulação. Para os procedimentos de validação térmica no EnergyPlus, utilizou-se a metodologia adaptada por Souza (2024), com base na ASHRAE *Guideline 14* (2023), a fim de avaliar a tendência e a precisão do modelo em relação aos dados monitorados. Originalmente voltada à demanda de energia e água, essa diretriz foi adaptada por Souza para a calibração de temperatura, utilizando os limites de NMBE ( $\pm 10\%$ ) e CV(RMSE) ( $\leq 30\%$ ). Ambos os índices expressam erros relativos às médias medidas e são aplicáveis a diferentes variáveis físicas. Os parâmetros do modelo foram ajustados iterativamente com base em medições de temperatura do ar e de superfícies no local, até que os erros se enquadrassem nesses limites, corroborando práticas consolidadas em estudos recentes de desempenho termoenergético e ventilação (Lamberts et al., 2010; O'Donovan; O'Sullivan; Murphy, 2019; Souza, 2024).

O Erro Médio de Tendência (MBE - *Mean Bias Error*) foi utilizado para verificar a tendência geral do modelo, mostrando se há superestimação ou subestimação em relação aos dados medidos (Equação 2).

Valores positivos do MBE indicam que o modelo tende a superestimar, enquanto valores negativos refletem subestimação. Segundo a ASHRAE *Guideline 14* (2023), limites aceitáveis para o MBE são de  $\pm 10\%$  para dados horários e  $\pm 5\%$  para dados mensais.

Equação (2)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{n}$$

Onde:

S<sub>i</sub> = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$n$  = número de pontos de dados

O Erro Médio de Tendência Normalizado (NMBE - *Normalized Mean Bias Error*) é a versão normalizada do MBE, que descreve a tendência do modelo de forma relativa à média dos dados medidos, foi utilizado para comparar os diferentes conjuntos de dados (Equação 3). Os limites sugeridos pela ASHRAE *Guideline 14* (2023) para o NMBE são de  $\pm 5\%$  para dados horários e  $\pm 2\%$  para dados mensais.

Equação (3)

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{(n - 1), \bar{M}} \times 100$$

Onde:

$S_i$  = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$\bar{M}$  = média dos valores medidos

$n$  = número de pontos de dados

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) (Equação 4), por sua vez, foi utilizada para quantificar a precisão global do modelo, penalizando desvios mais expressivos. Embora não possua limites absolutos definidos, a RMSE foi utilizada em conjunto com o Coeficiente de Variação do RMSE (CV(RMSE) – *Coefficient of Variation of RMSE*) (Equação 5), que expressa o erro relativo à magnitude dos dados medidos, permitindo comparações entre diferentes grandezas ou locais. Para o CV(RMSE), a ASHRAE *Guideline 14* (2023) recomenda limites de até 30% para dados horários e 15% para dados mensais.

Equação (4)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}$$

Onde:

$S_i$  = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$n$  = número de pontos de dados

Equação (5)

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{M}} \times 100$$

Onde:

RMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio

$\bar{M}$  = média dos valores medidos

Para verificar o efeito do material de mudança de fase (PCM) na Zona de Análise em relação à Zona de Controle (sem PCM), foram realizadas análises descritivas dos dados simulados e monitorados ao longo da série temporal estabelecida. Além disso, foram conduzidas análises para dias muito frios (compreendendo o dia de temperatura mínima registrada e os dias anterior e posterior) e para dias quentes (correspondendo ao dia de máxima registrada e aos dias adjacentes).

Também foi conduzida a análise da resposta térmica da edificação, por meio do atraso térmico e do coeficiente do amortecimento térmicos definidos pelas Equações 6 e 7. Segundo Lajimi *et al.* (2025) a sensibilidade térmica de um edifício pode ser descrita por dois fatores principais. O primeiro é o atraso térmico ( $\varphi$ ), que representa o intervalo de tempo necessário para que a temperatura interna máxima ocorra após a temperatura externa atingir seu pico, sendo esse atraso influenciado pela inércia térmica da edificação (Roriz, 1996). Essa relação é expressa por:

Equação (6)

$$\varphi = t_{int,max} - t_{ext,max}$$

Onde:

$\varphi$  = Atraso Térmico

$t_{int}$  = temperatura interna

$t_{ext}$  = temperatura externa

max = máxima

O segundo fator é o Amortecimento Térmico ( $\mu$ ), que descreve como a relação entre as amplitudes das temperaturas máximas internas e externas, subtraída de 1. Esse coeficiente indica que, quanto maior o seu valor, maior é a capacidade de amortecimento (Roriz, 1996). Essa relação é dada por:

Equação (7)

$$\mu = 1 - \frac{\Delta T_{int}}{\Delta T_{ext}}$$

Onde:  $\mu$  = Amortecimento Térmico

$\Delta t_{int}$  = Amplitude da temperatura interna

$\Delta t_{ext}$  = Amplitude da temperatura externa

Tais parâmetros foram analisados entre a parede com PCM da zona avaliada e a parede equivalente da zona de controle, a fim de identificar diferenças no comportamento térmico e

na capacidade de amortecimento das oscilações de temperatura. Por fim, foram verificados os índices de conforto térmico de acordo com os critérios estabelecidos na ASHRAE *Standard 55* (2023), a fim de avaliar o desempenho das zonas quanto às condições de conforto térmico.

Os resultados e as discussões apresentados são preliminares e referem-se ao período de monitoramento compreendido entre 15/07 e 30/09, após uma semana de PCM instalado. Os dados foram organizados e analisados de forma estruturada em três partes. A primeira consistiu na comparação entre os dados simulados e monitorados da temperatura interna da Zona de Análise (ZA) e Zona de Controle (ZC) e da temperatura superficial da parede com PCM, seguida da análise da distribuição e variabilidade dos demais resultados. A segunda compreendeu a avaliação das temperaturas horárias frente ao PCM. Por fim, na terceira parte, o percentual de horas em conforto mensal (PHC) para ambas as zonas foi verificado.

### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.4.1 Simulação Comparada ao Monitoramento

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam as métricas de validação segundo os critérios da ASHRAE *Guideline 14* (2023).

Tabela 9 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA)

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,56 °C
CV(RMSE)	≤ 30%	5,45 %
MBE	±10%	2,08 °C
NMBE		9,38%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 10 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Controle (ZC)

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,25 °C
CV(RMSE)	≤ 30%	4,81 %
MBE	±10%	1,76 °C
NMBE		8,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 11 - Métricas para os dados de Temperatura Superficial da Parede com PCM

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,89 °C
CV(RMSE)	-	6,14 %
MBE	-	2,31°C
NMBE	-	10,45%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 12 - Métricas para os dados de Temperatura Superficial da parede com PCM na Zona de Análise e a equivalente sem PCM na Zona de Controle

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica	Métrica
		Com PCM (ZA)	Sem PCM (ZC)
RMSE	-	2,89 °C	2,10 °C
CV(RMSE)	-	6,14 %	0,75%
MBE	-	2,31°C	0,75 °C
NMBE	-	10,45%	3,80%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos para todos os indicadores mostram uma correspondência aceitável pela ASHRAE *Guideline 14* (2023), todos inferiores ou no limite para dados horários. Portanto, não foi necessária calibração do modelo computacional após a primeira comparação.

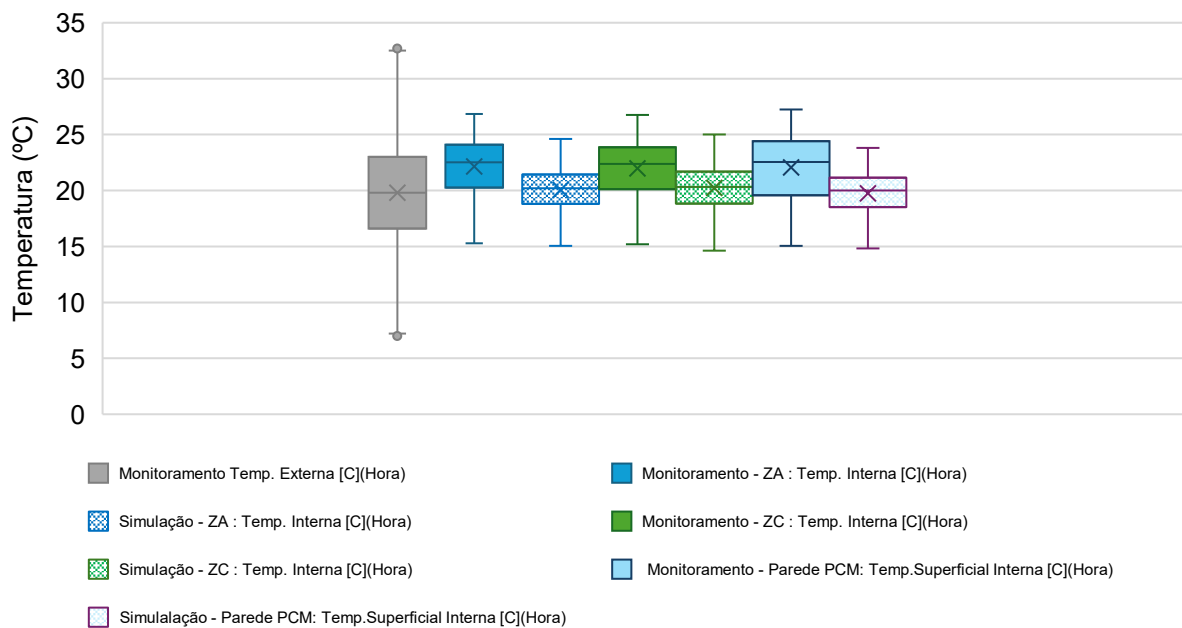
Para as temperaturas internas da Zona de Análise (ZA) e da Zona de Controle (ZC), os valores de MBE de aproximadamente 2,0 °C e 1,8 °C indicam que as previsões do modelo apresentam, em média, desvios absolutos próximos de 2 °C em relação às medições, o que é considerado satisfatório para a análise horária (Pereira et al., 2006). De modo semelhante, os NMBE de 9,38 % (ZA) e 8,00% (ZC) situam-se dentro da faixa recomendada pela ASHRAE, revelando boa tendência estatística e sugerindo que, com o aumento do período monitorado, esses índices tendem a se estabilizar ainda mais próximos da faixa ideal.

Do mesmo modo, os resultados de temperatura superficial interna da parede com PCM apresentam CV(RMSE) de 6,14 % e NMBE de 10,45 %, menor ou no limite dos requisitos da ASHRAE *Guideline 14* (2023). Embora a norma não trate de temperaturas superficiais e não tenha sido encontrado trabalho que faça validação direta com este parâmetro, Souza e Carlo (2024) mostraram como os percentuais de outros parâmetros poderiam ser interpretados com base nos percentuais referenciais do consumo de energia ou carga térmica. Assim, embora o NMBE ultrapasse 10%, está próximo do limite e, considerando ainda ser uma parede especial, ela a métrica é fornecida como referência para outros trabalhos. Nesse sentido, é interessante

notar a grandeza da parede com PCM em relação à parede sem o PCM. A primeira é uma parede interna que separa um ambiente a leste e, a segunda, parede interna que separa um ambiente a oeste. Descontando-se o fato de a carga térmica do ambiente a oeste ser maior, visto que está submetido a irradiação solar combinada a temperaturas do ar exterior mais elevadas do que pela manhã, o restante das condições são semelhantes. É notável como são maiores as diferenças entre o monitorado e simulado da parede com PCM em relação à parede comum. Estes valores, assim como o do CV(RMSE), mostram que a simulação de PCM ainda pode ser melhorada para atingir métricas tão baixas quanto a de uma parede interna comum. No entanto, os resultados foram considerados baixos o suficiente para se considerar a simulação calibrada, abrindo para reflexão somente o NMBE de 10,45% ser ligeiramente superior ao limite da ASHRAE *Guideline* 14 (2023).

Em geral, pode-se afirmar que a análise da distribuição e da variabilidade das temperaturas simuladas e monitoradas confirma a robustez dos indicadores estatísticos anteriormente discutidos. Há consonância entre os resultados das simulações e os dados observados, para as temperaturas internas da Zona de Análise (ZA), Zona de Controle (ZC), enquanto é fornecida uma métrica para a superfície interna da parede com PCM. Assim, o comportamento térmico reproduzido pelo modelo é tecnicamente semelhante ao observado experimentalmente, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17- Distribuição e a variabilidade das temperaturas simuladas e medidas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Em geral, vê-se uma pequena amplitude interna comparada ao ambiente externo. Dos ambientes internos, todas as temperaturas mínimas absolutas estão próximas dos 15°C,

porém as temperaturas máximas da simulação são aproximadamente 2°C inferiores às do monitoramento, o que leva a simulação a apresentar variações menores que o monitorado. Essa diferença também ocorre entre as medianas dos dados monitorados e simulados. Ainda, vê-se que as diferenças são maiores entre o monitorado e o simulado do que entre as zonas térmicas, tanto nas medianas quanto nos 1º e 3º quartis.

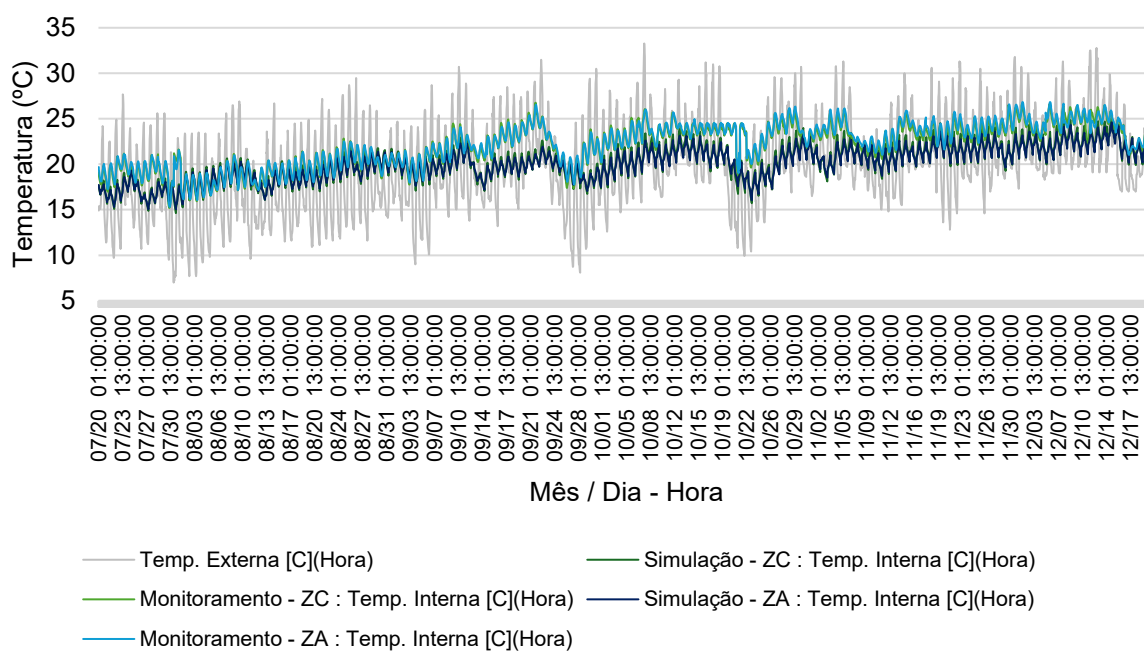
Essas diferenças são maiores nas temperaturas superficiais, o que é natural visto que a temperatura do ar é o reflexo das temperaturas superficiais de todas as superfícies. Nota-se uma redução na amplitude de temperatura superficial simulada para a parede com PCM, o que confirma o NMBE superior a 10% encontrado para esse parâmetro. No entanto, tanto as medições quanto as simulações apresentam distribuições próximas, com medianas e quartis equivalentes, se comparadas às oscilações externas, evidenciando a consistência do modelo de simulação.

A semelhança nas distribuições de temperaturas internas evidencia visualmente a boa correspondência entre os conjuntos de dados e corrobora com os indicadores quantitativos apresentados nas Tabelas 9 e 10.

### 3.4.2 Avaliação: Zona de Controle (ZC) x Zona de Análise (ZA)

A análise apresentada nas Figuras 18, 19 e 20 mostrou o comportamento das temperaturas internas e externas ao longo do período de monitoramento e simulação.

Figura 18 – Temperatura externa e internas da Zona de Análise (ZA) e da Zona de Controle (ZC), simuladas e monitoradas, no período de 20 de julho a 20 de dezembro.

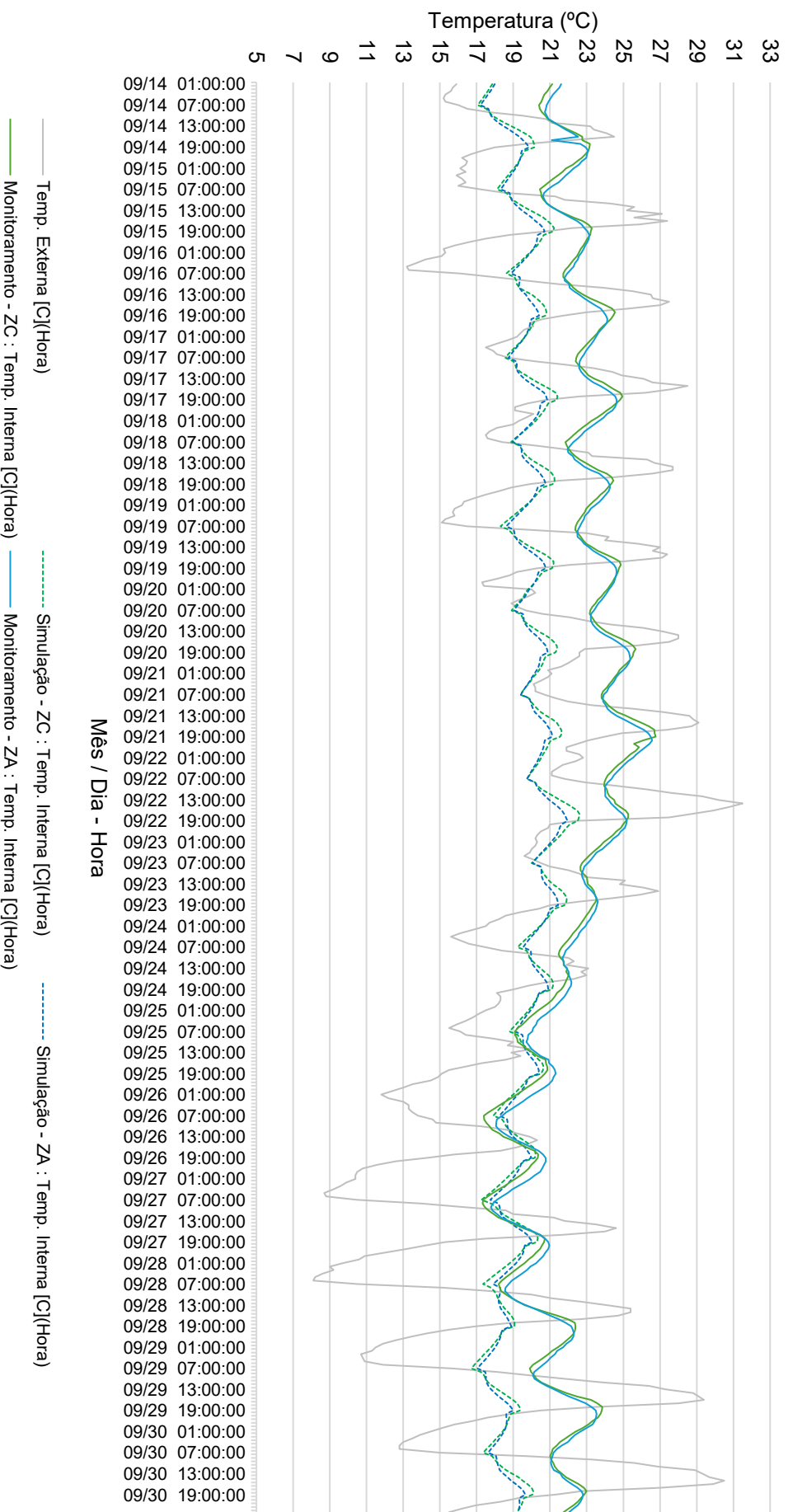


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 18, apresentou as temperaturas do ar do exterior e das zonas avaliadas ao longo de um período estendido, abrangendo variações sazonais (julho a dezembro). O amortecimento térmico é visível e os aumentos ou reduções abruptas de temperaturas externas se refletem com limitações nos ambientes internos. Em geral, é necessária uma sequência de dias para que os efeitos externos tenham reflexos internamente. Ainda, observou-se que a Zona de Análise (ZA), dotada de PCM, apresenta menores amplitudes térmicas internas em comparação à Zona de Controle (ZC), o que é mais evidente nos dados simulados, porém também está presente no monitoramento.

Para compreendê-lo melhor, criou-se recorte de 15 dias. A Figura 19 apresenta séries temporais horárias de temperaturas internas monitoradas e simuladas nas zonas ZC (controle, sem PCM) e ZA (análise, com PCM), comparadas à temperatura externa, de 14 a 30 de setembro.

Figura 19 - Séries temporais horárias das temperaturas internas monitoradas e simuladas nas zonas de controle (ZC, sem PCM) e de análise (ZA, com PCM), em comparação à temperatura externa, no período de 14 a 30 de setembro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 13 - Temperaturas mínimas e máximas diárias (°C) monitoradas em 3 dias da Figura 19

DIA	21/09		27/09		29/09	
	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
<b>Exterior</b>	19,7	28,8	8,8	24,0	10,8	29,1
<b>ZC</b>	23,9	<b>26,7</b>	<b>17,4</b>	20,7	<b>20,1</b>	<b>23,8</b>
<b>ZA</b>	23,9	26,5	19,9	<b>20,9</b>	20,2	23,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os dias da tabela 13 foram extraídos da Figura 19. A tabela mostra o dia 21 de setembro, resultante de uma sequência de temperaturas diárias elevadas, tanto as máximas quanto as mínimas; o dia 27/09, foi o primeiro dia com temperatura máxima mais elevada após quatro dias com temperaturas muito baixas, tanto as máximas (19 a 21°C) quanto as mínimas diárias (15 a 8°C); e o dia 29/09, quando as temperaturas máximas diárias se elevaram (até 29,1°C), mas a mínima continuava baixa (10,8°C). O negrito mostra as temperaturas mais altas para as máximas e as temperaturas mais baixas para as mínimas dentro das duas zonas. Mesmo com diferenças de decimais, vê-se como as temperaturas do ar da Zona de Controle oscilam mais com as variações externas em relação à Zona de Análise, que tem o PCM.

Assim, ao observar a Figura 19, vê-se que a ZA, com PCM, tem temperaturas mais altas do que a ZC, porém nos momentos em que as temperaturas máximas diárias do exterior caem por demais, enquanto ela não decai para menos que a ZC quando as mínimas se manifestam. Assim, identificou-se evidências de que a inércia para a manutenção do desempenho em climas frios traz mais benefícios do que para os dias quentes, em condições naturais de condicionamento.

Em geral, a temperatura externa apresenta elevada variabilidade ao longo do período analisado, com mínimos entre 9 e 11 °C e máximos próximos de 30 e 31 °C, resultando em amplitudes térmicas totais superiores a 20 °C, e amplitudes diárias de até 15°C. No monitoramento, as temperaturas internas da Zona de Controle mantiveram-se aproximadamente entre 18 °C e 26 °C, enquanto na Zona de Análise, entre 17 °C e 25 °C, o que correspondeu a amplitudes internas médias de 7 a 8 °C, cerca de 60% menores do que as amplitudes externas. As temperaturas médias internas monitoradas mantiveram-se próximas de 22 e 23 °C, evidenciando um comportamento térmico aproximadamente 2,5 vezes mais estável do que o ambiente externo. Na simulação, observa-se comportamento

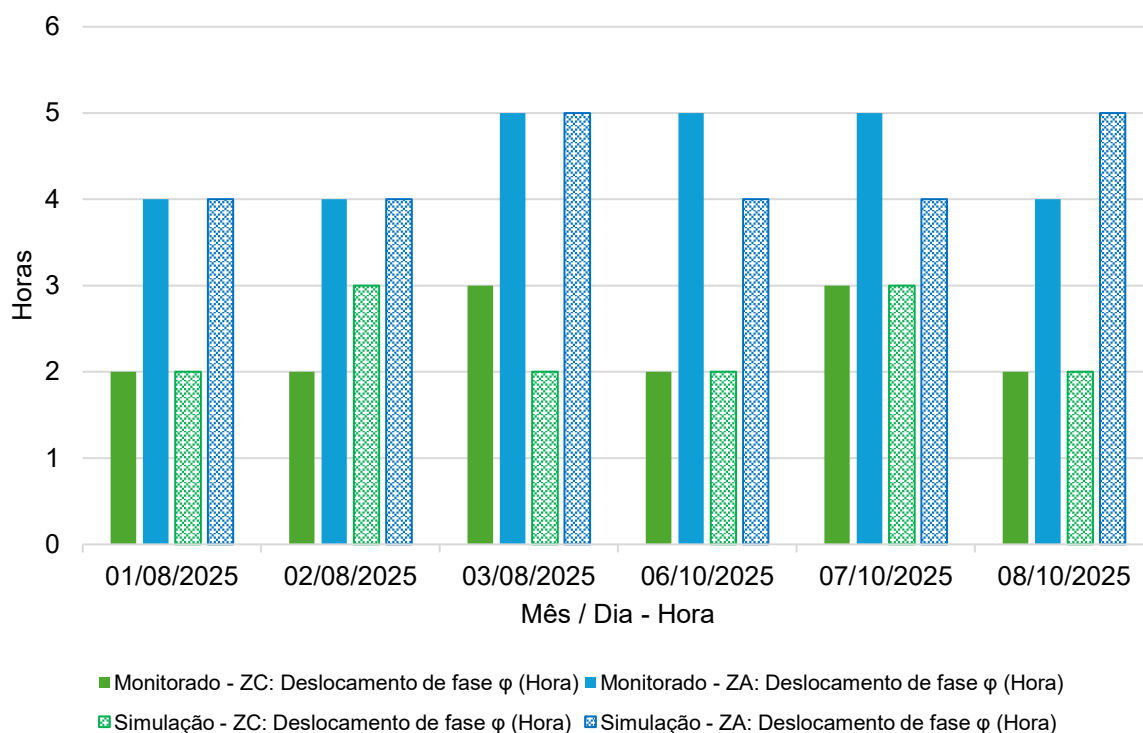
semelhante, porém com amplitudes mais reduzidas, variando entre 18,5 °C e 24,5 °C, o que representa uma redução de aproximadamente 30% em relação às amplitudes monitoradas. As médias simuladas situam-se entre 21 e 22 °C, confirmando que o modelo reproduz o amortecimento térmico, embora com maior suavização externassem relação ao ocorrido no monitoramento.

Assim, a comparação geral entre monitoramento e simulação indica que o monitoramento registrou maior variabilidade térmica interna. As temperaturas monitoradas atingem picos próximos de 26 °C e mínimos entre 17 e 18 °C, enquanto, na simulação, os valores máximos não ultrapassam 24,5–25 °C, correspondendo a picos 1 a 1,5°C menores. De modo semelhante, os mínimos simulados são aproximadamente 1 e 2 °C mais elevados, resultando em amplitudes térmicas internas da ordem de 7 e 8 °C no monitoramento, contra 5 e 6 °C na simulação, ou seja, amplitudes simuladas cerca de 25% menores. As temperaturas médias simuladas permanecem abaixo das monitoradas, com diferenças médias de 0,5 a 1,0 °C.

Na análise comparativa entre as Zonas de Controle (ZC) e de Análise (ZA), os dados monitorados revelam temperaturas médias ligeiramente superiores na ZC (~22,5 a 23°C) em relação à ZA (~21,5 a 22°C), correspondendo a diferenças relativas de aproximadamente 4-5%. Os picos térmicos atingem 26°C na ZC e 25°C na ZA, com diferença de 1°C, enquanto as amplitudes diárias são de 12 a 15% menores na ZA (~7°C vs. ~8°C na ZC), confirmando maior estabilidade térmica proporcionada pelo PCM na ZA. Na simulação, preserva-se essa hierarquia (médias ~22°C ZC vs. ~21°C ZA), mas as amplitudes se equiparam (~5 a 6°C em ambas), reduzindo o contraste entre as zonas em 35% frente ao monitoramento.

Para quantificar essas diferenças dinâmicas de forma mais precisa, duas análises complementares foram realizadas conforme Roriz (1996) e Lajimi et al. (2025), focando nos dias de temperaturas mínima e máxima registradas durante todo período de monitoramento e simulação. A primeira (Figura 20), calcula o atraso térmico ( $\phi$ ), reforçam as evidências gráficas ao evidenciar o desempenho superior da ZA com PCM em relação à ZC, com maiores atrasos na zona equipada com PMC.

Figura 20 - Atraso térmico nos dias de menor mínima (02/08, dia anterior e posterior) e de maior máxima (07/10, dia anterior e posterior).

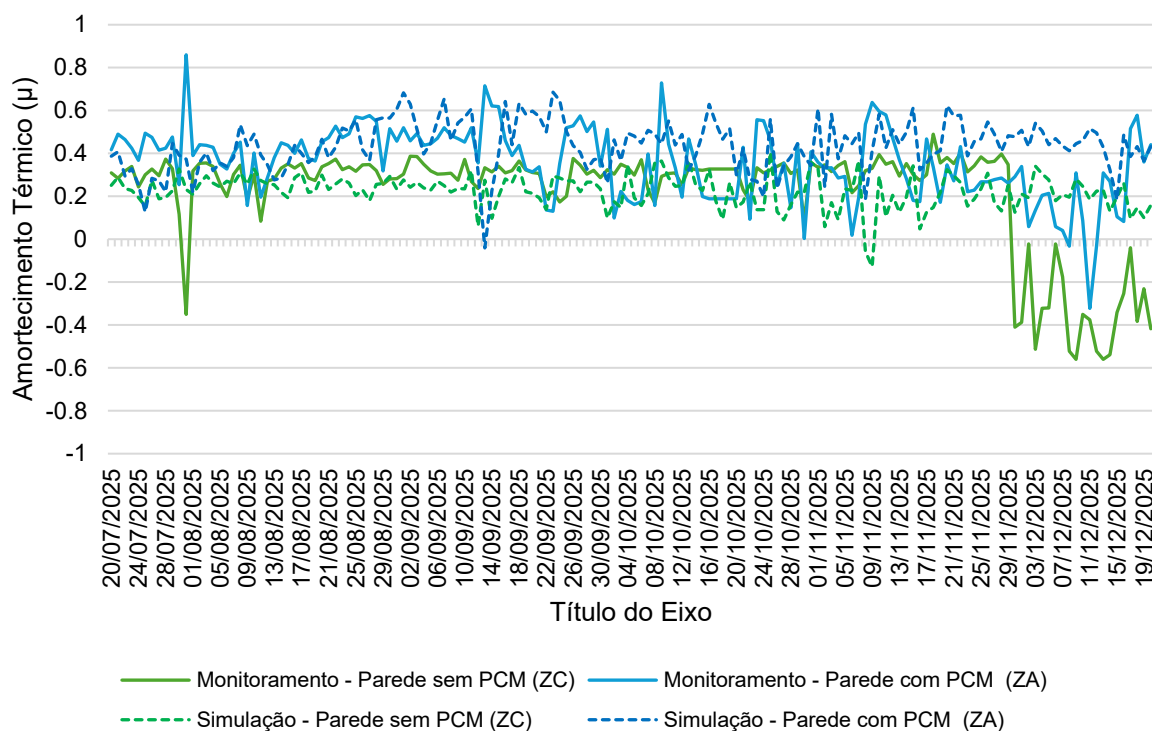


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nos dias frios de agosto, observa-se que a Zona de Análise (ZA), com PCM, apresenta deslocamentos de fase entre 4 e 5 horas, tanto para os dados simulados quanto para os monitorados, enquanto a Zona de Controle (ZC) permanece em torno de 2 a 3 horas, o que representa um atraso térmico aproximadamente 70 % a 100 % maior na ZA em relação à ZC. Nos dias quentes de outubro, o comportamento se mantém: a ZA mantém atrasos entre 4 e 5 horas, ao passo que a ZC permanece em patamar inferior, variando de 2 a 3 horas, isto é, cerca de 60 % a 100 % menores que os da ZA, ainda que com pequenas diferenças entre simulação e monitoramento. Essa persistência de maiores atrasos térmicos na ZA, em ambas as condições sazonais, confirma a atuação do PCM como elemento de inércia térmica, retardando a resposta da temperatura interna frente aos picos externos e reforçando a consistência do modelo numérico adotado.

A análise do Amortecimento Térmico focou na evolução temporal dos efeitos da parede com PCM na Zona de Análise e a sua correspondente na Zona de Controle, sem PCM, e estão ilustradas na Figura 21.

Figura 21 - Amortecimento Térmico das Zonas de Controle e Análise observado por meio das temperaturas externas do ar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que, ao longo de praticamente todo o período, a parede com PCM (ZA) exibe valores de amortecimento térmico mais elevados, tanto para os dados simulados quanto para os monitorados, indicando maior capacidade de atenuar as amplitudes térmicas internas em relação às oscilações externas. Neste caso, embora tenha sido observado pior desempenho do PCM em dias quentes do que em dias frio, ele ainda foi mais positivo do que a Zona de Controle.

Em grande parte dos dias, o amortecimento térmico permanece em torno de 0,3 a 0,6 para a parede com PCM, enquanto a parede sem PCM (ZC) oscila predominantemente entre 0,1 e 0,4, com episódios de redução acentuada e até valores negativos nos dados monitorados da ZC, que denotam momentos de resposta interna pouco eficiente ao amortecimento das variações externas. De acordo com a definição do coeficiente, quanto maior o valor de  $\mu$ , maior é a capacidade de amortecimento, de modo que a predominância de valores mais altos na ZA confirma o papel do PCM em reforçar a inércia térmica da envoltória e em suavizar as variações de temperatura no interior do ambiente.

Por fim, com o modelo numérico validado o conforto foi avaliado para o ano completo e o recorte horário definido na metodologia (Tabela 14), obtendo o Percentual de Horas em Conforto (%) conforme as diretrizes da ASHRAE *Standard 55* (2023).

Tabela 14 - Percentual de Horas em Conforto a partir das temperaturas operativas simuladas.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>Zona de Controle</b>	<b>Zona de Análise</b>
Frio	36,26%	59,33%
Conforto	63,74%	40,76%
Quente	0.00%	0.00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A avaliação do conforto térmico entre 8h00 e 18h00, conforme apresentado na Tabela 12, mostrou que a presença do PCM na Zona de Análise (ZA) não proporcionou índices superiores de conforto em relação à Zona de Controle (ZC), sem PCM. Considerando os cenários de ocupação, cargas internas e condições operacionais adotados nas simulações, a ZC apresentou 63,74 % de horas em conforto, enquanto a ZA registrou 40,76 %, com 36,26 % e 59,33 % de horas em desconforto por frio, respectivamente, e ausência de horas em desconforto por calor em ambas as zonas.

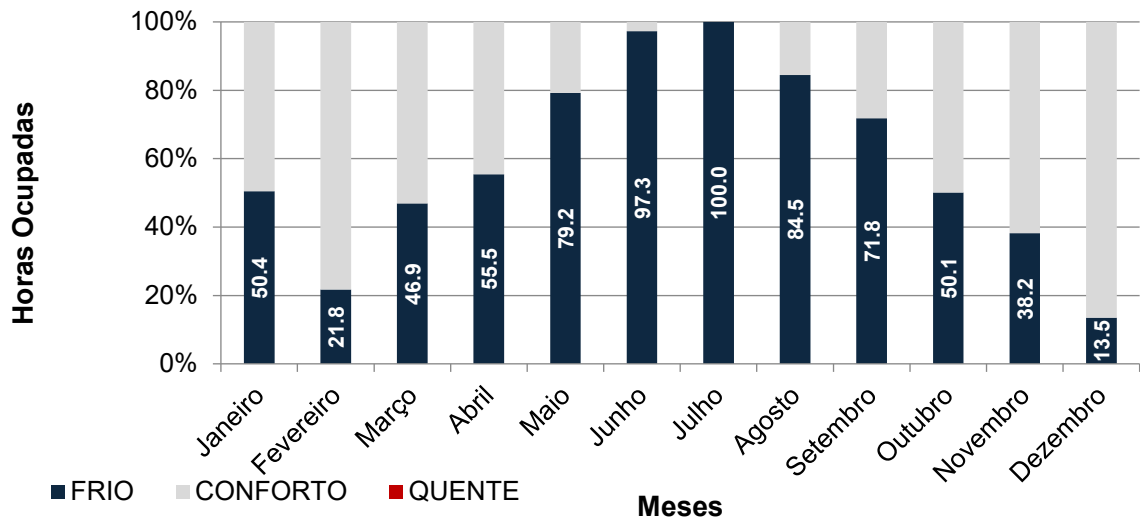
Tal resultado pode ser atribuído, em parte, à dinâmica do PCM frente ao comportamento térmico sazonal e as condições de ventilação monitoradas e simuladas. Observa-se que o percentual de horas em desconforto por frio na ZA (59,33%) foi superior àquele registrado na ZC (36,26%). As análises realizadas indicam que, em determinados momentos, o PCM não realizou integralmente sua transição de fase durante os ciclos térmicos diários, reduzindo assim sua efetividade na mitigação de desconfortos por frio e, em alguns períodos, até contribuindo para o aumento desse índice.

Como Olivera (2023) já havia destacado, a fim de que a inércia térmica contribua efetivamente para o conforto térmico, é necessário associá-la a estratégias adequadas de ventilação, preferencialmente em períodos em que o ar externo apresenta temperaturas mais elevadas ou há disponibilidade de ganhos solares e, quando pertinente, a sistemas de aquecimento. Dessa forma, o ambiente pode armazenar calor nos momentos em que este está disponível e liberá-lo de forma retardada, evitando que a elevada inércia térmica apenas prolongue condições de resfriamento e desconforto por frio.

Para o contexto e as condições analisadas, nas quais as aberturas permaneceram sem acionamento e completamente vedadas, os dados simulados indicam que a implantação do PCM não foi suficiente para promover melhorias no conforto térmico anual do ambiente. Esse resultado evidencia a necessidade de ventilação, que impacta diretamente o seu comportamento térmico em um clima tropical úmido.

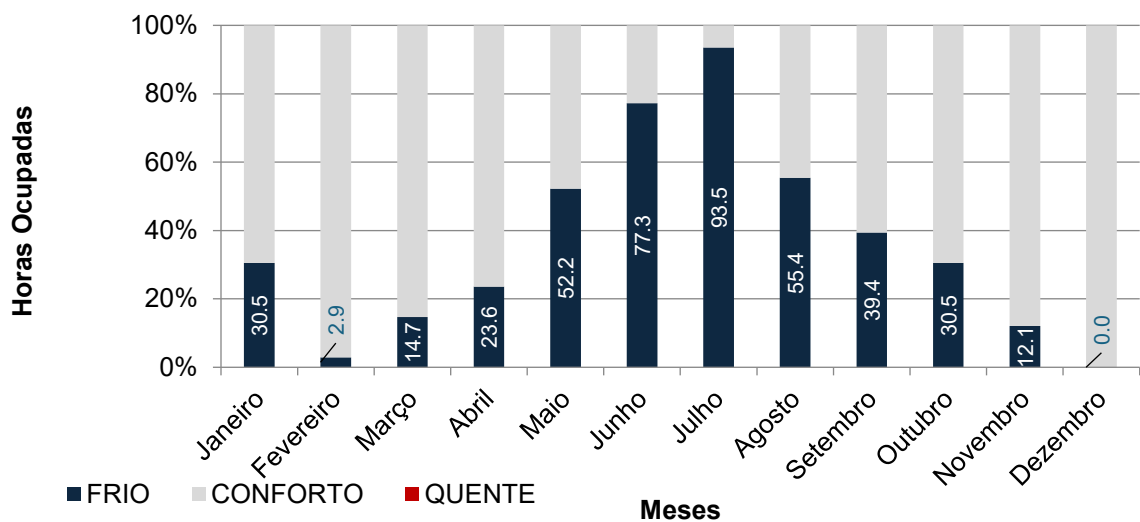
Para compreender as sazonalidades foram realizadas análises mensais do PHC. As análises evidenciaram essa influência dos dados climáticos externos sobre os índices de conforto térmico (Figura 22 e Figura 23).

Figura 22 - Percentual mensal de horas em conforto na Zona de Análise, obtido por simulação considerando ocupação entre 08:00h e 18:00h ao longo do ano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 23 - Percentual mensal de horas em conforto na Zona de Controle, obtido por simulação considerando ocupação entre 8h00 e 18h00 ao longo do ano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O percentual mensal de horas em conforto, tanto para a Zona de Análise quanto para a Zona de Controle, o PCM sem ventilação seletiva não foi suficiente para mitigar o desconforto por frio em nenhuma das zonas. Em ambas as zonas, os percentuais de conforto permanecem reduzidos ao longo de boa parte do ano, com valores baixos nos meses mais frios e de

transição (maio a setembro), indicando predominância de horas abaixo da faixa de conforto térmico.

A comparação entre resultados da Zona de Controle e Análise mostram que, embora existam diferenças numéricas entre elas, o padrão geral é consistente: o PCM contribui para o atraso e o amortecimento das variações de temperatura interna, mas esse efeito, isoladamente, não se reflete em melhorias no conforto térmico anual. Sem ventilação que permita aproveitar períodos mais quentes do dia para “recarregar/descarregar” a inércia térmica, tanto na Zona de Análise quanto na Zona de Controle, o sistema tende a manter o ambiente resfriado por mais tempo, o que intensifica o desconforto por frio, sobretudo nos meses de menor temperatura.

### 3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou experimentalmente e por simulação termoenergética o desempenho de materiais de mudança de fase (PCM) incorporados a uma edificação localizada na Z2M NBR15220-3 (ABNT, 2024), comparando uma zona equipada com PCM RT21HC com uma zona de controle convencional. Os resultados obtidos por meio de monitoramento (julho a dezembro de 2025) e modelagem computacional permitiram avaliar quantitativamente a eficácia dessa tecnologia passiva no aumento da inércia térmica.

A validação do modelo computacional demonstrou concordância entre simulação e monitoramento, com todas as métricas da ASHRAE *Guideline* 14 (2023) atendidas. O coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV(RMSE)) de 5,45% e 4,81, respectivamente, para temperatura interna de ZA e ZC e 6,14% para temperatura superficial do PCM evidenciaram que o modelo *EnergyPlus* reproduziu de forma adequada os fenômenos de transferência de calor, incluindo o efeito de mudança de fase. Essa confiabilidade foi fundamental para validar comparações entre as zonas e para confirmar a representatividade das análises subsequentes.

A análise do atraso térmico ( $\phi$ ) revelou diferenças entre as zonas. A Zona de Análise equipada com PCM apresentou deslocamentos que variaram entre 4 e 5 horas (simulação e monitorados) em contraste com a zona de controle que exibiu atrasos de apenas 2 a 3 horas (simulação e monitoramento). Esse aumento significativo no deslocamento de fase atesta que o PCM ampliou a inércia térmica do sistema construtivo, promovendo atraso na propagação do pico térmico externo para o ambiente interno. Essa dinâmica demonstra que o material absorve calor latente durante os períodos de aumento térmico, liberando-o gradualmente durante as horas mais frias, resultando em atenuação temporal efetiva.

Os resultados do coeficiente de amortecimento térmico mostram que a parede com PCM mantém, na maior parte do período, valores de  $\mu$  sistematicamente superiores aos da parede de referência, situando-se em torno de 0,3 a 0,6, contra cerca de 0,1 a 0,4 na ZC. Essa predominância de  $\mu$  mais elevado na ZA indica maior capacidade de atenuar as amplitudes térmicas internas, reforçando a inércia térmica da envoltória com PCM e a sua eficácia em suavizar as variações de temperatura do ar interno frente às oscilações externas.

Em termos de conforto passivo, o PCM demonstrou ser um mitigador eficiente dos extremos de calor. A edificação com PCM foi capaz de atenuar picos térmicos elevados, resultando na ausência de registro de desconforto por calor em qualquer mês do período simulado. No entanto, a avaliação anual do Percentual de Horas em Conforto (PHC), considerando o horário de ocupação típico de escritório (8:00h às 18:00h), revelou que a Zona de Análise (ZA) apresentou um desempenho inferior (40,76% em conforto) em comparação com a Zona de

Controle (ZC), que atingiu 63,74%.

Este resultado se deve, primariamente, ao aumento do percentual de horas em desconforto por frio na ZA (59,33%) em relação à ZC (36,26%). Esse paradoxo indica que, nas condições analisadas, o PCM RT21HC não promoveu aumento do percentual de horas em conforto para o clima de Viçosa-MG, uma vez que o material, em diversos momentos, não completou integralmente sua transição de fase, reduzindo sua efetividade na mitigação do desconforto por frio.

Assim, o desafio de adequação térmica concentra-se na redução do desconforto por frio, especialmente nos meses de inverno (junho, julho e agosto), sendo necessário avaliar e simular diferentes estratégias de ventilação para o modelo, de modo a potencializar o aproveitamento térmico do PCM.

### 3.2 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Com financiamento do projeto APQ-02622-23 – Criação do ERDEM, ambiente para ensaios e monitoramento do desempenho termoenergético do edifício e seus componentes, financiado pela Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Também contou com apoio do projeto 406426/2022-8 – Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e do Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).

### 3.3 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 55-2023**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA: ASHRAE, 2023.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Guideline 14-2023**: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA: ASHRAE, 2023.

AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: a case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 162, p. 1–19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-3:2005 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-2:2022 – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3:2024 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho**. Rio de Janeiro, 2024.

BAYLIS, C.; CRUICKSHANK, C. Review of bio-based phase change materials as passive thermal storage in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.186, p. 113690, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113690.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

**Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010. Brasília, DF: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2010. Disponível em:

<[https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010\\_RTQ\\_Def\\_Edificacoes-C\\_rev01.pdf](https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf)>. Acesso em: janeiro de 2026.

BERARDI, Umberto; SOUDIAN, Shahrzad. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 180-195, jan. 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.12.016

CUI Y, XIE J, LIU J, WANG J, CHEN S. A review on phase change material application in building. **Advances in Mechanical Engineering**, v.9, p. 1-15, 2017  
doi:10.1177/1687814017700828.

JIA, J.; LIU, B. MA, L.; WANG, H.; LI, D.; WANG, Y. Energy saving performance optimization and regional adaptability of prefabricated buildings with PCM in different climates. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 26, p. 101164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101164>

LAJIMI, N.; BOUKADIDA, N.; MAATKI, C.e; HADRICH, B.; HASSEN, W.; KOLSI, L.; BEN AISSIA, H. Thermal performance and energy efficiency evaluation of building envelopes incorporating trombe walls, PCM, and multi-alveolar structures in Tunisian climate. **Buildings**, v. 15, n. 14, p. 2575, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15142575>.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; DONALD PEREIRA, C.; BATISTA, J. O. (eds.). **Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. v. 4, 53 p. ISBN 978-85-7426-099-0.

MASOOD, U.; HAGGAG, M.; HASSAN, A.; MOHAMMAD, L. A Review of Phase Change Materials as a Heat Storage Medium for Cooling Applications in the Built Environment. **Buildings**, v.13, p. 1595- 1626, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071595>

O'DONOVAN, A.; O' SULLIVAN, P. D.; MURPHY, M. D. Predicting air temperatures in a naturally ventilated nearly zero energy building: Calibration, validation, analysis and approaches. *Applied Energy*, v. 250, p. 991–1010, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.082

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; CARLO, J. C. Influência do uso de PCMs em escritório nos climas brasileiros. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 15, e024006, p. 1-21, 2024. DOI: 10.20396/parc.v15i00.8673208.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; SILVA, M. A.; MARQUES, R. F. S.; MAGALHÃES, T. S.; PEREIRA, J. P. M.; CARLO, J. C. et al. A influência do clima no conforto térmico em escritórios com PCMs no Brasil. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 16, e024006, p. 1-17, 2025. DOI: 10.20396/parc.v16i00.8676127.

PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. **Casa Eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC; Eletrosul; Eletrobrás/Procel, 2006.

RORIZ, Maurício. **Conforto Térmico em Edificações: um Modelo Matemático e uma Aplicação**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996. 185p.

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. **PARC**, v. 8, p. 127-140, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i2.8650228>.

SHREE, V; DWIVEDI, A; SAXENA, A.; PATHAK, S.; AGRAWAL, N.; TRIPATHI, B.; SHUKLA, S.; KUMAR, R.; GOEL, V. A comprehensive review of harnessing the potential of phase change materials (PCMs) in energy-efficient building envelopes. **Journal of Building Engineering**, v. 101, p. 111841, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.111841.

SOUZA, P.C.E., CARLO, J.C. The Effect of Architectural Parameters on the Risk of Infection by Airborne Diseases in Classrooms. In: Leal Filho, W., Dibbern, T., de Maya, S.R., Alarcón-del-Amo, MdC., Rives, L.M. (eds) **The Contribution of Universities Towards Education for Sustainable Development**. World Sustainability Series. Springer, Cham., 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-49853-4\_14

SOUZA, Pedro Carmo e. **Effect of natural ventilation on airborne disease infection risk in lecture halls**. 2024. 111 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2024.

TABARES-VELASCO, P. C.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v. 54, p. 186–196, ago. 2012. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.02.019.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation**. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: <https://energyplus.net>. Acesso em: janeiro, 2025.

WANG, X.; LI, W.; LUO, Z.; WANG, K.; SHAH, S. A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. **Energy & Buildings**, v. 260, p.1-25, 2022. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.111923

ZHAN H.; MAHYUDDIN N.; SULAIMAN R.; KHAYATIAN F. Phase change material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and thermal comfort: A review. **Construction and Building Materials**, v. 397, p. 1-37, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132312.

#### 4. CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO USO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM) ASSOCIADOS A SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL NOTURNO E AR-CONDICIONADO NO ENERGYPLUS

##### Resumo:

Este estudo avaliou o impacto da integração de materiais de mudança de fase (PCM) a diferentes estratégias de ventilação noturna — ar-condicionado, ventilação natural e modo alternado (ventilação natural durante o dia e ar-condicionado no período noturno) — sobre o desempenho termoenergético do Espaço de Desempenho Monitorado da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, na Zona Bioclimática 2M. O objetivo foi investigar como essa combinação afetou a eficiência energética e o conforto térmico de um ambiente em clima subtropical, mediante monitoramento experimental *in loco* e simulações calibradas no EnergyPlus. Para isso, foram monitorados parâmetros como temperatura do ar, de bulbo seco, de globo e fluxo térmico em intervalos de cinco minutos, convertidos para base horária com dados climáticos do INMET. O modelo considerou a geometria real da edificação, assim como as propriedades termofísicas conforme NBR 15220 e PCMs pelo método de diferenças finitas, com indicadores dentro dos limites aceitáveis, como CV(RMSE) abaixo de 30% e NMBE inferior a 10%. A zona com PCMs superou a de controle (sem PCMs), reduzindo graus-hora de resfriamento em 17% (ar-condicionado: 1020 vs. 1235 °C·h), 22% (ventilação noturna: 1354 vs. 1727 °C·h) e 26% (modo alternado: 930 vs. 1250 °C·h), sem graus-hora de aquecimento no período diurno. Os PCMs elevaram o coeficiente de amortecimento térmico em até 50% e geraram atraso térmico médio de 3 horas. A estratégia alternada otimizou a carga/descarga dos PCMs, minimizando desconforto por calor em 31% frente à ventilação isolada, demonstrando viabilidade do seu uso para edifícios leves em climas subtropicais.

##### Abstract:

This study evaluated the impact of integrating phase-change materials (PCM) into different nighttime ventilation strategies—air conditioning, natural ventilation, and combined ventilation (natural ventilation during the day and air conditioning at night) — on the thermal-energy performance of the Monitored Performance Space at the Federal University of Viçosa, in Viçosa, Minas Gerais, in Bioclimatic Zone 2M. ). The objective was to evaluate the efficacy of macro-encapsulation (RT21HC) in optimizing thermal comfort in lightweight buildings in a subtropical climate. The methodology combined *in-situ* experimental monitoring and computational simulations in EnergyPlus v.22, calibrated according to ASHRAE Guideline 14, showing high precision with CV(RMSE) between -0.88% and 2.25% and NMBE within  $\pm 10\%$ . The results of the annual simulations indicated null cooling demand during the occupied period, evidencing the PCM's role in mitigating cold discomfort. The zone with PCM outperformed the control zone, reducing Heating Degree-Hours by 29.9% under night conditioning and 26.9% in the hybrid strategy. The material increased the thermal inertia of the thermal zone, increasing damping by about 50% and promoting average thermal delays of 3 hours. Furthermore, it was observed that the hybrid strategy, combining daytime selective ventilation (above 26°C) and night conditioning (above 21°C), maximizes PCM regeneration and energy performance, validating the technology for the analyzed region.

Palavras-Chaves: Materiais de Mudança de Fase (PCM); Desempenho Termoenergético; Ventilação Noturna; Ar-condicionado; EnergyPlus.

## 4.1 INTRODUÇÃO

A redução da demanda energética por sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* - HVAC) constitui um dos principais impulsionadores para a adoção de tecnologias passivas na construção civil (Pereira et al., 2025; Alvarez-Rodriguez et al., 2025). Sua integração com Materiais de Mudança de Fase (PCMs) na envoltória das edificações pode atenuar os picos de carga térmica e deslocar o consumo de energia para horários fora de ponta, contribuindo para a estabilidade da rede elétrica e a redução de custos operacionais (Rathore; Shukla, 2020; Rashid et al., 2024). No entanto, o potencial de economia de energia está intrinsecamente ligado à estratégia de gerenciamento de ventilação e da temperatura interna (Al-Absi et al., 2020; Oliveira et al., 2025).

Estudos demonstram que a operação isolada do PCM, sem o auxílio de ventilação estratégica, pode apresentar impacto limitado na redução do consumo anual de energia em certos climas (Al-Absi et al., 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024). A ventilação noturna proporcionada pelo ar externo durante a noite emerge como forma eficiente de retirar a carga térmica armazenada no PCM, sem consumo significativo de energia elétrica (Sovetova; Memon; Kim, 2019; Zhao et al., 2024). Em períodos de temperaturas extremas, o modo alternado com sistemas de ar-condicionado torna-se necessária, ocasião em que o PCM pode atuar na redução e na frequência de acionamento dos equipamentos (Rashid et al., 2024; Pereira et al., 2025).

Nesse contexto, o presente estudo investiga o comportamento termoenergético do Espaço de Desempenho Monitorado – UFV (EDEM) sob diferentes regimes de ventilação e modos operacionais (natural noturna, ar-condicionado e modo alternado). A partir de simulações computacionais e monitoramento *in loco*, busca-se compreender de que forma a integração entre PCM e sistemas de ventilação controlada pode potencializar a eficiência energética e o conforto térmico, considerando as particularidades climáticas de Viçosa – MG.

## 4.1 REFERENCIAL TEÓRICO

A inércia térmica de uma edificação representa sua capacidade de resistir às variações de temperatura, retardando a passagem do calor entre o ambiente externo e interno (Rathore; Shukla, 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). Tradicionalmente, essa característica depende da massa térmica dos materiais de construção. No entanto, edificações contemporâneas, especialmente as de fechamentos leves, apresentam baixos níveis de inércia, tornando necessário o uso de soluções complementares para o armazenamento de energia térmica (Brito, 2015; Liu et al., 2024; Almeida; Brandalise; Mizgier, 2022).

O armazenamento de energia térmica (*Thermal Energy Storage* – TES) é uma estratégia amplamente estudada para equilibrar a oferta e a demanda energética em edificações

(Wijesuriya; Tabares-Velasco, 2020; Pereira et al., 2025). Entre as tecnologias de TES, destaca-se o uso de Materiais de Mudança de Fase (PCMs), que armazenam energia térmica por meio do calor latente durante o processo de fusão e solidificação, mantendo a temperatura quase constante ao longo desse processo (Rathore; Shukla, 2020; Almeida; Brandalise; Mizgier, 2022).

O desempenho dos PCMs está diretamente ligado à forma como são integrados ao ambiente construído. Quando empregados de maneira passiva, dependem exclusivamente das variações naturais de temperatura para absorver e liberar calor. Já nas configurações ativas, o processo de carga e descarga é potencializado por meio de sistemas auxiliares, como ventiladores, bombas ou serpentinas de resfriamento (Faraj et al., 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

Em climas quentes, a literatura destaca o uso combinado de PCMs com ventilação ativa noturna, o que favorece a completa solidificação do material e, conseqüentemente, aumenta a capacidade de armazenamento para o ciclo diurno (Berardi; Soudian, 2019; Qu et al., 2021; Zhao et al., 2024). Essa integração caracteriza uma abordagem alternada, na qual o PCM atua como *buffer* térmico enquanto a ventilação controlada regula o balanço energético do sistema.

A ventilação noturna desempenha papel essencial na regeneração dos PCMs, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde a amplitude térmica diária é o principal motor da troca de fase (Al-Absi et al., 2020; Zhao et al., 2024). Sem a descarga completa do material, o PCM pode atuar apenas como isolante térmico, reduzindo sua eficácia e comprometendo o desempenho energético da edificação (Bai et al., 2020; Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2024).

Estudos mostram que estratégias de ventilação seletiva, natural ou mecânica, podem aumentar significativamente o potencial dos PCMs para reduzir a temperatura interna de pico e melhorar o conforto térmico (Solgi et al., 2019; Oliveira et al., 2025). Entretanto, a definição inadequada de *setpoints* ou o controle ineficiente das aberturas pode resultar em ventilação excessiva ou insuficiente, prejudicando tanto o desempenho térmico quanto o energético (Saffari et al., 2017; Kuczyński; Staszczuk, 2023).

Ferramentas de simulação como o *EnergyPlus*, complementadas pelo monitoramento de ambientes ou edificações reais (como o realizado no EDEM), permitem avaliar detalhadamente o comportamento dinâmico do sistema edifício. A modelagem de PCMs acoplados à ventilação possibilita comparar estratégias de operação sob diferentes condições climáticas, viabilizando análises anuais de desempenho e a otimização de parâmetros como

taxas de ventilação, horários de operação e *setpoints* de temperatura, validados pelos dados monitorados *in loco* (Marin et al., 2016; Saffari et al., 2017).

Essa integração entre simulação computacional e monitoramento assegura a calibração precisa do modelo, permitindo quantificar o impacto dessas estratégias ou a combinação (modo alternado) no ciclo de carga/descarga dos PCMs e no balanço energético anual da edificação.

## 4.2 OBJETIVO

Avaliar o impacto do uso do Material de Mudança de Fase (PCM) integrado a diferentes tipos de ventilação natural noturna seletiva e ar-condicionado no desempenho termoenergético de um espaço de desempenho monitorado em Viçosa-MG.

## 4.3 METODOLOGIA OU MATERIAIS E MÉTODOS

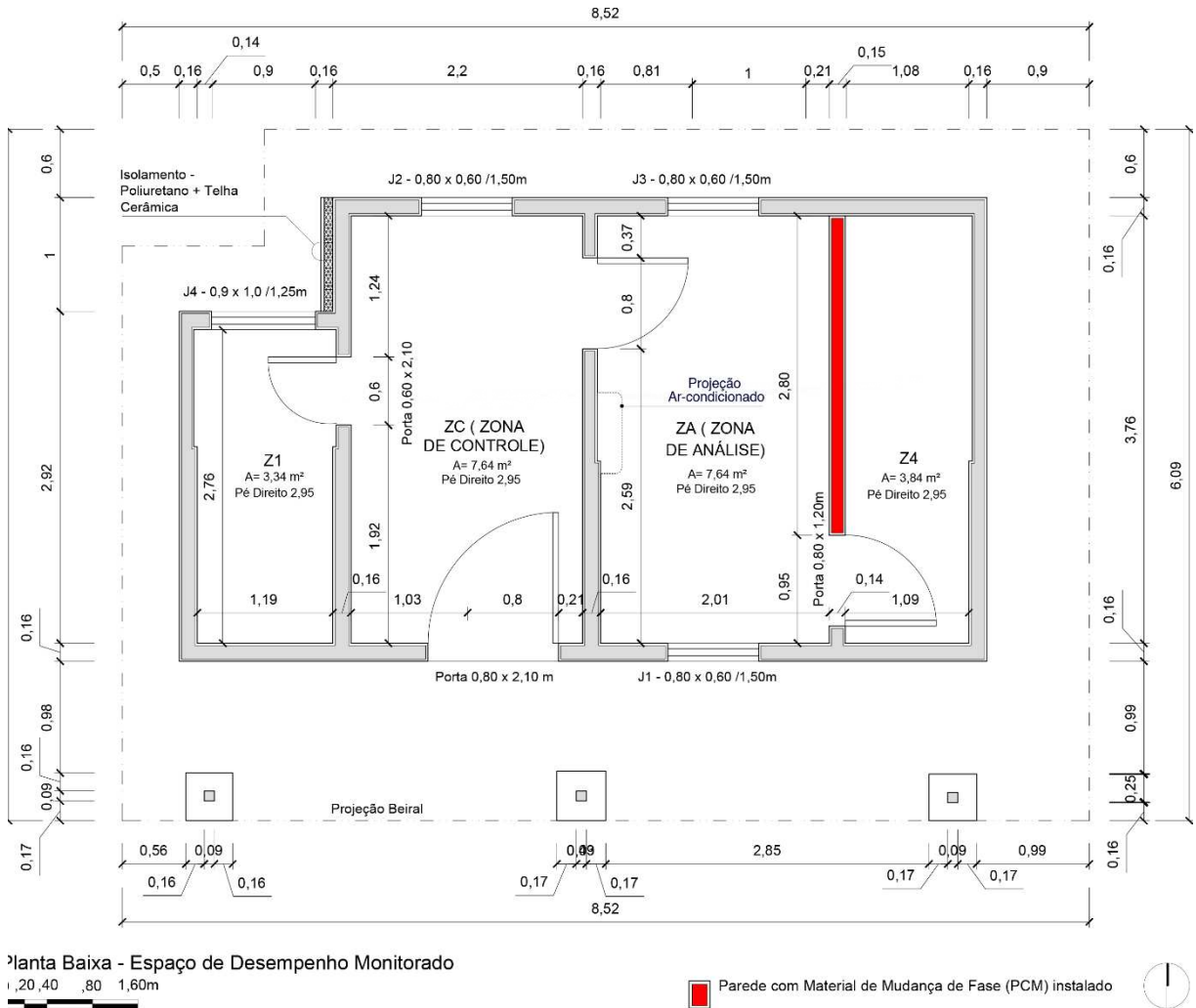
### 4.3.1 Monitoramento

O Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM) corresponde ao antigo escritório da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa (UFV), desativado desde a adoção da coleta automática dos dados climáticos em 2005. A edificação possui área aproximada de 24 m<sup>2</sup> (Figura 24), composta por quatro ambientes, com destaque para a Zona de Controle (ZC) e a Zona de Análise (ZA), definidas como zonas térmicas. O material de mudança de fase (PCM) e o ar-condicionado foi instalado exclusivamente na ZA.

O EDEM apresenta estrutura construtiva composta por alvenaria externa em blocos cerâmicos maciços e interna em blocos cerâmicos de seis furos, lajes de concreto pré-moldado e talhamento cerâmico; não conta com elementos de sombreamento no entorno, localizando-se próximo a estação meteorológica da UFV (20,75° S; 42,88° O), a aproximadamente 20 m dos equipamentos de medição. A fachada principal com janelas operáveis possui orientação norte exata (0°).

Para assegurar a uniformidade das condições experimentais, todas as aberturas dos ambientes foram completamente vedadas contra infiltrações de ar, os vidros receberam aplicação de película adesiva quase opaca para eliminar a influência da radiação solar direta, e a janela externa associada à parede adjacente do banheiro foi isolada termicamente com painéis de poliestireno expandido (EPS).

Figura 24 - Planta Esquemática EDEM



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O monitoramento experimental dos parâmetros climáticos e térmicos internos, incluindo temperatura superficial das paredes, velocidade do vento, temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura de globo foi realizado em dois períodos distintos com condições noturnas distintas conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Configurações do ambiente durante o período de monitoramento.

Período	Horário	Zona	Condições Ambientais
08/12 a 12/12	18h00 às 08h00	Zona de Análise	Sistema de ar-condicionado ligado para resfriamento (setpoint = 18°C)
		Zona de Controle	Não possui ar-condicionado; ambiente com esquadrias fechadas.
08/12 a 12/12	08h00 às 18h00	Zona de Análise e Zona de Controle	Sistema de ar-condicionado desligado; ambiente com esquadrias fechadas.

Período	Horário	Zona	Condições Ambientais
15/12 a 19/12	08h00 às 18h00	Zona de Análise e Zona de Controle	Sistema de ar-condicionado desligado; ambiente com esquadrias fechadas.
	18h00 às 08h00		Abertura manual das esquadrias para resfriamento natural.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os procedimentos adotados foram padronizados para a Zona de Controle (ZC) e a Zona de Análise (ZA). As medições foram registradas em intervalos de cinco minutos por meio de um *software* desenvolvido especificamente para esta finalidade, proporcionando automação e precisão no armazenamento dos dados experimentais. Todos os valores foram posteriormente convertidos para uma base horária para as etapas analíticas subsequentes. Com relação aos parâmetros climáticos externos, em virtude da proximidade com uma estação meteorológica optou-se por utilizar os dados oficiais do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Na Tabela 16 são apresentados os instrumentos utilizados para a obtenção dos dados monitorados.

Tabela 16 - Equipamentos utilizados para o monitoramento da edificação

Instrumento	Grandeza Medida	Quantidade	Posição de Instalação
Confortímetro	Sensor de temperatura de bulbo seco (TBU) (°C)	2	Centro da zona de análise; 1,30 m de altura e Centro da Zona de Análise; fixado em um tripé situado a 1,30 m de altura.
Termoresistor	Temperatura Superficial (°C)	4	Centro das paredes leste (interno/externo) e oeste (interno/externo); 1,30 m do chão. Colado com cola TPU (Poliuretano Termoplástico).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

#### 4.3.2 Simulação

Um modelo calibrado no *EnergyPlus* v.22 foi desenvolvido com base nos dados monitorados *in loco* no EDEM. As Zonas de Análise (ZA) e de Controle (ZC) foram avaliadas por meio de seis simulações sequenciais. Elas são:

- (1.1) Operação do sistema de ar-condicionado com *setpoint* de 18°C ativo entre 18:00h

e 08:00h, com desligamento durante o período diurno, e esquadrias fechadas 100% do tempo na Zona de Análise. Zona de Controle com esquadrias fechadas 100% do tempo e sem sistema de ar-condicionado, ambas sem ocupação e carga térmica; configuração fiel à experimental monitorada da Tabela 13, ela foi usada para a calibração.

- (1.2) Idêntica à simulação 1.1, exceto por um ar-condicionado na Zona de Controle, idêntico ao da Zona de Análise; usado para avaliação do desempenho dos ambientes com e sem PCM.
- (2) Ventilação natural noturna entre 18:00h e 08:00h, e esquadrias abertas das 08:00h às 18:00, replicando fielmente a configuração experimental monitorada da Tabela 13. Também foi executada sem ocupação e sem cargas elétricas para calibração, e tanto os resultados monitorados quanto os simulados foram usados para avaliação do desempenho dos ambientes com e sem PCM.
- (3) Similar à simulação 1.2, porém com incorporação de uma taxa de ocupação de 0,14 pessoa/m<sup>2</sup>, conforme o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C, INMETRO, 2010) para escritórios, e carga de iluminação de 18 W, correspondente à lâmpada tubular instalada. Utilizado para a avaliação do desempenho dos ambientes com e sem PCM com ocupação.
- (4) Similar à simulação 2, porém com carga térmica interna idêntica à simulação 3. Usado para avaliação do desempenho dos ambientes com e sem PCM com ocupação.
- (5) Integrou a ventilação natural seletiva diurna (esquadrias abertas quando Temperatura Externa > 26°C) alternada com condicionamento de ar noturno quando a Temperatura Externa > 21°C e a Temperatura Interna > 19°C) mantendo *setpoint* de 18°C, para ambas as zonas. Ao contrário das simulações 1.1 e 1.2, que adotaram um *setpoint* de 18 °C para garantir a solidificação do PCM, optou-se por um *setpoint* de 18 °C, temperatura indicada por Oliveira et al. (2025) como o mínimo necessário para ambientes com PCM com temperatura de mudança de fase de 21 °C.
- As cargas térmicas adotadas foram similares a simulação 4 e 5. A simulação foi usada para avaliação do desempenho dos ambientes com e sem PCM com ocupação.

Na simulação 1 e simulação 3, inseriu-se um ar-condicionado do tipo bomba de calor (*Pumped Thermal Heat Pump - PTHP*) no mesmo intervalo entre 18:00h e 08:00. Um *template* de bomba de calor com serpentina de resfriamento, serpentina de aquecimento ar-ar, e misturador de ar exterior, apresenta configuração equivalente a um sistema tipo *split*. As taxas

de vazão de ar (0,168 m<sup>3</sup>/s) e a capacidade de resfriamento e aquecimento de 12000 BTU/h (3514,8 W) foram especificadas manualmente, com base em equipamentos similares ao previsto para instalação no ambiente (EnergyPlus, 2022).

Na simulação 2 e simulação 4, adotou-se ventilação natural modelada pelo *AirflowNetwork* para 100% das horas do ano, com operação das esquadrias programada para o mesmo intervalo de horas. Na Simulação 5, adotou-se uma ventilação alternada dos dois sistemas, utilizando o *AirflowNetwork*, que permite a abertura das esquadrias durante o período diurno em função da temperatura, e uma bomba de calor (PTHP) durante a noite, conforme sintetizado na Tabela 17.

Tabela 17 - Condições ambientais internas das simulações.

<b>Simulação</b>	<b>Período</b>	<b>Horário</b>	<b>Condição de Ventilação</b>	<b>Ocupação e Carga de Iluminação</b>
1.1	07/12 a 13/12	18h00 às 08h00 08h00 às 18h00	Sistema de ar-condicionado ligado para resfriamento (ZA) – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado (ZA e ZC). Sistema de ar-condicionado desligado – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado (ZA e ZC).	Não
1.2	07/12 a 13/12	18h00 às 08h00 08h00 às 18h00	Sistema de ar-condicionado ligado para resfriamento (ZA E ZC) – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado. Sistema de ar-condicionado desligado – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado (ZA e ZC).	Não
2	14/12 a 20/12	08h00 às 18h00 18h00 às 08h00	Sistema de ar-condicionado desligado; ambiente fechado (ZA E ZC). Abertura das esquadrias para resfriamento natural fechado (ZA E ZC).	Não
3	01/01 a 31/12	18h00 às 08h00 08h00 às 18h00	Sistema de ar-condicionado ligado para resfriamento (ZA E ZC) – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado. Sistema de ar-condicionado desligado – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado (ZA e ZC).	Sim
4	01/01 a 31/12	18h00 às 08h00 08h00 às 18h00	Sistema de ar-condicionado desligado; abertura das esquadrias para resfriamento natural (ZA E ZC).; Sistema de ar-condicionado desligado; ambiente fechado (ZA E ZC).	Sim
5	01/01 a 31/12	18h00 às 08h00 08h00 às 18h00	Sistema de ar-condicionado ligado para resfriamento (ZA e ZC) se a Temp. Externa > 21°C e a Temp. Interna > 18°C – <i>Setpoint</i> 18°C; ambiente fechado. Sistema de ar-condicionado desligado; Abertura das esquadrias para resfriamento natural (ZA e ZC) - Temperatura > 26°C	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As simulações utilizaram o arquivo climático VicosabRA\_ AMY\_ 2025.epw, elaborado a partir de dados do INMET referentes ao ano de 2025 para Viçosa (- 20,754°; - 42,882°; 649m) (Lateca, 2025). Os dados de saída foram referentes às cargas térmicas, temperaturas internas do ar e superficial das paredes. A simulação dos PCMs adotou o método das diferenças finitas (ConFD), considerando a mudança de fase e as informações do fabricante.

A geometria da edificação, os materiais e as condições de contorno empregados na simulação são compatíveis com aqueles estabelecidos durante a caracterização física do espaço. Os componentes construtivos e as respectivas propriedades utilizadas para a simulação encontram-se descritos nas Tabelas 18 e 19. As propriedades térmicas dos materiais, como absorvância solar, emissividade de ondas longas, condutividade térmica, calor específico e massa específica, foram obtidas conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 18 – Propriedades térmicas dos componentes adotados na simulação.

<b>Componentes</b>		<b>Valores</b>	<b>Composição</b>
Parede Externa – Sem PCM e Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	4,00[W/(m²K)]	Argamassa (2,5 cm) / Bloco cerâmico maciço / Argamassa (2 cm) / Pintura externa (α)
	Capacidade Térmica	224,64 [kJ/m²K]	
Parede Externa – Sem PCM e com Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	1,32 [W/(m²K)]	Argamassa (2,5 cm) / Bloco cerâmico maciço (9×14×24) / Argamassa (2,5 cm) / EPS (2mm) / Telha Fibrocimento
	Capacidade Térmica	235,54 [kJ/m²K]	
Parede Interna – Com PCM	Transmitância Térmica	2,09 [W/(m²K)]	ACM (2mm) / PCM (2 cm) / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24) / Câmara de Ar / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24)
	Capacidade Térmica	150,80 [kJ/m²K]	
Parede Interna – Sem PCM e com Isolamento Térmico	Transmitância Térmica	1,05 [W/(m²K)]	ACM (2mm) / EPS (2 cm) / Bloco Cerâmico 6 furos (9×14×24) / Câmara de Ar (9×14×24)
	Capacidade Térmica	120,70 [kJ/m²K]	
Piso	Transmitância Térmica	3,73 [W/(m²K)]	Laje maciça (10 cm)
	Capacidade Térmica	220 [kJ/m²K]	
Laje/Cobertura	Transmitância Térmica	2,05 [W/(m²K)]	Laje maciça / Câmara de ar (>5,0cm) / Telha Cerâmica
	Capacidade Térmica	238 [kJ/m²K]	
Absortância das Paredes (α)		29,70	Branco Gelo (Acrílico Fosco)
Absortância da Cobertura (α)		69,60	Telha (Acrílico Fosco)

Fonte: Adaptado pelo autor da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Tabela 19 - Propriedades térmicas dos materiais adotados na simulação.

PROPRIEDADE	MATERIAL					
	EPS	Tijolo Maciço 9x9x14	Telha de Fibrocimento	Bloco Cerâmico sem revestimento 9x9x14	Bloco Cerâmico 9x9x14	Argamassa
Espessura (m)	0,00258	0,14000	0,00800	0,01400	0,01340	0,02500
Condutividade (W/ (m.K)	0,035	0,720	0,950	0,900	0,900	1,150
Densidade (kg/m³)	30	1800	1900	1600	1600	2000
Calor específico (J/kg. K)	1420	840	840	920	920	1000
Abs. Térmica	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Abs. Solar	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,30

PROPRIEDADE	MATERIAL				
	Laje de Concreto	PCM_RT21 HC	Telha Cerâmica	Chapa de Madeira	Chapa de Aço
Espessura (m)	0,100	0,020	0,010	0,030	0,010
Condutividade (W/ (m.K)	1,75	0,20	1,05	0,15	35,00
Densidade (kg/m³)	2000	825	2000	608	7823
Calor específico (J/kg. K)	900	2000	920	1630	500
Abs. Térmica	0,90	0,90	0,90	0,90	0,75
Abs. Solar	0,50	0,50	0,7	0,70	0,65

PROPRIEDADE	MATERIAL	
	Câmara de Ar Cobertura	Câmara de Bloco Cerâmico sem revestimento (9x9x14)
Resistência Térmica [m²K/W]	0,430	0,175

Fonte: Adaptado pelo autor da NBR 15220 (ABNT, 2005).

#### 4.3.3 Análise e Comparação dos Resultados

A validação térmica no EnergyPlus foi conduzida a partir da abordagem proposta por Souza (2024), fundamentada na ASHRAE Guideline 14 (2023), com o objetivo de verificar a acurácia e a tendência do modelo frente aos dados monitorados. Embora originalmente destinada à avaliação de consumo de energia e água, a diretriz foi adaptada para a calibração de

temperatura, adotando-se como critérios os limites de NMBE ( $\pm 10\%$ ) e CV(RMSE) ( $\leq 30\%$ ). Esses indicadores representam erros relativos em relação às médias observadas e podem ser aplicados a diferentes variáveis físicas. O ajuste do modelo foi realizado de forma iterativa, com base em medições in loco de temperatura do ar e de superfícies, até que os desvios se mantivessem dentro dos limites estabelecidos, em consonância com práticas consolidadas na literatura sobre desempenho termoenergético e ventilação (Lamberts et al., 2010; O'Donovan; O'Sullivan; Murphy, 2019; Souza, 2024). O primeiro deles é o Erro Médio Mensal (*Mean Bias Error* – MBE) (Equação 8), que quantifica a tendência geral do modelo, permitindo identificar se há superestimação (valores positivos) ou subestimação (valores negativos) quando comparado aos dados medidos. Para dados horários, a diretriz estabelece como aceitável um MBE dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ .

Equação (8)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{n}$$

Onde:

$S_i$  = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$\bar{M}$  = média dos valores medidos

$n$  = número de pontos de dados

O segundo indicador é o Erro Médio Normalizado (*Normalized Mean Bias Error* – NMBE) (Equação 9), que corresponde à versão normalizada do MBE e descreve a tendência do modelo de forma relativa à média dos valores medidos. No caso de séries horárias, a ASHRAE (2023) recomenda que o NMBE apresente valores absolutos inferiores ou iguais a 5%.

Equação (9)

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{(n - 1), \bar{M}} \times 100$$

Onde:

$S_i$  = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$\bar{M}$  = média dos valores medidos

$n$  = número de pontos de dados

Em seguida, utiliza-se o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) (Equação 10) que expressa a precisão global do modelo, penalizando de forma mais intensa os desvios mais expressivos entre os valores simulados e observados.

Equação (10)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}$$

Onde:

$S_i$  = valor simulado

$M_i$  = valor medido  $n$  = número de observações

$n$  = número de pontos de dados

Por fim, inclui o Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* – CV(RMSE) (Equação 11), que expressa o erro relativo à magnitude dos dados medidos, permitindo comparações entre diferentes conjuntos de dados ou locais de estudo. Para a calibração com base em dados horários, a ASHRAE *Guideline* 14 (2023) recomenda que o CV(RMSE) não ultrapasse 30%. Esses quatro indicadores, considerados em conjunto, permitem avaliar de forma abrangente a aderência do modelo numérico aos dados monitorados e a adequação da calibração realizada.

Equação (11)

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{M}} \times 100$$

Onde:

RMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio

$\bar{M}$  = média dos valores medidos

Para verificar o efeito do material de mudança de fase (PCM) na Zona de Análise em relação à Zona de Controle (sem PCM), com as ventilações foram realizadas análises descritivas dos dados simulados e monitorados ao longo da série temporal estabelecida para condicionamento noturno (07/12/2025 a 13/12/2025) e ventilação noturna (13/12/2025 a 20/12/2025)

Adicionalmente, procedeu-se à análise da resposta térmica da edificação por meio do atraso térmico ( $\varphi$ ) e do coeficiente de amortecimento térmico ( $\mu$ ), conforme definidos pelas Equações 12 e 13. De acordo com Lajimi et al. (2025), a sensibilidade térmica de um edifício pode ser caracterizada por dois indicadores principais. O atraso térmico ( $\varphi$ ) corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o pico de temperatura externa e o respectivo máximo interno, sendo diretamente influenciado pela capacidade de inércia térmica da envoltória construtiva (Roriz, 1996). Essa relação é matematicamente expressa por:

Equação (12)

$$\varphi = t_{int,max} - t_{ext,max}$$

Onde:

$\varphi$  = Atraso Térmico

$t_{int}$  = temperatura interna

$t_{ext}$  = temperatura externa

max = máxima

O segundo fator é o Amortecimento Térmico ( $\mu$ ), que descreve como a relação entre as amplitudes das temperaturas máximas internas e externas, subtraída de 1. Esse coeficiente indica que, quanto maior o seu valor, maior é a capacidade de amortecimento (Roriz, 1996). Essa relação é dada por:

$$\mu = 1 - \frac{\Delta T_{int}}{\Delta T_{ext}} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

$\mu$  = Amortecimento Térmico

$\Delta t_{int}$  = Amplitude da temperatura interna

$\Delta t_{ext}$  = Amplitude da temperatura externa

Tais parâmetros foram analisados entre a parede com PCM da zona avaliada e a parede equivalente da zona de controle, a fim de identificar diferenças no comportamento térmico e na capacidade de amortecimento das oscilações de temperatura.

Por fim, adotou-se os graus-hora como indicadores para avaliar o desempenho térmico das edificações. Ele descreve a soma das diferenças  $\Delta T$  entre a temperatura interna que, nesse caso, é a operativa, e uma temperatura base pré-estabelecida.

Conforme Sorgato (2009), quando usados com temperaturas base com referência em temperaturas de conforto ou desconforto, tanto para resfriamento quanto para aquecimento, os GH representam o método preferencial para análise do desempenho térmico de edificações ventiladas naturalmente, pois permitem quantificar a resposta térmica da envoltória às variações climáticas ao longo do ano completo. Portanto, é um indicador de desempenho, e não de conforto, que é adequado para ambientes naturalmente ventilados.

Embora tenham sido amplamente adotados em edificações passivas no Brasil, os graus-hora também são também utilizados em estudos que avaliam sistemas alternados e com ar-condicionado, permitindo quantificar a carga térmica necessária para resfriamento ou aquecimento, como até mesmo o clima, como realizado pela ASHRAE Standard 90.1 (2007). Rosa et al. (2014) demonstraram que os Graus-Hora de Resfriamento (GHR) e de aquecimento (GHA.) apresentam correlação linear com a demanda energética em edificações, sendo o consumo para aquecimento diretamente proporcional ao GHR

(resfriamento), enquanto o consumo para resfriamento em climas de baixo GHA (aquecimento) é significativamente influenciado pela inércia térmica e radiação solar.

Os intervalos de conforto da temperatura operativa foram definidos com base nos critérios da ISO 7730 (2025). No período de inverno, associado às condições de aquecimento, adotou-se como faixa de conforto temperaturas operativas entre 18°C e 22°C. Para o período de verão, referente às condições de resfriamento, considerou-se temperaturas operativas entre 23°C e 26°C. Assim, definiu-se 26°C como temperatura base para o cálculo dos graus-hora de resfriamento e 18°C para os graus-hora de aquecimento. O cálculo foi realizado por meio das Equações 14 e 15.

Equação (14)

$$GHR = \sum_{h=1}^n (T_h - 26)$$

Equação (15)

$$GHA = \sum_{h=1}^n (18 - T_h)$$

Onde:

*GHR* são graus hora de resfriamento (°Ch);

*GHA* são graus hora de aquecimento (°Ch);

$T_h$  é a temperatura horária (°C).

Os graus-hora de resfriamento e aquecimento foram integrados ao longo do ano para as zonas térmicas analisadas nas Simulações 2, 4 e 5. Realizou-se também a estimativa dos graus-hora de aquecimento e resfriamento para análise comparativa do desempenho térmico dos diferentes modelos simulados. Quanto menor os graus-hora nos ambientes internos, melhor o desempenho térmico da edificação.

## 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.4.1 Simulação Comparada ao Monitoramento

As Tabelas 20, 21, 22 e 23 mostram as métricas de validação da simulação segundo os critérios da ASHRAE *Guideline 14* (2023).

Tabela 20 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA) - Simulação 1.1, Ar-condicionado noturno.

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,71 °C
CV(RMSE)	≤ 30%	0,88%
MBE		5,94 °C
NMBE	±10%	4,25%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 21 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZC) - Simulação 1.1, Ar-condicionado noturno.

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,65
CV(RMSE)	≤ 30%	2,44
MBE	±10%	5,32
NMBE		9,85

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 22 Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZA) - Simulação 2, Ventilação Natural Noturna

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,87
CV(RMSE)	≤ 30%	2,23
MBE	±10%	5,93
NMBE		9,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 23 - Métricas para a Temperatura Interna da Zona de Análise (ZC) - Simulação 2, Ventilação Natural Noturna

INDICADOR	Limite para dados horários	Métrica
RMSE	-	2,87
CV(RMSE)	≤ 30%	2,25
MBE	±10%	5,95
NMBE		9,71

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os resultados obtidos para todos os indicadores nas Tabelas 20, 21, 22 E 23 demonstram correspondência aceitável, conforme a ASHRAE *Guideline* 14 (2023), pois as métricas situam-se no limite ou abaixo dos requisitos estabelecidos para dados horários. Portanto, não foi necessária calibração adicional do modelo computacional.

Para as temperaturas internas da Zona de Análise (ZA) na Simulação 1.1 (ar-condicionado) (Tabela 20), os MBE = 5,94°C e NMBE = 4,25% indicam que o modelo apresenta desvio absoluto médio aceitável em relação às medições. De forma similar, os resultados da Zona de Controle (ZC) (Tabela 21) com MBE = 5,32°C e NMBE = 9,85% situam-

se dentro da faixa recomendada pela ASHRAE *Guideline* 14 (2023), revelando boa correspondência estatística.

Na Simulação 2 (Ventilação Noturna), a Zona de Análise (ZA) (Tabela 22) apresenta MBE = 5,93°C e NMBE = 9,52%, mantendo a precisão do modelo. Já a Zona de Controle (ZC) (Tabela 23) exibe MBE = 5,895°C e NMBE = 9,71%, confirmando que o modelo também reproduz com fidedignidade o comportamento térmico sob regime de ventilação natural noturna.

Observa-se em ambas as simulações, porém, um viés sistemático positivo nestes resultados, com superestimação da temperatura na ordem de 6°C. Essa limitação pode estar associada à sazonalidade do período de monitoramento; contudo, não invalida a análise global, nem impede que o modelo atenda ao objetivo de validação proposto, visto haver temperaturas mais baixas provocadas artificialmente para observar o desempenho nas condições mais próximas ao inverno.

Os valores de CV (RMSE) encontrados para a temperatura interna (0,88 a 2,25°C) demonstram excelente concordância entre dados simulados e monitorados. Essa magnitude de erro é consistente com estudos similares de validação térmica em edificações e está dentro dos critérios aceitos pela comunidade científica de conforto térmico, validando a confiabilidade do modelo *EnergyPlus* para predição do comportamento térmico do EDEM. Assim, esses resultados sugerem que o modelo calibrado possui confiabilidade para simular diferentes cenários operacionais, incluindo estratégias alternadas de ventilação.

#### 4.4.2 Avaliação: Zona de Controle (ZC) x Zona de Análise (ZA)

A análise apresentada nas Figuras 25 e 26 mostrou o comportamento das temperaturas internas e externas ao longo do período de monitoramento e simulação. Como somente o modo de condicionamento com ventilação noturna foi monitorado nas duas zonas, a Figura 25 apresenta os dados monitorados e simulados sem condicionamento (simulação 2). Em contrapartida, a validação da simulação 1.1 permitiu inserir um ar-condicionado na Zona de Controle (ZC) sem PCM e comparar o desempenho do PCM por simulação com a Zona de Análise (ZA). Assim, a Figura 26 mostra o desempenho do PCM simulado (simulação 1.2) em condições de resfriamento noturno com um ar-condicionado.

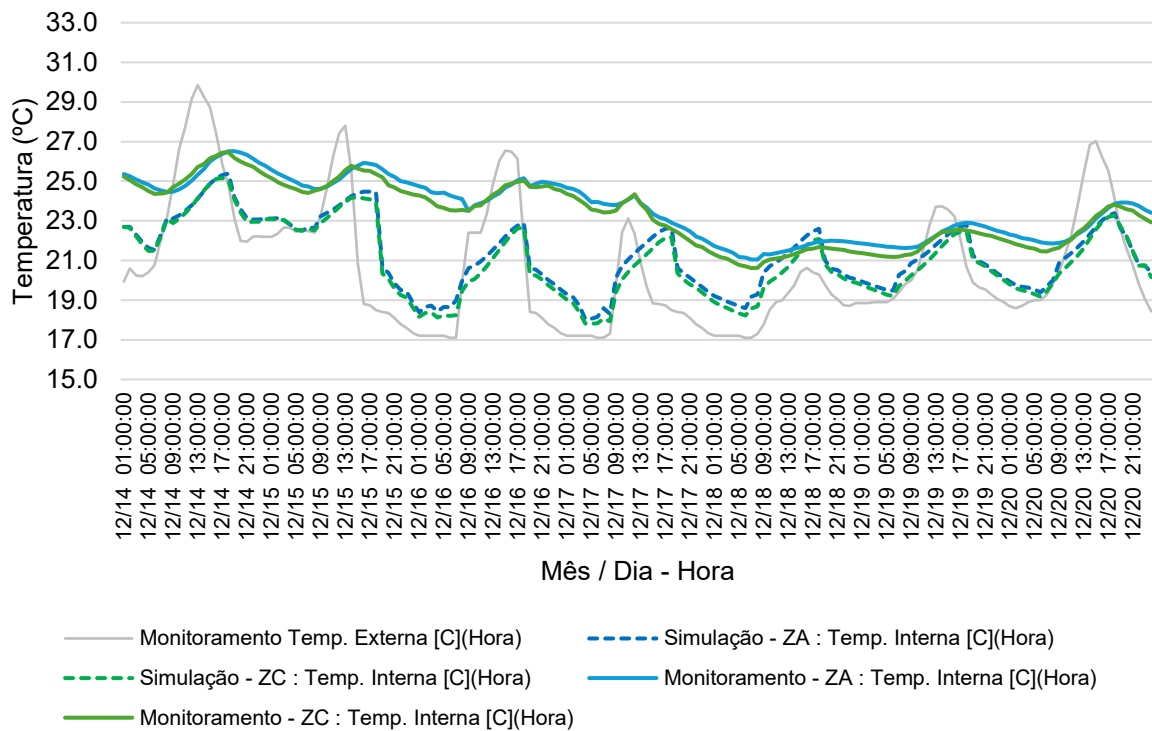
O período com monitoramento com ventilação noturna, simulação 2, foi composto de quatro dias com picos de temperaturas externas superiores a 25°C e três dias com temperaturas mínimas inferiores a 19°C, temperatura indicada por Oliveira et al (2025) como mínimo necessário para que um ambiente com PCM de temperatura de mudança de fase de 21°C, o usado no EDEM, tenha um desempenho sensível às condições meteorológicas. Ainda, houve

um dia, 18/12, com pequenas amplitudes.

As temperaturas internas da Zona de Análise apresentaram, em média, uma diferença de 2,6 °C inferiores às externas no monitoramento, e 2,1°C na simulação. Lembra-se que as temperaturas externas são pertencentes aos dados medidos na estação e, portanto, dados de entrada da simulação.

O monitoramento com ventilação noturna da Figura 25 apresentou uma menor flutuação das temperaturas internas na Zona de Análise (ZA), com amplitude média de 1,9°C, em relação à Zona de Controle (ZC), de 2,1°C.

Figura 25 - Temperatura externa e internas da Zona de Análise (ZA) e da Zona de Controle (ZC), simuladas e monitoradas com ventilação noturna – simulação 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Apesar das diferenças, os picos de temperatura diurnos da ZA com PCM estão próximos aos registrados na ZC. Observa-se um pequeno atraso térmico da ZA no monitoramento quando suas temperaturas decrescem, enquanto o atraso é mais perceptível nas simulações tanto durante aumentos quanto nos decréscimos de temperatura do ar. A maior diferença foi observada em 18/12, quando ocorreu o mais baixo pico de temperatura interna do período (20,6 °C), tendo a ZC apresentado 21,8 °C e a ZA, 22,3 °C, uma diferença de 0,5 °C. Nesse momento, o PCM liberava calor latente para o ambiente, que apresentava temperaturas externas mais baixas. Ou seja, a ventilação noturna em condições de verão não garantiu temperaturas suficientemente baixas para que o PCM completasse a mudança de fase,

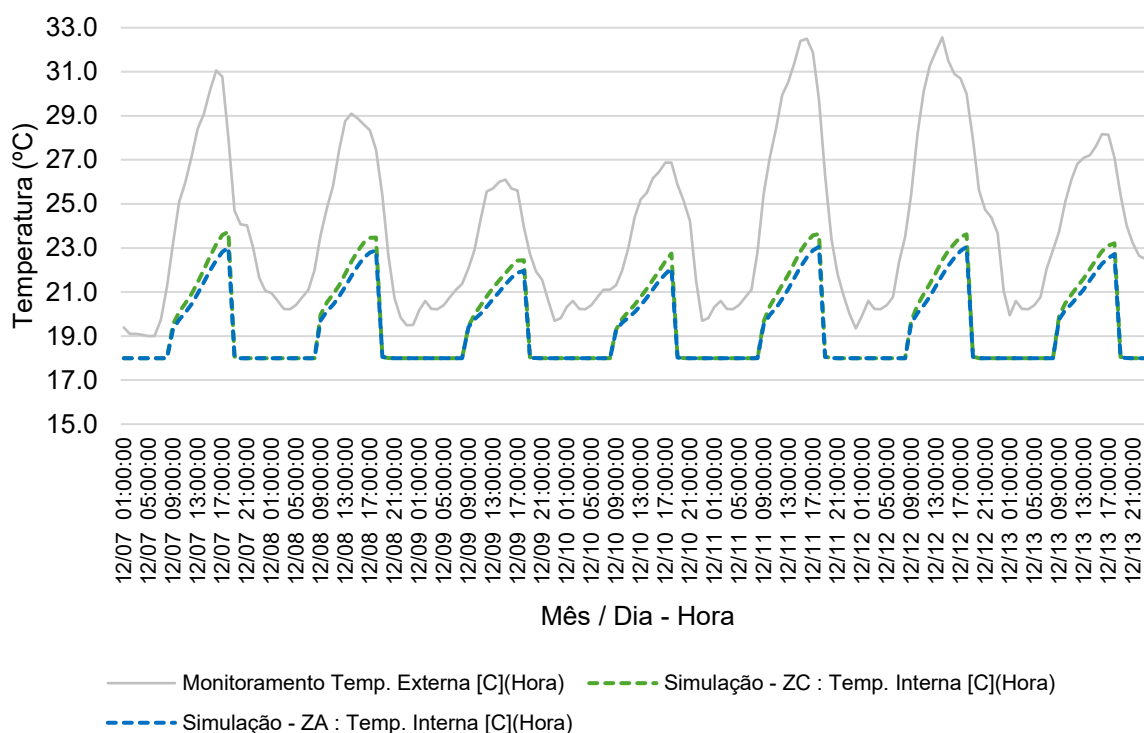
solidificando-se totalmente. Portanto, não foi capaz de garantir um bom desempenho para o ambiente que, nesse caso, requeria resfriamento.

Contudo, observa-se que, mesmo com temperaturas mais elevadas, a ventilação noturna alternada com o PCM possibilitou o deslocamento do pico térmico interno em relação ao pico externo em todos os dias analisados.

Quanto às simulações, embora as curvas de temperatura tenham perfis distintos ao monitorado, elas ainda estão dentro das diferenças indicadas no item anterior, que permite sua validação. Acredita-se que o *EnergyPlus* esteja majorando os efeitos da ventilação natural estimada pelo *AirFlowNetwork*. Para estes casos, ainda, as simulações também apresentaram atrasos semelhante ao monitorado.

Em relação a simulação 1.2, com ar-condicionado noturno (7 a 13 de dezembro) (Figura 26), a Zona de Análise (ZA) com PCM e ar-condicionado apresentou temperaturas menores que a Zona de Controle (ZC), também com ar-condicionado durante o período noturno.

Figura 26 - Temperatura externa e internas da Zona de Controle (ZC) e da Zona de Análise (ZA) simuladas com ar-condicionado noturno, simulação 1.2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

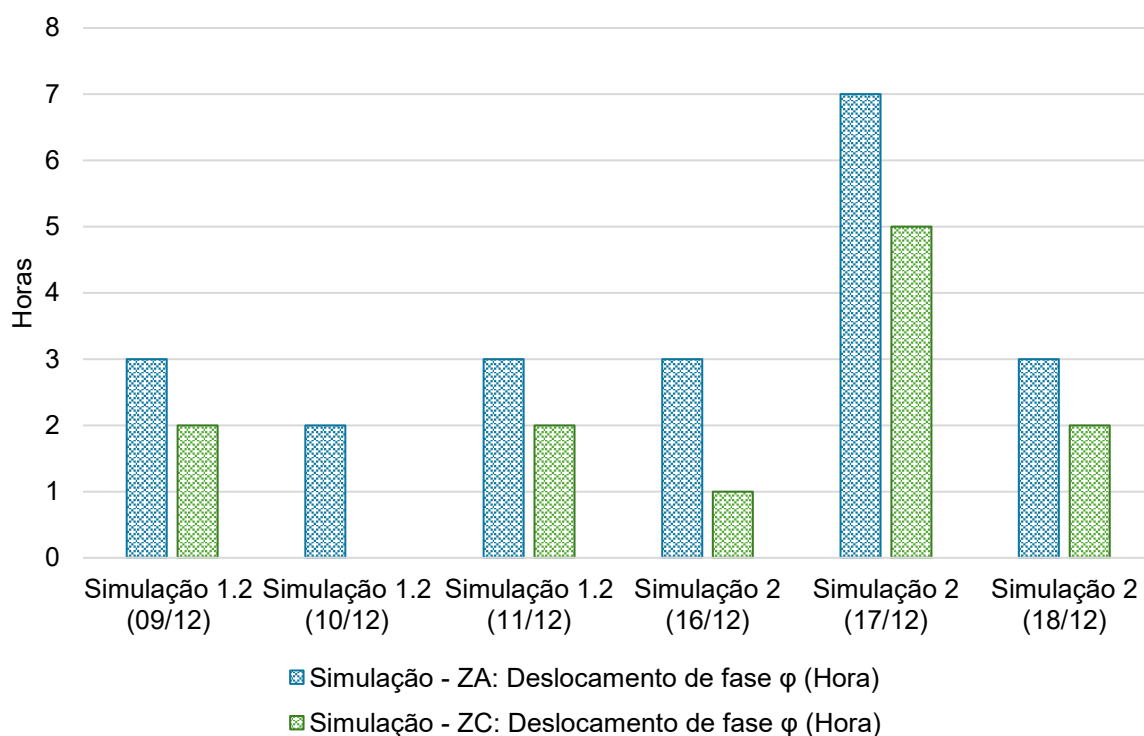
A temperatura interna da ZA apresentou, em média, uma diferença de 4,6°C inferior às externas, e 4,4°C na ZC. Essa diferença reflete diretamente na menor capacidade da ZC de atenuação dos picos de temperatura externa em relação à ZA. No dia 12/12, enquanto a temperatura externa atingiu o pico de 32,6°C na semana, a ZC teve pico de 22,4°C enquanto

a ZA obteve 21,7°C, uma diferença de quase 0,7°C entre elas.

No verão, as temperaturas mínimas externas não atingem valores suficientemente baixos para promover a descarga térmica do PCM por ventilação natural noturna. Nesse contexto, o uso de ar-condicionado, mantendo a temperatura interna em torno de 18 °C, viabiliza a descarga do material por convecção, promovendo sua solidificação ao transferir o calor armazenado para o ambiente interno condicionado. Durante o período diurno, o PCM absorve calor do ambiente na forma de calor latente, ao passar do estado sólido para o líquido, contribuindo para a estabilização da temperatura interna e a redução dos picos térmicos.

Também se avaliou a capacidade de atenuação do deslocamento de fase entre as zonas, para analisar as diferenças entre os dois tipos de ventilação simuladas (Figura 27).

Figura 27 - Atraso térmico médio de três dias representativos para Simulação 1.2 (ar-condicionado) e Simulação 2 (ventilação natural noturna)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

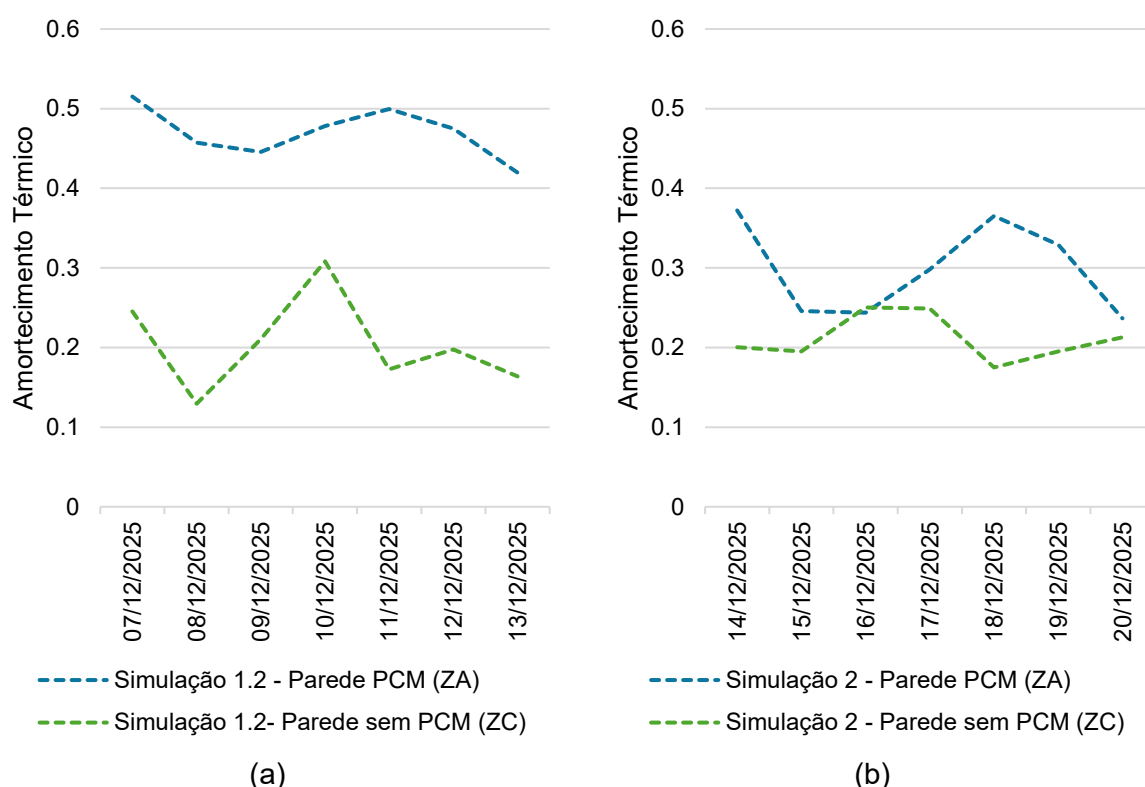
De modo geral, a Zona de Análise (ZA) apresentou desempenho superior ao da Zona de Controle (ZC), com deslocamentos em média 50% maiores em ambas as simulações. Em alguns dias, a ZC chegou a não registrar horas com inércia térmica, como no dia 10/12. Sendo assim, com as mesmas condições de ventilação, o PCM implementado na ZA impactou diretamente o atraso térmico interno em relação à externa.

Em relação à diferença entre as simulações, a ZA da simulação 2, com ventilação natural

noturna, obteve atrasos 65% maiores do que a ZA da simulação 1.1, com ar-condicionado noturno. Isso significa que, como observado na Figura 26, o potencial do modo alternado com o PCM no deslocamento do pico térmico interno em relação ao pico externo foi maior em todos os dias analisados, superando a combinação com ar-condicionado.

No entanto, ao comparar os cenários, observa-se que, para a Zona de Análise, apesar de a Simulação 1 (HVAC) apresentar um menor atraso térmico em relação à Simulação 2 (Ventilação Noturna), o seu coeficiente de amortecimento térmico foi maior (Figuras 28 a e b).

Figura 28 - Amortecimento Térmico das Zonas de Controle e Análise observado por meio das temperaturas externas do ar para Simulação 1.2 (a) e Simulação 2 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No condicionamento noturno com ar-condicionado (Simulação 1.2 – Figura 28(a)), a parede com PCM na ZA exibiu amortecimento térmico ( $\mu$ ) consistentemente elevados ( $\approx 0,4-0,5$ ), superando os da ZC ( $\approx 0,15-0,3$ ) em todos os sete dias analisados, com diferença média de 50%. Essa superioridade reforça a capacidade do PCM em atenuar as amplitudes térmicas internas.

Na ventilação noturna (Simulação 2 – Figura 28(b)), a ZA com PCM apresentou  $\mu$  positivo e geralmente superior ( $\approx 0,35-2,5$ ), com pico em 18/12 ( $\approx 0,35$ ), embora com diferenças menores em relação à ZC sem PCM ( $\approx 2,0-2,5$ ), resultando em variação média de 33%. Exceção ocorreu em 16/12, quando a ZC ( $\mu \approx 2,5$ ) superou a ZA ( $\mu \approx 2,4$ ), único dia nesse

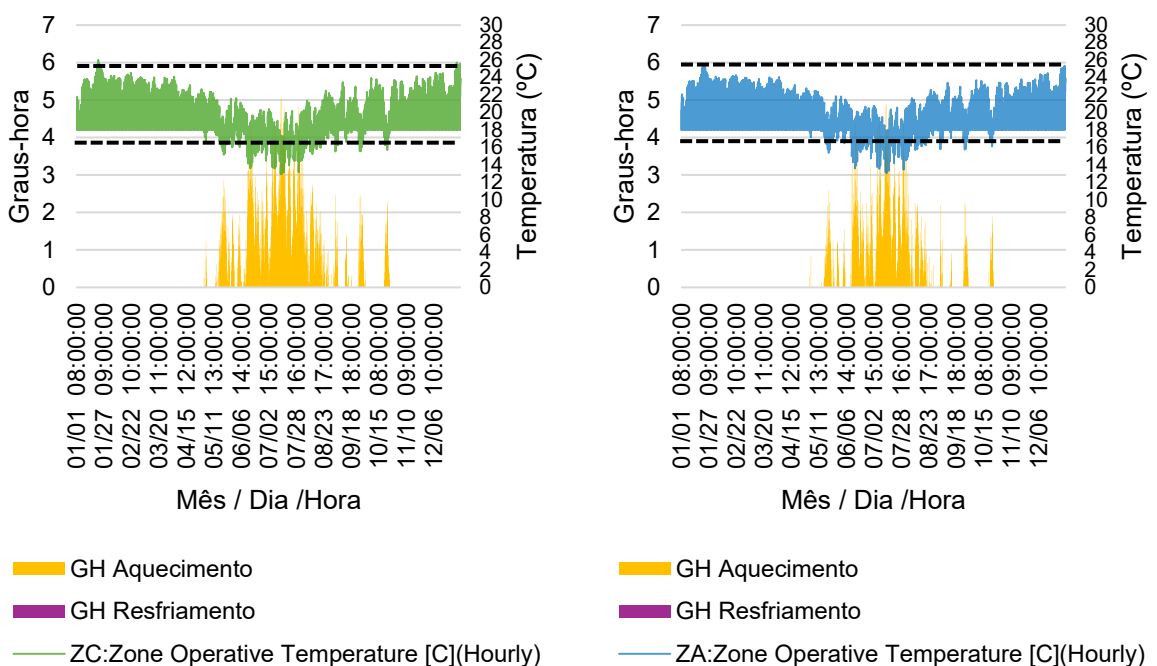
padrão em ambas as simulações. Nos demais dias, o PCM atenuou as amplitudes térmicas, ainda que em menor escala que na Simulação 1.2, que, apesar de atrasos 65% menores, garantiu maior estabilidade no amortecimento.

#### 4.4.3 Simulações com ocupação e com condicionamento combinado (ventilação natural)

Para avaliar o desempenho térmico dos ambientes com e sem PCM nas zonas ZA e ZC, foram analisadas as temperaturas operativas obtidas nas Simulações 3 (ar-condicionado noturno), 4 (ventilação natural noturna) e 5 (modo alternado), apresentadas nas Figuras 29 a 31. As análises consideraram o período de uso diurno, das 8h00 às 18h00, ou seja, 50% das horas do ano que mostram os reflexos da noite. Essa abordagem permitiu isolar os efeitos das estratégias de ventilação natural noturna e condicionamento noturno e avaliar seu impacto sobre as condições térmicas durante o período de ocupação.

Na Simulação 3 (Figura 29), ambas as zonas térmicas (ZC e ZA) mostram desempenho satisfatório nos meses mais quentes, uma vez que a temperatura operativa raramente ultrapassa o limite superior de 26 °C no período. Essa condição resulta em demanda praticamente nula de resfriamento com ar-condicionado (colunas roxas) durante o dia, pois o ambiente é regulado por baixas temperaturas provenientes do exterior.

Figura 29 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 3 (ar-condicionado com carga interna) para as zonas (a) ZC e (b) ZA

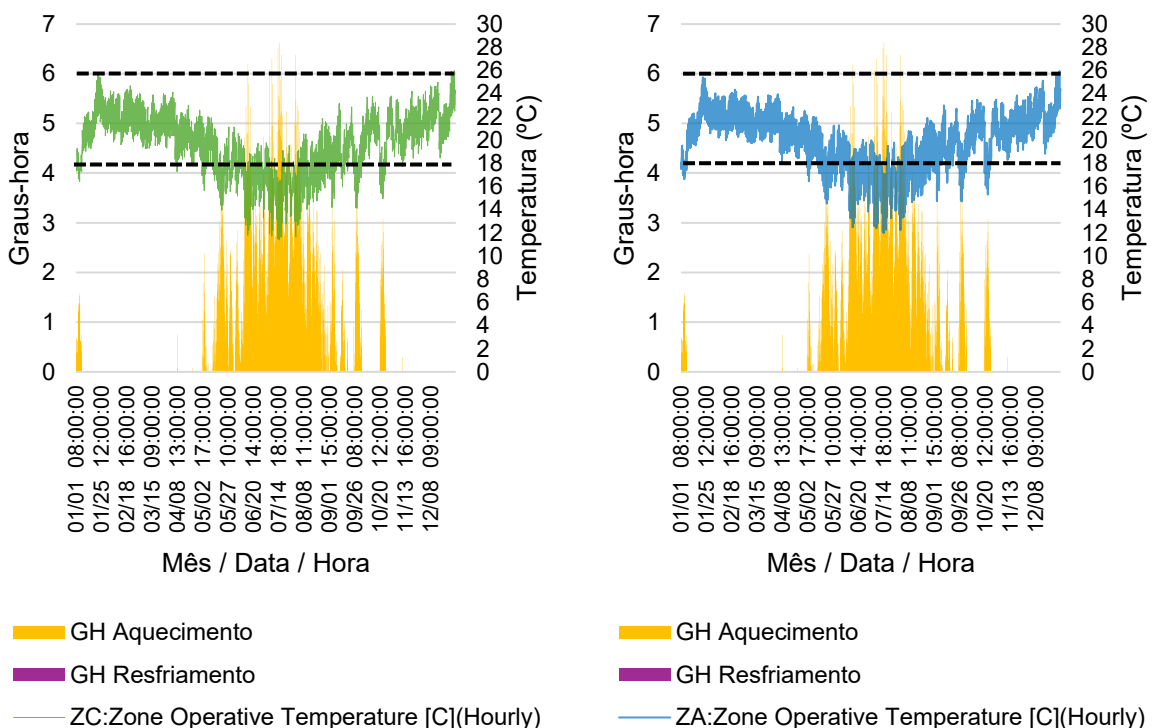


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Contudo, como no período de inverno (junho a agosto) a temperatura operativa frequentemente se mantém abaixo do limite inferior de 18 °C, não há necessidade de descarga térmica por meios artificiais. Isso se confirma com os graus-hora que, nesse caso, não são uma demanda de aquecimento, mas representam os momentos e potenciais em que a descarga térmica é natural, mesmo durante o dia.

Na Simulação 4 (Figura 30), os resultados indicam que ambas as zonas térmicas (ZC e ZA) apresentam desempenho satisfatório durante os meses mais quentes, uma vez que a temperatura operativa também não ultrapassa 26 °C. Essa condição resulta em demanda nula por resfriamento artificial, assim como resulta em amplitudes térmicas semelhantes entre as duas zonas. Em comparação com a Simulação 3, constata-se menor capacidade de amortecimento térmico interno, além de maiores Graus-Hora de Aquecimento durante os meses mais frios, devido às baixas temperaturas do ar que entram por ventilação no ambiente, visto que elas podem atingir menos que o *setpoint* de 19°C do ar-condicionado noturno da Simulação 3. Entretanto, embora as mínimas diárias do período quente estejam dentro da zona de conforto, elas não são tão baixas quanto as da Simulação 3 devido ao ar-condicionado que permaneceu ligado durante a noite, refrescando mais as horas da manhã, por exemplo.

Figura 30 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 4 (ventilação natural noturna com carga interna) para as zonas (a) ZC e (b) ZA



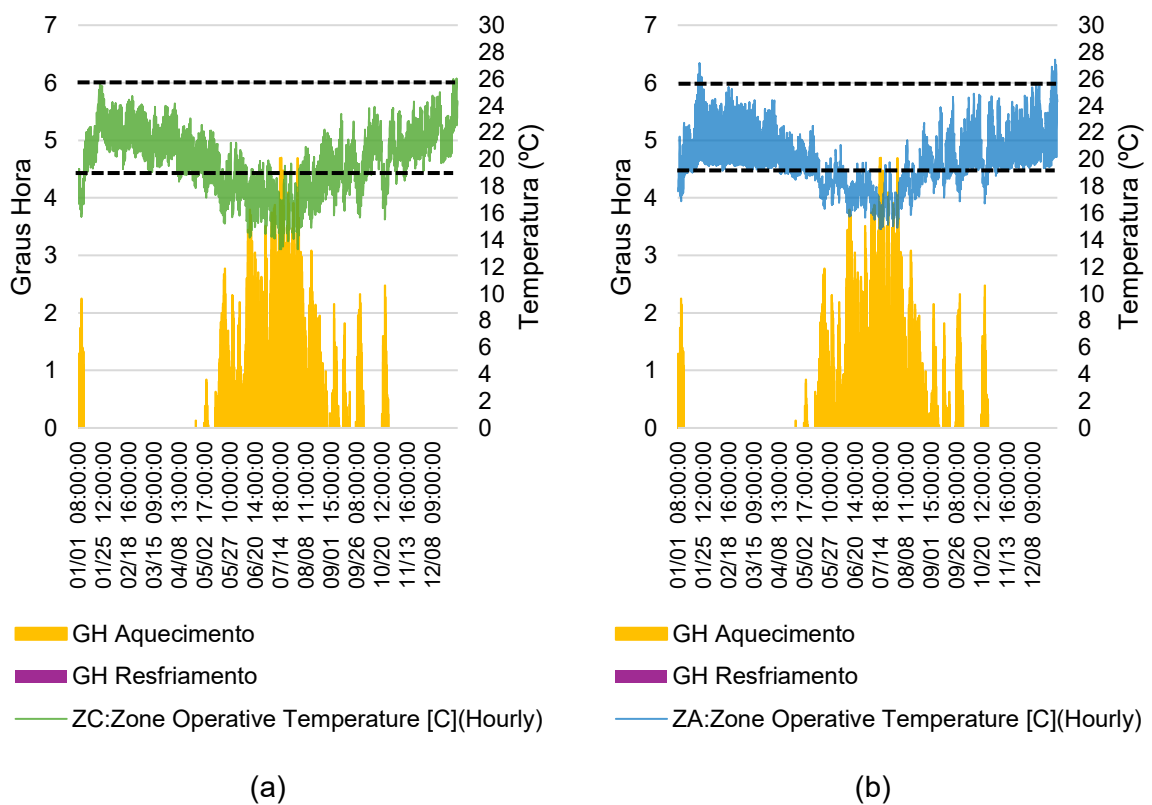
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Simulação 5 (modo alternado, Figura 31), verifica-se uma diferença mais pronunciada no comportamento térmico entre a ZC e a ZA, caracterizada por um menor número de horas de acionamento automático do ar-condicionado durante o período noturno. Entre os meses de janeiro a abril e outubro a dezembro, observa-se uma maior demanda pela utilização desse modo de condicionamento a fim de atenuar as temperaturas elevadas pelas condições externas, o que favorece o processo de solidificação do PCM. Assim, durante esses meses, as temperaturas mínimas diárias, especialmente nas horas matinais, foram inferiores na ZA em comparação com a ZC, ou seja, se as temperaturas externas são mais elevadas durante o dia e no início da noite, elas geram temperaturas operativas mais elevadas à noite nas duas zonas. No entanto, o PCM manteve as temperaturas mais elevadas na ZA em relação à ZC, gerando demanda para o ar-condicionado noturno que foi benéfica, pois resultou em temperaturas mais baixas, porém na zona de conforto, durante a manhã na ZA. Vale lembrar que este consumo ocorre em um momento em que a demanda de energia da rede de distribuição elétrica está baixa. Já a ZC foi mais condicionada naturalmente, com a abertura das janelas e, portanto, tem mínimas no período das 8h00 às 18h00 mais elevadas, o que pode ser indesejado para o padrão de uso de um escritório.

Figura 31 - Temperatura operativa horária e distribuição dos graus-hora de aquecimento e resfriamento ao longo do ano da Simulação 5 (ar-condicionado) para as zonas (a) ZC e (b) ZA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por outro lado, de maio a agosto, observam-se Graus-Hora de Aquecimento semelhantes aos obtidos na Simulação 3, justamente porque, nesse período, a temperatura operativa frequentemente se mantém abaixo do limite inferior de 18 °C, eliminando a necessidade de descarga térmica por meios artificiais. Novamente, os graus-hora, nessa condição, indicam não uma demanda térmica, mas os períodos e condições em que o processo de descarga de calor se dá de maneira natural mesmo durante o dia. Além disso, nota-se uma maior atenuação da flutuação da temperatura da ZA e ZC.

Por fim, realizou-se a análise dos Graus-Horas de Aquecimento e Resfriamento do ano completo para todas as simulações (Tabela 24

Tabela 24 - Graus-Hora (°C.h) das simulações 3 a 5 para as duas zonas térmicas

Simulação 3 (HVAC)		
Graus – Hora	Zona de Controle	Zona de Análise
Resfriamento	0	0
Aquecimento	970	680
Simulação 4 (Ventilação Noturna)		
Graus – Hora	Zona de Controle	Zona de Análise
Resfriamento	0	0
Aquecimento	1727	1354
Simulação 5 (Modo Alternado)		
Graus – Hora	Zona de Controle	Zona de Análise
Resfriamento	0	14
Aquecimento	1250	860

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Observa-se que, em todas as simulações, os Graus-Hora de Resfriamento são nulos. Esse resultado indica que, durante o período de ocupação diurno considerado (08:00–18:00 horas), as temperaturas operativas permaneceram abaixo da temperatura base, coincidente neste caso com o limite superior de conforto térmico. Portanto, houve demanda quase nula por resfriamento nas zonas ou estratégias avaliadas. Dessa forma, a análise concentra-se exclusivamente no comportamento térmico associado ao aquecimento.

Na Simulação 3 (ar-condicionado com adição de carga interna), os Graus-Hora de Aquecimento atingem 970 °C·h na Zona de Controle e 680 °C·h na Zona de Análise. A redução observada na ZA, em relação à ZC, indica melhor desempenho térmico dessa zona, associado à estabilidade térmica do PCM. Esse resultado evidencia que, sob controle exclusivo por ar-condicionado durante as noites, a ZA possui atenuação das flutuações de temperatura diurnas dentro da faixa de conforto estabelecida.

Na Simulação 4 (Ventilação Noturna), observa-se um aumento dos Graus-Hora de

Aquecimento em ambas as zonas, alcançando 1.727 °C·h na Zona de Controle e 1.354 °C·h na Zona de Análise. Esses valores mais elevados indicam que, isoladamente, a ventilação noturna não foi suficiente para manter as temperaturas operativas dentro da faixa de conforto durante o período diurno, resultando curiosamente em maior desconforto térmico por frio ao se abrir as janelas exclusivamente sob um critério de hora, e não de desempenho. Ainda assim, a ZA apresenta uma redução de aproximadamente 21,6% nos GHA em relação à ZC, o que reforça o papel do PCM na atenuação das oscilações térmicas e na redução das perdas de calor acumuladas.

Na Simulação 5 (modo alternado), que combina ar-condicionado noturno e ventilação seletiva diurna, observa-se uma melhoria do desempenho térmico da Zona de Análise semelhante à Simulação 3.

Os Graus-Hora de Aquecimento são reduzidos para 1.250 °C·h na ZC e 860 °C·h na ZA, uma redução de aproximadamente 31% na ZA. Embora fatores econômicos não integrem o escopo desta pesquisa, essa estratégia alternada permite utilizar o ar-condicionado nos horários em que a energia pode ser mais barata, como em edificações atendidas por alta tensão. O PCM ajuda a manter a estabilidade térmica do ambiente a ponto de viabilizar a ventilação diurna para conforto nos horários de ocupação.

Ainda, a ZA apresentou graus-hora de aquecimento mais baixos em todas as simulações, com reduções da ordem de 29,9% (Simulação 3), 22% (Simulação 4) e 31% (Simulação 5) em relação à Zona de Controle. Esses resultados confirmam quantitativamente o melhor desempenho térmico das paredes com PCM, independentemente da estratégia de controle adotada.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo mostrou os efeitos da integração de Materiais de Mudança de Fase (PCM) a regimes de ventilação natural noturna, com ar-condicionado e modo alternado no Espaço de Desempenho Monitorado (EDEM), localizado em Viçosa-MG, e como pode potencializar a eficiência térmica da envoltória edificada. Foram registradas reduções de até 31% nos graus-hora de aquecimento na zona com PCM em relação à zona de controle nas simulações anuais, considerando um condicionamento alternado (ar-condicionado e natural). Por meio de modelagem calibrada no *EnergyPlus* v.22, validada contra dados monitorados in loco conforme os critérios da ASHRAE *Guideline* 14, com CV(RMSE) entre -0,88% e 2,25% (inferior ao limite de 30%) e NMBE dentro de ±10%, evidenciou-se que o PCM atenua amplitudes térmicas e promove atrasos térmicos médios de 3 horas.

Observa-se que, para a Zona de Análise, apesar de a Simulação 1 (ar-condicionado) ter

apresentado menos horas de atraso em relação à Simulação 2 (ventilação noturna), o coeficiente de amortecimento foi maior no primeiro caso, destacando a superioridade do condicionamento mecânico na estabilização térmica. Os casos com condicionamento noturno (Simulação 3) revelaram-se os mais eficazes, registrando 680 °C·h de graus-hora de aquecimento na Zona de Análise contra 970 °C·h na Zona de Controle. Esses resultados ressaltam o papel do PCM na inércia térmica, manifestado por coeficientes de amortecimento superiores na zona com o material ( $\mu \approx 0,4-0,5$  contra 0,15–0,3 na zona de controle), especialmente sob condicionamento noturno ativo, que favorece a completa solidificação do material e maximiza a absorção de calor latente diurno.

Além disso, o potencial da ventilação noturna alternada com o PCM no deslocamento do pico térmico interno em relação ao pico externo foi maior em todos os dias analisados, alcançando um atraso térmico 65% superior ao obtido apenas com ar-condicionado, superando assim a combinação exclusiva com condicionamento mecânico. Os resultados indicam que o PCM atua como *buffer* térmico dinâmico, mitigando oscilações ambientais em climas da Zona Bioclimática 2M ao armazenar calor latente e reduzir a propagação de variações externas para o interior, conforme confirmado pela análise comparativa de temperaturas operativas e superficiais das paredes. Essa integração otimiza o desempenho energético de edifícios, diminuindo demandas de aquecimento em até 29,9% (de 970 para 680 °C·h sob condicionamento noturno) e elevando o conforto operativo. A estratégia alternada, combinando ventilação seletiva diurna (esquadrias abertas acima de 24 °C) e condicionamento noturno (*setpoint* de 19°C) somente quando necessário, demonstrou potencial para deslocar cargas para horários fora de pico, com uma diferença de 31% entre ZA e ZC, alinhando-se às demandas de eficiência em edifícios de escritórios brasileiros.

#### 4.1 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Com financiamento do projeto APQ-02622-23 – Criação do ERDEM, ambiente para ensaios e monitoramento do desempenho termoenergético do edifício e seus componentes, financiado pela Fapemig – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Também contou com apoio do projeto 406426/2022-8 – Tecnologias para Adaptação de Edificações às Mudanças no Clima: Eficiência Energética, Geração Fotovoltaica e Redução de Emissões em Escolas, financiado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e do Programa Iberoamericano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento – CYTED (através da Rede TRAPECIO).

#### 4.2 REFERÊNCIAS

AL-ABSI, Z. A.; MOHD HAFIZAL, M. I.; ISMAIL, M.; MARDIANA, A.; GHAZALI, A. Peak indoor air temperature reduction for buildings in hot-humid climate using phase change materials. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 22, p. 100762, 2020. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100762.

ALMEIDA, F.; BRANDALISE, M.; MIZGIER, M. Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, p. e022027, 2022. DOI: 10.20396/parc.v13i00.8666777.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Guideline 14-2023: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA: ASHRAE, 2023.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2007: energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. Atlanta, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2:2022 – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3:2024 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho.** Rio de Janeiro, 2024.

BAI, L.; XIE, J.; FARID, M. M.; WANG, W.; LIU, J. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, p. 106531, 2020. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106531.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C).** Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010. Brasília, DF: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2010. Disponível em: <[https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010\\_RTQ\\_Def\\_Edificacoes-C\\_rev01.pdf](https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf)>. Acesso em: janeiro de 2026.

BERARDI, U.; SOUDIAN, S. H. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 180–195, 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.12.016.

BRITO, A. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FARAJ, K.; KHALED, M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109579, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109579.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2025 – Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Geneva: ISO, 2025.

KUCZYŃSKI, T.; STASZCZUK, A. Experimental study of the thermal behavior of PCM and heavy building envelope structures during summer in a temperate climate. **Energy**, v. 279, p. 128033, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128033.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; DONALD PEREIRA, C.; BATISTA, J. O. (eds.). **Casa eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético.** Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. v. 4, 53 p. ISBN 978-85-7426-099-0.

LIU, L.; HAMMAMI, N.; BIGOT, D.; MALET-DAMOUR, B.; HABAS, J.-P. Multi-Scale Study of

a Phase Change Material on a Tropical Island for Evaluating Its Impact on Human Comfort in the Building Sector. **Materials**, v. 17, n. 13, p. 3241, 2024. DOI: 10.3390/ma17133241.

O'DONOVAN, A.; O' SULLIVAN, P. D.; MURPHY, M. D. Predicting air temperatures in a naturally ventilated nearly zero energy building: Calibration, validation, analysis and approaches. *Applied Energy*, v. 250, p. 991–1010, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.082

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; CARLO, J. C. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 67–111, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000300610.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; CARLO, J. C. Influência do uso de PCMs em escritório nos climas brasileiros. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 15, p. e024006, 2024. DOI: 10.20396/parc.v15i00.8673208.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. C.; SILVA, M. A.; MARQUES, R. F. S.; MAGALHÃES, T. S.; PEREIRA, J. P. M.; CARLO, J. C. et al. A influência do clima no conforto térmico em escritórios com PCMs no Brasil. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 16, e024006, p. 1-17, 2025. DOI: 10.20396/parc.v16i00.8676127.

PEREIRA, J.; SOUZA, R.; OLIVEIRA, J.; MOITA, A. Phase Change Materials in Residential Buildings: Challenges, Opportunities, and Performance. **Materials**, v. 18, n. 9, p. 2063, 2025. DOI: 10.3390/ma18092063.

QU, Y.; ZHOU, D.; XUE, F.; CUI, L. Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer. **Energy and Buildings**, v. 241, p. 110966, 2021. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110966.

RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1300–1313, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.130.

RORIZ, Maurício. **Conforto Térmico em Edificações: um Modelo Matemático e uma Aplicação**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996. 185p.

ROSA, M. D.; BIANCO, V.; SCARPA, F.; TAGLIAFICO, L. A. Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach. **Applied Energy**, [S.l.], v. 128, p. 217–229, 2014

SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings.

**Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.107.

SOLGI, E.; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; KARI, B. M.; SKATES, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, v. 147, p. 327–336, 2019. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.031.

SORGATO, Marcio José. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOUZA, Pedro Carmo e. **Effect of natural ventilation on airborne disease infection risk in lecture halls**. 2024. 111 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation**. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net>>. Acesso em: janeiro, 2025.

WIJESURIYA, S.; TABARES-VELASCO, P. C. Experimental apparatus and methodology to test and quantify thermal performance of micro and macro-encapsulated phase change materials in building envelope applications. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p. 101770, 2020. DOI: 10.1016/j.est.2020.101770.

ZHAO, S.; MING, T.; WU, Y.; CAI, C.; YIN, K.; FANG, Y.; DE RICHTER, R.; CHEN, Y.; ZHOU, N. A comprehensive review of the integration of phase change materials in building envelopes: Causality, performance, and application. **Energy and Buildings**, v. 324, p. 114923, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114923.

## 5. CONCLUSÃO

Esta dissertação confirmou a viabilidade técnica e o potencial de melhoria do desempenho termoenergético de edificações por meio da aplicação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) macroencapsulados em componentes de vedação. O estudo demonstrou que a implementação de um protocolo sistemático de dimensionamento, produção e montagem de uma parede de PCM foi fundamental para garantir a estabilidade do sistema em escala real. A confiabilidade científica dos dados apresentados foi assegurada pela calibração de modelos numéricos no *software EnergyPlus*, que atenderam aos critérios da ASHRAE *Guideline 14*, apresentando Coeficientes de Variação do Erro Quadrático Médio (CV(RMSE)) entre 4,81% e 5,45% para as temperaturas internas, o que validou a representatividade das análises subsequentes.

Os resultados experimentais e de simulação evidenciaram que o uso do PCM RT21HC atua como um estabilizador térmico dinâmico, aumentando a inércia térmica dos ambientes. Esse aumento manifestou-se por meio de um atraso térmico superior, que atingiu entre 4 e 5 horas na zona equipada com PCM, em contraste com as 2 a 3 horas observadas na zona convencional. Adicionalmente, a parede com PCM apresentou coeficientes de amortecimento mais elevados, situando-se predominantemente entre 0,3 e 0,6, enquanto a zona de referência manteve-se entre 0,1 e 0,4, comprovando a eficácia do material em absorver calor latente e suavizar as variações de temperatura interna frente às oscilações externas.

Contudo, a análise crítica revelou que a eficácia desta tecnologia passiva no clima de Viçosa-MG (Z2M) não é absoluta e depende estritamente de estratégias operacionais complementares. O uso isolado do PCM gerou um paradoxo de desempenho, resultando em um Percentual de Horas em Conforto (PHC) de 40,76%, inferior aos 63,74% da zona de controle, devido ao aumento do desconforto por frio (59,33%) causado pela transição de fase incompleta do material. Essa limitação foi investigada com a integração do PCM a regimes de ventilação noturna ou condicionamento alternado, que favorecem a solidificação completa do material e maximizam a absorção de calor no dia subsequente. A combinação de PCM com condicionamento noturno permitiu reduzir a demanda de aquecimento em até 30% (reduzindo de 970 para 680 °C·h).

Em suma, a dissertação conclui que o PCM é uma ferramenta robusta para a eficiência energética e o conforto térmico, desde que sua aplicação seja integrada a decisões de projeto e regimes de ventilação adequados. O protocolo detalhado e o modelo validado fornecem subsídios fundamentais para a replicação desta tecnologia, consolidando uma base científica para a promoção de edificações mais resilientes e sustentáveis no cenário brasileiro

É imprescindível reconhecer, no entanto, as limitações do estudo. A restrição da massa de

PCM aplicada, a identificação de umidade devido a porosidade dos invólucros, e os desafios quanto à aplicação da espessura e ao dimensionamento volumétrico ideal para o clima local. Adicionalmente, o recorte temporal do monitoramento (julho a dezembro) e a delimitação do escopo do estudo, que não contemplou a avaliação de sistemas de aquecimento nas estratégias simuladas, restringiram a análise de soluções para mitigar o desconforto por frio observado no inverno, concentrando as conclusões preponderantemente no desempenho de resfriamento e estabilização térmica.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de estratégias de aquecimento passivo ou ativo, adotando-se fontes de energia renováveis como a solar, integradas ao PCM para solucionar o déficit de conforto nos meses frios. Sugere-se também a realização de análises de viabilidade econômica que considerem o ciclo de vida do sistema e o retorno do investimento frente à economia de energia no ar-condicionado. Além disso, a permeabilidade do plástico conforme sua granulometria pode ser novamente investigada para otimizar a estanqueidade do material. Por fim, a continuidade do monitoramento no EDEM por um ciclo anual completo poderá refinar o entendimento sobre a durabilidade dos invólucros e o comportamento do material a longo prazo nas condições climáticas da Zona Bioclimática 2M.

## RELATÓRIO TÉCNICO E PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO DE PCM NO EDEM

### **Projeto Fapemig APQ-02622-23 - Criação do ERDEM - ambiente para ensaios e monitoramento do desempenho termo energético do edifício e seus componentes**

Autor: João Pedro Martins Pereira  
Orientação: Joyce Correna Carlo

#### 1. Introdução

O presente relatório documenta o procedimento padrão para a produção da parede de PCM (Phase Change Material), desenvolvido a partir das etapas de extração e envasamento em estado líquido, congelamento rápido, transporte sob refrigeração e instalação das placas em estado sólido sobre estrutura modular, seguido do fechamento com acabamento no edifício experimental EDEM. O objetivo é assegurar a correta execução da instalação, garantindo estanqueidade, desempenho térmico e estabilidade mecânica dos módulos de PCM aplicados.

O documento contempla as etapas laboratoriais e de campo, incluindo requisitos de segurança, lista de materiais e ferramentas, cálculos de dimensionamento e cronograma de execução.

#### 2. Etapas de execução:

A execução da instalação dos módulos de PCM no EDEM foi estruturada conforme um plano metodológico previamente estabelecido. As etapas seguiram os seguintes passos:

##### 2.1. Preparação do Envase – PCM

- Escolha criteriosa do recipiente adequado para acondicionamento do PCM.
- Avaliação da estanqueidade e da resistência mecânica do invólucro, a fim de garantir a integridade do material.
- Envasamento do PCM no recipiente, obedecendo aos volumes calculados.
- Selagem e realização de testes de vazamento, assegurando a confiabilidade do sistema de contenção.

##### 2.2. Armazenamento Temporário e Transporte

- Definição das condições ideais de transporte, considerando aspectos de temperatura e segurança.

- Utilização de embalagens adequadas para prevenir danos mecânicos ou vazamentos.
- Planejamento logístico para entrega do material no local de instalação, minimizando riscos de deterioração.

### 2.3. Fixação

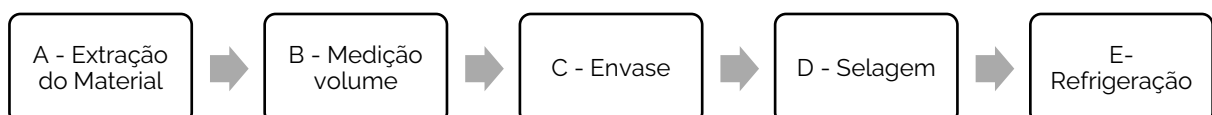
- Elaboração do projeto tridimensional do painel de madeira destinado ao suporte das placas contendo PCM (*Phase Change Material*).
- Corte das ripas conforme especificações dimensionais e posterior fixação na parede, servindo de base estrutural para a instalação das placas
- Verificação da estrutura de suporte onde os módulos de PCM seriam fixados, garantindo compatibilidade e estabilidade.
- Posicionamento e ancoragem cuidadosa dos módulos de PCM conforme o projeto executivo.
- Disponibilização e correta utilização das ferramentas e equipamentos necessários para a fixação.
- Testes finais de estabilidade mecânica e de eficiência térmica, assegurando o desempenho do conjunto instalado.
- Fechamento e acabamento do painel com ACM (Alumínio composto)

## 3. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS PCM

### 3.1. Preparação do envase - PCM

#### 3.1.1. Pré-envase:

- Verificar o estado físico do PCM com antecedência mínima de 48 h antes do experimento. Realizar o pré-condicionamento do ambiente, aquecendo a 35 °C, caso o PCM não se apresente em estado líquido, a fim de facilitar o manuseio.
- Utilizar soprador térmico para garantir a mudança de fase, caso não tenha ocorrido a mudança de fase.
- Conferir se a geladeira se encontra vazia e devidamente descongelada.
- Organizar a bancada de trabalho de acordo com as etapas experimentais previstas abaixo, assegurando a disposição ordenada dos materiais e equipamentos.



- Materiais:

#### A - Extração do Material

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
-------------------------	------------

PCM	Tonel Latecaae
Alicates	2 un.
Mangueira (2m)	-
Haste metálica (1.5m)	-
Abraçadeiras Nylon	3 un.
Pisseta	1000ml / 1 un.
Óculos	-
Máscara	-
Luvras	-
Jaleco	Responsabilidade Individual
Bandeja plástica	1 un.

#### B – Medição volume

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Pisseta plástica graduada	1000ml/ 1un.
Pisseta plástica graduada	500ml / 1 un.

#### C – Envase

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Caneta	-
Régua	-
Invólucro plástico	25x35 cm / 80 un.
Balde plástico	(2000 ml)
Bandeja Plástica	1 un.

#### D – Selagem

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Filtro de linha (extensão de luz)	-.
Seladora	220 V

#### F – Refrigeração

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Bandejas plásticas	4 un.
Geladeira	Desocupada

### 3.1.2. Preparação

- Vestir os equipamentos de proteção individual (EPI), incluindo jaleco, luvas, óculos de proteção e prender os cabelos.

### 3.1.3. Extração do material (ETAPAA)

- Abrir o tonel: Abrir a tampa do tonel com o auxílio de dois alicates, pressionando a tampa em pontos opostos e realizando rotação.
- Fixar a mangueira à haste metálica utilizando abraçadeiras, garantindo que a extremidade alcance a base inferior do tonel.

- **Preparar o recipiente de coleta:**

- Aproximar a bandeja de coleta próxima ao tonel.
- Inserir a mangueira na pisseta sem tampa e vedar com fita adesiva, formando uma bomba de sucção.

- **Iniciar a extração:**

- Inserir a outra extremidade da mangueira, fixada na haste metálica, no tonel.
- Realizar movimentos de pressão na bomba de sucção para iniciar a extração.
- Quando o fluxo se estabilizar, retirar a pisseta e transferir a extremidade da mangueira para a bandeja de coleta.

- **Encerrar a extração:**

- Interromper o fluxo elevando a mangueira acima do tonel e removendo-a.
- Transportar o recipiente com PCM até a bancada de trabalho.

### 3.1.4. Medição do volume (ETAPA B)

- **Medição do PCM**

- Retirar da bandeja a quantidade determinada de PCM (1.200 ml) utilizando pissetas de 1000 ml e 500 ml, conforme o cálculo apresentado a seguir.
- Memorial de Cálculo PCM:

## MEMORIAL DE CÁLCULO COM ESPESSURA ADOTADA

DESCRIÇÃO	CÁLCULO	RESULTADO
Área da parede	-	6,00 m <sup>2</sup>
Espessura do PCM	-	2 cm = 0,02 m
Volume de PCM necessário	$V = \text{Área} \times \text{Espessura}$	$V = 6,00 \times 0,02$
		V = 0,12 m <sup>3</sup>
Conversão para litros	1m <sup>3</sup> = 1000 L	0,12m <sup>3</sup> = 120 L
Densidade do PCM	-	0,77 kg/L
Massa de PCM necessária	$M = \text{Volume} \times \text{Densidade}$	$M = 120 \times 0,77$
		M = 92,40 kg
Massa por invólucro	$M / 80$	≈ 1,200 g ou 1200ml

- **Transferência para envase**

- Transferir o recipiente contendo a quantidade medida de PCM para a bancada na etapa de envase.

### 3.1.5. Envase invólucro (ETAPA - C)

Realizar a etapa em dupla: um responsável pela manipulação do PCM proveniente da extração e outro pela manipulação do invólucro após o envase.

- **Marcação do invólucro plástico (Operador 1)**

- Utilizar régua para riscar duas faixas no invólucro plástico: uma a 6 cm e outra a 5 cm em relação à borda superior, correspondente à área de fixação nas ripas.

- **Preparação para envase (Operador 1)**

- Dobrar a borda do invólucro para fora até a marca de 6 cm.
- Abrir o invólucro no interior de balde plástico de 2000 ml e posicioná-lo na bandeja da área de envase da bancada.

- **Envase do PCM (Operador 2)**

- Despejar a quantidade determinada de PCM (1.200 ml) no invólucro plástico utilizando pisseta.

- **Transferência para selagem (Operador 1)**

- Com auxílio de um operador adicional, retirar o invólucro contendo PCM do balde, mantê-lo na posição vertical e encaminhar para a etapa de selagem.

#### 3.1.6. Selagem (ETAPA D)

- **Conexão da extensão e da seladora**

- Conectar a extensão elétrica em tomada de 220 V.
- Certificar-se previamente de que a tomada utilizada opera em 220 V.
- Conectar a seladora à extensão, acionar o botão *Power* e ajustar o nível de selagem para **6**.

- **Posicionamento inicial do invólucro**

- Com o auxílio de um segundo operador, manter o invólucro plástico na posição horizontal, apoiado sobre a bancada.
- Posicionar a marca de **6 cm** na área de selagem.
- Realizar a selagem deixando uma margem lateral de **1 cm**, a fim de possibilitar a retirada do ar.

- **Retirada do ar**

- Colocar o invólucro em posição vertical.
- Pressioná-lo levemente para promover a saída quase completa do ar residual.

- **Selagem final**

- Recolocar o invólucro na área de selagem, ajustando-o à marca de **5 cm**.
- Executar a selagem completa.
- Verificar se não existem vazamentos.

- **Transferência para refrigeração**

- Transferir o invólucro contendo o PCM para a área destinada à etapa de refrigeração.

#### 3.1.7. Refrigeração (ETAPA E)

- **Posicionamento do invólucro**

- Colocar o invólucro contendo PCM na bandeja plástica, na posição horizontal, distribuído de maneira uniforme.

- **Armazenamento em refrigeração**

- Transferir a bandeja para o interior da geladeira.

- Cada bandeja comporta até **quatro camadas de invólucros de PCM**.
- Conforme os invólucros de PCM forem solidificando (mudança de fase de líquido para sólido), empilhá-los na bandeja, respeitando o limite de camadas estabelecido.

- **Tempo de refrigeração**

- Manter os invólucros em refrigeração até a completa solidificação, permanecendo nessa condição até o momento do transporte.

### 3.1.8. Armazenamento Temporário e Transporte

- **Materiais:**

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Bandeja plásticas	(4 un.)
Geladeira	-
Cooler	-

- **Armazenamento temporário**

- Manter os invólucros de PCM na posição horizontal.
- Conservar em ambiente refrigerado até a realização da etapa de fixação.

- **Transporte**

- Transportar os invólucros de PCM até o local de instalação em *cooler*, de modo a assegurar que permaneçam em estado sólido.
- Garantir a integridade física dos invólucros durante todo o processo de transporte.

### 3.2. Fixação

- **Materiais:**

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Filetes de madeira 2 cm de espessura	Dimensões conforme o projeto (Figura 2)
Parafuso e bucha para fixação dos files na alvenaria (6mm)	-
Furadeira (c/ broca para alvenaria) / Parafusadeira	-
Kit Chaves	-
Nível de mão e trena*	-

MATERIAIS E FERRAMENTAS	Observação
Escada	-
Grampeador de Madeira	-
Grampo de Madeira	-
Placas de ACM (Alumínio Composto) –	Dimensões conforme o projeto
Parafuso para placas de alumínio (3mm)	-
Acrílico (16cm de diâmetro)	-
Placas de Isopor	Dimensões conforme o projeto
Chapa MDF (0,80 x 1,20) – vedação vão porta.	-
Dobradiça (4 pequenas)	-

A instalação dos invólucros de PCM foi realizada de acordo com a lógica previamente definida no projeto, conforme representado no modelo esquemático (Figura 1). Essa lógica orientou a disposição, o alinhamento e a sequência de posicionamento dos invólucros, assegurando a uniformidade na distribuição e a compatibilidade com as etapas subsequentes do experimento/instalação.

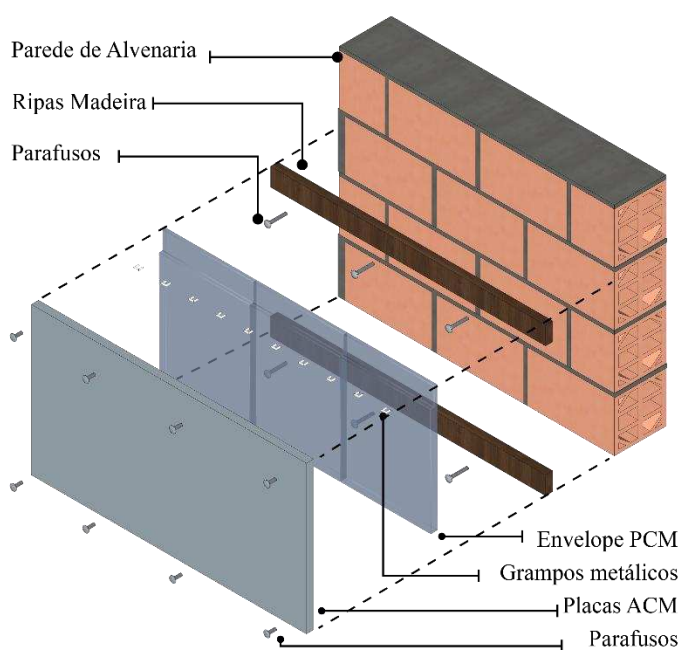


Figura 32 - Lógica de Instalação do PCM

O procedimento buscou garantir:

- a correta orientação espacial dos invólucros;

- a manutenção da integridade física durante a fixação;
- a otimização do contato térmico com os elementos construtivos adjacentes;
- a reprodutibilidade do processo em instalações futuras.

Assim, a imagem apresentada serviu como referência direta para a execução prática, permitindo que a instalação fosse conduzida de maneira sistemática, padronizada e coerente com os objetivos experimentais estabelecidos.

- **Cortes e Instalação das ripas para Estrutura de Suporte**
- **Dimensionamento do projeto**

- O projeto das ripas foi desenvolvido a partir das dimensões dos invólucros plásticos de PCM (25 × 30 cm) conforme a Figura 2.
- Todas as ripas foram confeccionadas com espessura de 2 cm, assegurando resistência mecânica e compatibilidade com o sistema de fixação.

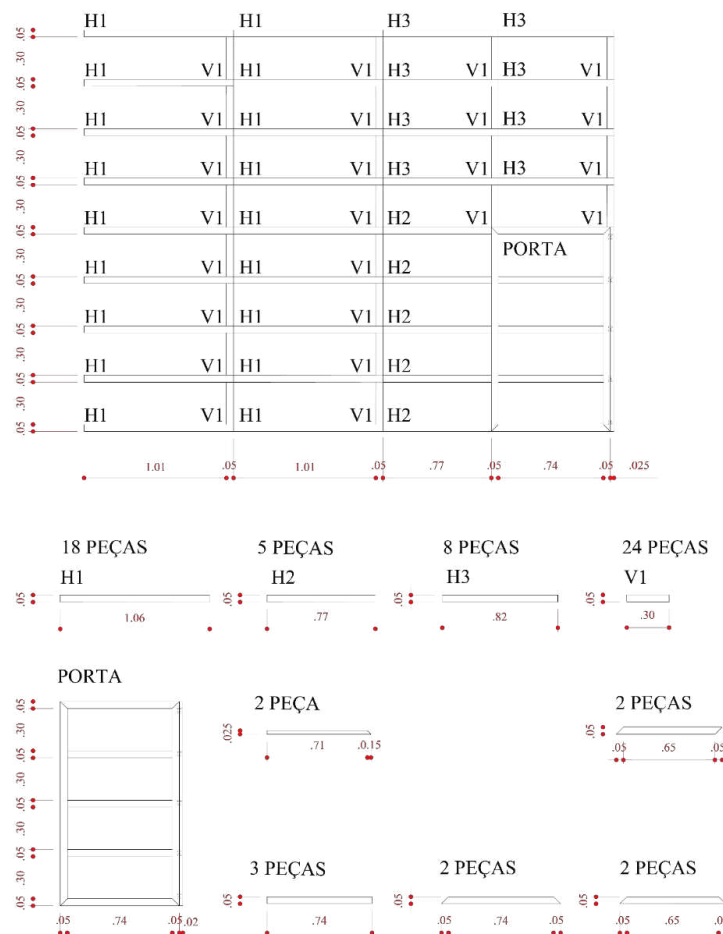


Figura 33 - Projeto Executivo Estrutura de Suporte

- **Corte das ripas**

- O corte das peças foi realizado em serra, conforme as medidas especificadas no projeto executivo (Figura 2).
- A padronização dos cortes visou garantir uniformidade dimensional e precisão na etapa de montagem.

- **Fixação na parede**

A fixação das ripas foi executada com o auxílio de furadeira, seguindo o procedimento:

- Perfuração prévia da parede.
- Inserção de buchas específicas para bloco cerâmico, adequadas à carga e ao tipo de suporte.
- Perfuração das ripas, cada uma contendo mínimo de três furos distribuídos ao longo do seu comprimento.
- Verificação do nível e esquadro.
- Utilização de parafusadeira elétrica para fixação definitiva das ripas na parede.

- **Montagem da porta**

- A porta do sistema foi montada separadamente, garantindo maior precisão de encaixe.
- Após a montagem, foi instalada no local designado utilizando os mesmos procedimentos e ferramentas empregados na fixação das ripas (furadeira, buchas e parafusos).

- **Fixação dos Invólucros**

- Conforme descrito no item 2.2.2 Transporte, os invólucros de PCM devem ser conduzidos ao local de instalação em cooler, de modo a garantir que permaneçam em estado sólido até a etapa de fixação.
- Cada invólucro deve ser posicionado e fixado na estrutura de suporte conforme indicado no esquema de montagem (Figura 3).

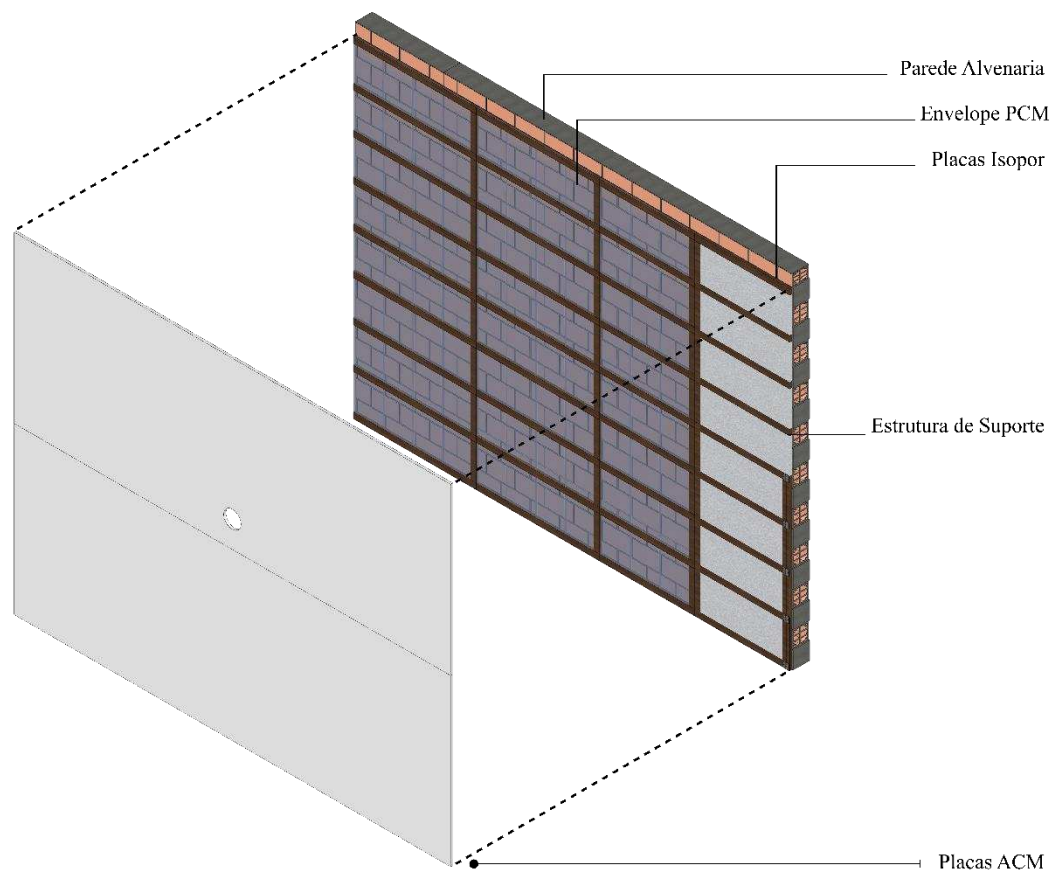


Figura 34 - Esquema da fixação invólucros - PCM

- Recomenda-se a execução da atividade em dupla, a fim de otimizar o manuseio e assegurar maior precisão:
  - Um operador deve manter o invólucro devidamente alinhado entre as ripas da estrutura.
  - O segundo operador deve realizar a fixação utilizando grampeador, prendendo a aba superior do invólucro (faixa de 5 cm) diretamente às ripas.
  - O mesmo procedimento deve ser repetido para todos os 80 invólucros previstos no sistema.
  - Na porção lateral direita, próxima à porta, onde não haverá inserção de invólucros de PCM, devem ser posicionadas placas de isopor, fixadas por pressão, com a finalidade de complementar o fechamento e manter a estabilidade do conjunto.

### 3.3. Finalização e Acabamento

- Após a etapa de fixação dos invólucros, recomenda-se que a instalação das placas de ACM seja realizada em dupla, a fim de assegurar que os invólucros de PCM permaneçam na espessura correta estabelecida em projeto.
- O primeiro operador deve posicionar e sustentar as placas de ACM previamente recortadas de acordo com as dimensões especificadas (Figura 4).

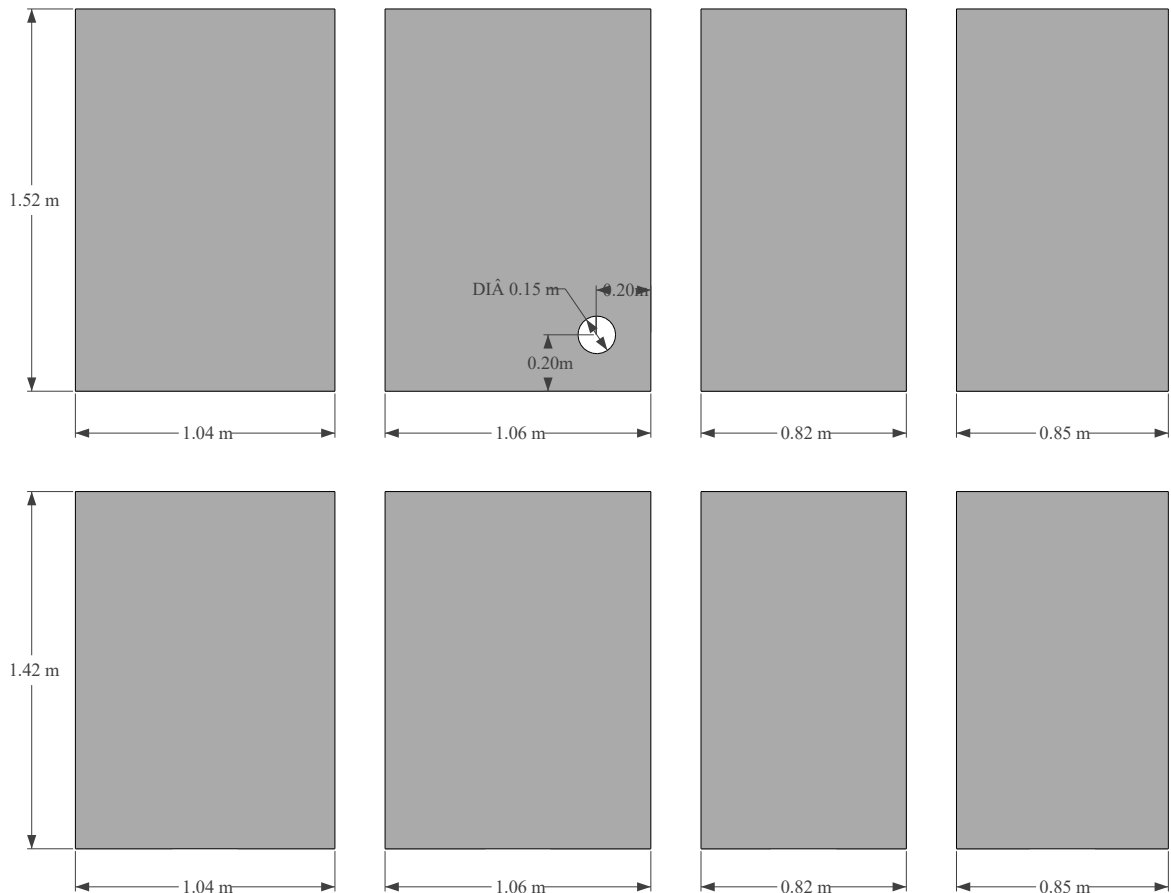


Figura 35 - Projeto corte placas ACM

- O segundo operador deve, com o auxílio de furadeira, marcar e realizar os furos necessários. Em seguida, utilizando parafusadeira, proceder à fixação das placas na estrutura de suporte.
- Concluída esta etapa, considera-se finalizado o processo de instalação do sistema.

#### 4. CRONOGRAMA

Junho de 2025

- 2 e 5 de junho – Instalação de PCM (testes de envase) e Instalação da estrutura de suporte (recorte).
- 9 a 13 de junho – Instalação do suporte (recorte das ripas).

- 16 a 20 de junho – Instalação da estrutura de suporte (fixação).
- 23 a 25 de junho – Instalação de PCM (envase).
- 26 e 27 de junho – Instalação de PCM (fixação).
- 30 de junho a 2 de julho – Instalação de PCM (envase).

#### Julho de 2025

- 3 de julho – Instalação de PCM (fixação).
- 7 a 9 de julho – Instalação de PCM (envase).
- 10 de julho – Instalação de PCM (fixação).
- 14 e 15 de julho – Instalação final de PCM (ajustes e consolidação).

ANEXO IMAGENS



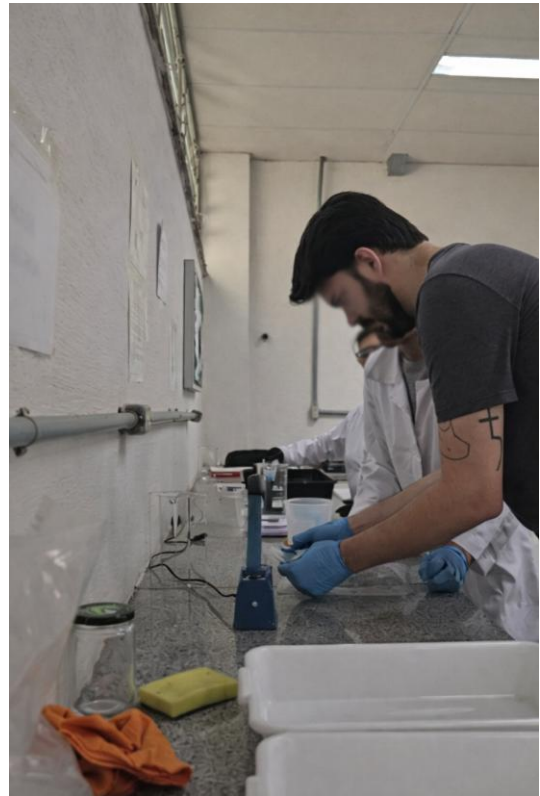
Teste 1: Medição Volumétrica



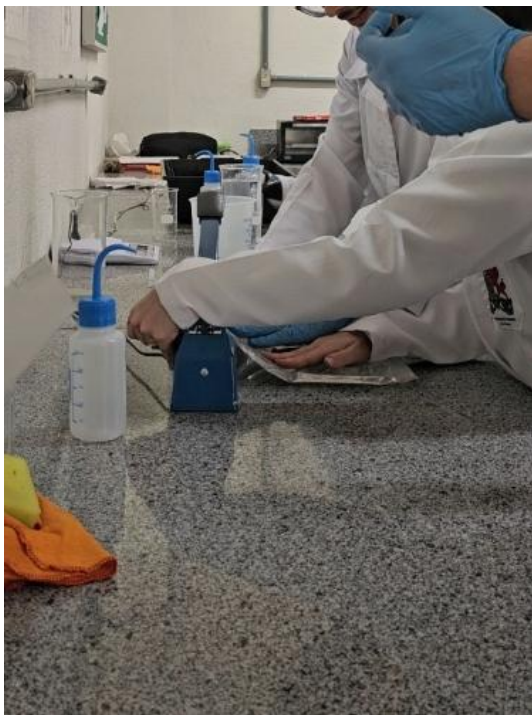
Teste 2: Medição Volumétrica



Teste 3 : Envase



Teste 4: Selagem



Teste 5: Selagem Dupla



Teste 6: Verificação de vazamento



Célula Teste – Fixação Ripas



Célula Teste – Fixação invólucro PCM



Célula Teste – Fixação Invólucro PCM



Célula Teste – Fixação Placa ACM



Fixação demais Ripas (Estrutura de Suporte)



Fixação Invólucro PCM



Fixação Invólucro PCM