

JÚLIA CORDEIRO VIEIRA

**Uso de Materiais de Mudança de Fase como
alternativa para a melhoria do desempenho
térmico de habitações no clima subtropical
brasileiro**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, dezembro de 2022

**USO DE MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE COMO ALTERNATIVA PARA A
MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES NO CLIMA
SUBTROPICAL BRASILEIRO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Raquel Diniz Oliveira

BELO HORIZONTE

2022

V658u Vieira, Júlia Cordeiro
Uso de materiais de mudança de fase como alternativa para a melhoria do desempenho térmico de habitações no clima subtropical brasileiro / Júlia Cordeiro Vieira. – 2022.
98 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Raquel Diniz Oliveira.
Bibliografia: f. 80-88.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Edifícios de apartamentos – Brasil – Teses. 2. Residências – Propriedades térmicas – Teses. 3. Materiais – Propriedades mecânicas – Teses. 4. Arquitetura tropical – Teses. I. Oliveira, Raquel Diniz. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 693.832081

JÚLIA CORDEIRO VIEIRA

**USO DE MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE COMO ALTERNATIVA
PARA A MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES
NO CLIMA SUBTROPICAL BRASILEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Raquel Diniz Oliveira
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Profa. Dra. Ana Ibis Abreu Rojas
Facultad de Ingeniería, UDELAR

Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza
Escola de Arquitetura, UFMG

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela oportunidade de estudo e trabalho e pela família. Aos meus pais, Elaine e Fábio, por todo amor, dedicação e por terem sido minha base nesta caminhada. Aos meus irmãos, Ana e Rafael, pela amizade e fraternidade. Ao Michel, por todo amor, companheirismo e incentivo. A todos os professores, em especial à professora Raquel Diniz Oliveira e ao professor Rogério Cabral de Azevedo, pelo apoio, dedicação e por todo o conhecimento transmitido durante a orientação deste trabalho. Ao CEFET-MG e à CAPES, pelo auxílio técnico e financeiro prestados ao desenvolvimento deste trabalho. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Finanças 001.

RESUMO

Os edifícios devem fornecer condições para garantir o conforto térmico e bem-estar aos usuários durante o ano, demandando consumo mínimo de energia adicional para auxiliar no controle artificial de temperatura ambiente. Diversos materiais construtivos podem propiciar um comportamento térmico adequado da edificação para o clima local e a consequente racionalização de energia, como os Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* – PCM). Os PCMs são capazes de absorver e dissipar quantidades significativas de calor durante sua mudança de fase, mantendo faixas de temperatura constante. Neste contexto, propôs-se neste estudo testar a incorporação de PCM a sistemas construtivos no clima subtropical brasileiro. Inicialmente, avaliou-se o desempenho térmico da envoltória de um modelo representativo de habitação térrea, em seu aspecto original, em três zonas bioclimáticas brasileiras (ZB 1, 2 e 3), por meio do método de simulação da NBR 15.575-1:2021. Ademais, estimaram-se as condições potenciais de conforto térmico oferecidas aos usuários, considerando 80% de aceitação dos ocupantes, segundo o modelo adaptativo de conforto térmico descrito na norma ASHRAE 55-2017. Os resultados indicaram desempenho térmico inadequado da edificação original ao clima subtropical. Assim, como proposta de solução alternativa, avaliou-se o impacto da incorporação do PCM na envoltória em combinações diferentes, considerando a variação de suas propriedades termofísicas, além da troca do sistema construtivo original da edificação (modelo de paredes pesadas – MPP) pelo sistema *Light Steel Frame* (modelo leve isolado – MLI). Os resultados indicaram que o PCM foi capaz de adaptar o desempenho térmico da edificação ao clima e aumentar as condições de conforto térmico na maioria dos casos, sobretudo no MLI, tendendo a melhorar com o aumento da sua capacidade de armazenamento térmico e da área de superfície de sua aplicação. Contudo, no MPP, os pontos de fusão do PCM que ofereceram as melhores condições de conforto térmico não permitiram atendimento ao nível Mínimo (M) de desempenho térmico exigido pela NBR 15.575-1:2021. Portanto, a partir desse estudo, demonstrou-se a importância de considerar as condições de conforto térmico nos ambientes, além do nível de desempenho térmico da edificação, bem como de otimizar as propriedades termofísicas do PCM na tomada acertada de decisões de projeto.

Palavras-chave: material de mudança de fase; edificações residenciais; desempenho térmico; clima subtropical.

ABSTRACT

Buildings must provide conditions to ensure thermal comfort and well-being for users throughout the year, requiring minimum consumption of additional energy to assist in artificial temperature control. Several building materials can improve the building thermal behavior for the local climate and therefore provide energy savings, such as Phase Change Materials (PCM). PCMs are capable of absorbing and dissipating significant amounts of heat, during their phase change, maintaining indoor temperature constant. In this context, it was proposed in this study to test the PCM incorporation into construction systems as an alternative solution to optimize the thermal performance of housing envelopes in the subtropical Brazilian climate, as well as its thermal comfort conditions for users. Initially, the envelope thermal performance of a single-story housing representative model, in its original aspect, was evaluated in three Brazilian Bioclimatic Zones (BZ 1, 2, and 3), through the NBR 15575-1:2021 simulation method. In addition, the potential thermal comfort conditions for users were estimated, considering 80% of occupant acceptance, according to the Adaptive Thermal Comfort Model by ASHRAE Standard 55-2017. The results indicated inadequate thermal performance of the original building for the subtropical climate. Thus, as an alternative solution proposal, the impact of the PCM incorporation in the envelope was evaluated in different combinations, considering the variation of its thermophysical properties, as well as the exchange of the original construction (Heavyweight Model – HM) by a Light Steel Frame construction system (Lightweight Model – LM). The results indicated that the PCM was able to adapt the building thermal performance to the climate and increase the thermal comfort conditions in most cases, mainly in the LM. Besides, the increase of the PCM's thermal storage capacity and the surface area of its application led to better results. However, in the HM, the PCM melting points that provided the best thermal comfort conditions did not allow the Minimum level (M) of thermal performance meeting of the building required by NBR 15.575-1:2021. From this study, therefore, it was demonstrated the importance of considering the thermal comfort conditions for users, in addition to the building thermal performance level, as well as optimizing the PCM thermophysical characteristics for suitable design decisions.

Key-words: Phase Change Material; housing; thermal performance; subtropical climate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interesse de pesquisas sobre PCM ao longo do tempo no mundo	4
Figura 2 – Interesse de pesquisas sobre PCM por região	4
Figura 3 – Representação das trocas de calor em edificações	6
Figura 4 – Zoneamento bioclimático brasileiro	7
Figura 5 – Métodos de armazenamento de energia térmica: (a) calor sensível; (b) calor latente	8
Figura 6 – PCM em diferentes fases	10
Figura 7 – Parede com PCM para manutenção da temperatura ambiente em conforto térmico	10
Figura 8 – Deslocamento e redução do pico de carga devido ao Material de Mudança de Fase (PCM)	11
Figura 9 – Curva de entalpia de um PCM apresentando histerese	11
Figura 10 – Principais classificações dos PCMs	12
Figura 11 – Temperatura e entalpia de fusão para diferentes grupos de PCM	13
Figura 12 – PCMs orgânicos parafínicos em diferentes estados	14
Figura 13 – PCM orgânico à base de gorduras vegetais	14
Figura 14 – PCM de cloreto de cálcio hexahidratado em temperatura ambiente	15
Figura 15 – PCM (a) micro e (b) macroencapsulado	17
Figura 16 – Painel de gesso contendo PCM microencapsulado em foto (a) esquemática e (b) ampliada	17
Figura 17 – PCM macroencapsulado em (a) módulo de alumínio, (b) alvenaria e (c) agregado leve	18
Figura 18 – Placa de PCM de forma estabilizada e sua estrutura cristalina	18
Figura 19 – Formas de aplicação do PCM no envelope de construção	19
Figura 20 – Representação de nó para o modelo CondFD no EnergyPlus®	23
Figura 21 – Exemplo de relação entalpia-temperatura de um PCM	24
Figura 22 – Temperatura do ar interior medida e simulada de uma edificação com PCM	25
Figura 23 – Mapa da classificação climática Köppen-Geiger	27
Figura 24 – Classificação climática Köppen-Geiger para o Brasil	30
Figura 25 – Fluxograma das etapas metodológicas	39

Figura 26 – Geolocalização (a) e temperatura externa mensal das cidades simuladas (b).....	40
Figura 27 – Projeto representativo e modelo tridimensional da moradia isolada.	40
Figura 28 – Manta de BioPCM™ (a) e sua inclusão na superfície interna de paredes (b).....	43
Figura 29 – Modelo real (a) e modelo de referência (b)	45
Figura 30 – PHFT _{UH} , Tomáx _{UH} e Tomín _{UH} da edificação em cada zona bioclimática (ZB) – modelo de paredes pesadas (MPP) sem PCM	52
Figura 31 – PHFT _{UH} , Tomáx _{UH} e Tomín _{UH} da edificação em cada zona bioclimática (ZB) – modelo leve isolado (MLI) sem PCM.....	53
Figura 32 – Percentual de horas em condições de conforto térmico nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI) sem PCM em cada zona bioclimática (ZB)	54
Figura 33 – Comportamento térmico anual do Quarto 2 nos modelos de paredes Pesadas (MPP) e Leves Isoladas (MLI) sem PCM em (a) Curitiba (ZB 1), (b) Santa Maria (ZB 2) e (c) São Paulo (ZB 3).....	55
Figura 34 – Comportamento térmico no Quarto 2 (ZB 2) ao longo do ano – PCM com capacidade máxima de armazenamento de energia (1250 kJ/m ²) e condutividade térmica mínima (0,15 W/m.K) aplicada nas paredes externas e no teto (t+p), com pontos de fusão de 23 °C (a) e 29 °C (b).	60
Figura 35 – Faixa de temperatura interna nos cenários localizados na ZB 1	63
Figura 36 – Faixa de temperatura interna anual nos cenários localizados na ZB 2 ..	64
Figura 37 – Faixa de temperatura interna anual nos cenários localizados na ZB 3 ..	64
Figura 38 – Distribuição anual de horas de conforto térmico diário nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI), sem PCMs, localizados na (a) ZB 1, (b) ZB 2 e (c) ZB 3	65
Figura 39 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos com PCM, ordenados da menor para a maior área de aplicação de PCM na zona bioclimática ZB 1	66
Figura 40 – Comparação entre a distribuição anual de horas de conforto térmico diário nos cenários com maior impacto pela troca do modelo de paredes pesadas (MPP) pelo leve isolado (MLI) nas zonas bioclimáticas (a) ZB 1, (b) ZB 2 e (c) ZB 3	66

Figura 41 – Influência dos fatores (a) “zona bioclimática (ZB)”, (b) “ponto de fusão”, (c) “superfície de aplicação do PCM” e (d) “condutividade térmica do PCM” nas condições de conforto térmico dos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI)..	67
Figura 42 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos pela variação dos pontos de fusão do PCM em Santa Maria (ZB 2).....	69
Figura 43 – Influência dos fatores (a) “capacidade de armazenamento térmico” e (b) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada ponto de fusão (PF) do PCM.....	69
Figura 44 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos com PCM, para cada valor de capacidade de armazenamento de energia (CapT), ordenados da menor (Teto) para a maior (Teto + Paredes) área de aplicação de PCM em São Paulo (ZB 3).....	70
Figura 45 – Influência dos fatores (a) “ponto de fusão do PCM” e (b) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada capacidade de armazenamento térmico (CapT) do PCM.....	71
Figura 46 – Influência dos fatores (a) “modelo”, (b) “ponto de fusão do PCM”, (c) “capacidade de armazenamento térmico” e (d) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada valor de condutividade térmica (CondT) do PCM	72
Figura 47 – Influência dos fatores (a) “capacidade de armazenamento térmico” e (b) “ponto de fusão do PCM” nas condições de conforto térmico para cada superfície de aplicação do PCM	74
Figura 48 – Influência dos fatores (a) “modelo”, (b) “ponto de fusão do PCM”, (c) “capacidade de armazenamento térmico”; (d) “condutividade térmica” e (e) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada zona bioclimática (ZB)	75
Figura 49 – Procedimentos de avaliação do desempenho térmico	89
Figura 50 – Ilustração esquemática da análise horária dos dados de saída (com ventilação natural).....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais propriedades desejadas para a seleção de PCMs.....	12
Quadro 2 – Descrição dos 438 cenários simulados	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cidades selecionadas	39
Tabela 2 – Valores para a geometria da unidade habitacional	41
Tabela 3 – Propriedades térmicas da envoltória – modelo de paredes pesadas (MPP)	41
Tabela 4 – Propriedades térmicas da envoltória – modelo leve isolado (MLI)	42
Tabela 5 – Tabela de esquadrias da habitação dos modelos real e de referência....	45
Tabela 6 – Características térmicas dos elementos construtivos.....	46
Tabela 7 – Propriedades termofísicas constantes e curvas de entalpia-temperatura dos PCMs.....	46
Tabela 8 – Isolamento térmico das vestimentas	48
Tabela 9 – Isolamento térmico das vestimentas: valor médio	49
Tabela 10 – Diagnóstico de desempenho térmico – MPP sem PCM	52
Tabela 11 – Diagnóstico de desempenho térmico – modelo leve isolado (MLI) sem PCM	53
Tabela 12 – Impacto no desempenho térmico da edificação em cada zona bioclimática (ZB) devido à troca do modelo de paredes pesadas (MPP) para o leve isolado (MLI) – sem PCM.....	54
Tabela 13 – Condições de desconforto térmico nos modelos sem PCM em cada zona bioclimática (ZB).....	55
Tabela 14 – Efeito do PCM nos valores de $Tomáx_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico nos cenários do modelo de paredes pesadas (MPP) para cada zona bioclimática (ZB).....	57
Tabela 14 – Efeito do PCM nos valores de $Tomáx_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico nos cenários do modelo de paredes pesadas (MPP) para cada zona bioclimática (ZB).....	58
Tabela 15 – Efeito do PCM nos valores de $Tomáx_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico em cada cenário do modelo leve isolado (MLI) para cada zona bioclimática (ZB).....	61
Tabela 15 – Efeito do PCM nos valores de $Tomáx_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico em cada cenário do modelo leve isolado (MLI) para cada zona bioclimática (ZB).....	62

Tabela 16 – Significância do efeito da variação do ponto de fusão do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico ao longo do ano em cada zona bioclimática (ZB).....	68
Tabela 17 – Significância da variação da capacidade de armazenamento de calor (CapT) do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico em cada zona bioclimática (ZB).....	70
Tabela 18 – Significância do efeito da variação dos valores de condutividade térmica (CondT) do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico em cada zona bioclimática (ZB).....	72
Tabela 19 – Significância do efeito da variação da superfície de aplicação do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico anual em cada zona bioclimática (ZB)	73
Tabela 20 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (T_{BSm}) e faixas de temperatura operativa (T_{OAPP}) para a determinação do $PHFT_{APP}$	91
Tabela 21 – Médias anuais das temperaturas externa e interna -- modelos sem PCM	93
Tabela 22 – Propriedades térmicas ideais para a escolha dos PCMs	93
Tabela 23 – Parâmetros de desempenho térmico – Curitiba (ZB 1) – modelo de referência	94
Tabela 24 – Diagnóstico de desempenho térmico – Curitiba (ZB 1) – modelos sem PCM	94
Tabela 25 – Parâmetros de desempenho térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelo de referência	95
Tabela 26 – Diagnóstico de desempenho térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelos sem PCM	95
Tabela 27 – Parâmetros de desempenho térmico – São Paulo (ZB 3) – modelo de referência	96
Tabela 28 – Diagnóstico de desempenho térmico – São Paulo (ZB 3) – modelos sem PCM	96
Tabela 29 – Valores médios das temperaturas de conforto térmico em cada zona bioclimática.....	97
Tabela 30 – Condições de conforto térmico – Curitiba (ZB 1) – modelos sem PCM.....	97
Tabela 31 – Condições de conforto térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelos sem PCM	97

Tabela 32 – Condições de conforto térmico – São Paulo (ZB 3) – modelos sem PCM	98
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACH – *Air Changes per Hour*
- AVAC – Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado
- APP – Ambientes de Permanência Prolongada
- APT – Ambientes de Permanência Transitória
- ASHRAE – Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado
- CapT – Capacidade de armazenamento térmico
- CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
- Cfa – Clima Subtropical Úmido
- Cfb – Clima Temperado Oceânico
- CondFD – *Conduction Finite Difference* (Diferença Finita de Condução)
- CondT – Condutividade térmica
- CT – Capacidade térmica
- DOE – Departamento de Energia
- PF – Ponto de fusão
- FV – Fator de ventilação
- IEA – *International Energy Agency*
- LHS – *Latent Heat Storage* (Armazenamento de Calor Latente)
- MPP – Modelo de paredes pesadas
- MLI – Modelo leve e isolado
- MRef – Modelo de referência
- PCM – *Phase Change Material* (Material de Mudança de Fase)
- PCES – *Phase Change Energy Solutions*
- PHFT_{APP} – Percentual de horas de ocupação dos APP dentro da faixa de temperatura operativa
- PHFT_{UH} – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa
- TES – *Thermal Energy Storage* (armazenamento de energia térmica)
- TBS_m – Média anual da temperatura externa de bulbo seco
- TMY – *Typical Meteorological Year* (Ano Meteorológico Típico)
- To_{APP} – Temperatura Operativa de cada APP

$T_{omáx_{APP}}$ – Temperatura operativa anual máxima dos APP

$T_{omáx_{UH}}$ – Temperatura operativa anual máxima da UH

$T_{omín_{APP}}$ – Temperatura operativa anual mínima dos APP

$T_{omín_{UH}}$ – Temperatura operativa anual mínima da UH

U_t – Transmitância térmica

UH – Unidade Habitacional

ZB – Zona bioclimática

$\Delta T_{omáx}$ – Valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima

$\Delta T_{omín}$ – Valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Perguntas de pesquisa.....	2
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo geral.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Justificativa e relevância.....	3
2	Revisão teórica.....	6
2.1	Desempenho e Conforto térmico em edificações.....	6
2.2	Armazenamento de energia térmica em edificações.....	8
2.3	Materiais de Mudança de Fase (PCM).....	9
2.3.1	Mecanismos e propriedades.....	11
2.3.2	Classificações.....	12
2.3.2.1.	PCMs Orgânicos – Parafinas.....	13
2.3.2.2.	PCMs orgânicos – Ácidos graxos.....	14
2.3.2.3.	PCMs inorgânicos – Hidratos de sal.....	15
2.3.2.4.	PCMs eutéticos.....	15
2.3.3	Métodos de incorporação.....	16
2.3.4	Aplicações em edifícios.....	19
2.3.4.1.	Potenciais, desafios e oportunidades.....	20
2.3.5	Simulações numéricas.....	21
2.3.5.1.	EnergyPlus®.....	22
2.3.5.1.1.	Modelagem numérica dos PCMs.....	22
2.3.5.1.2.	Validação.....	24
2.3.6	Influência do clima para a adoção do PCM.....	26
2.3.6.1.	Climas Equatoriais (A).....	27
2.3.6.2.	Climas Áridos (B).....	27
2.3.6.3.	Climas Temperados (C).....	28
2.3.6.4.	Climas Continentais (D).....	28
2.3.7	PCM no Brasil.....	29
2.4	Pesquisas correlacionadas.....	31
3	Materiais e método.....	38
3.1	Método de abordagem.....	38

3.2	Método de procedimentos	38
3.2.1	Seleção do estudo de caso.....	39
3.2.1.1.	Seleção das cidades de análise	39
3.2.1.2.	Seleção dos modelos construtivos	40
3.2.1.3.	Seleção do PCM.....	42
3.2.1.4.	Seleção dos cenários a serem simulados	43
3.2.2	Modelagens termoenergéticas conforme a NBR 15575-1:2021	44
3.2.3	Simulações termoenergéticas conforme a NBR 15575-1:2021	45
3.2.3.1.	Características construtivas	46
3.2.3.2.	Condições de contorno.....	47
3.2.3.3.	Rotinas de uso e ocupação	48
3.2.4	Avaliação do desempenho e conforto térmico dos modelos.....	49
3.2.5	Comparação entre os cenários.....	49
4	Resultados.....	51
4.1	Avaliação do desempenho e conforto térmico dos modelos.....	51
4.1.1	Desempenho térmico segundo a NBR 15575-1:2021 – modelos sem PCM ..	51
4.1.1.1.	Modelo de paredes pesadas (MPP)	52
4.1.1.2.	Modelo leve isolado (MLI)	53
4.1.2	Conforto térmico conforme a ASHRAE 55-2017 – modelos sem PCM	54
4.1.3	Desempenho e conforto térmico dos modelos com PCM.....	56
4.1.3.1.	Modelo de paredes pesadas (MPP) – com PCM	56
4.1.3.2.	Modelo leve isolado (MLI) – com PCM.....	60
4.2	Comparações entre os cenários.....	64
4.2.1	Modelo da construção	65
4.2.2	Capacidade de armazenamento de energia térmica (kJ/m ²)	69
4.2.3	Condutividade térmica (W/m.K).....	71
4.2.4	Superfície de aplicação do PCM.....	73
4.2.5	zona bioclimática (ZB)	74
4.3	Considerações finais	75
5	Conclusões	78
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	79
	Referências	80
	Anexo A – Procedimentos para atendimento à NBR 15575-1:2021.....	89
	Apêndice A – Requisitos de desempenho térmico da envoltória.....	93

Apêndice B – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 1.....	94
Apêndice C – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 2	95
Apêndice D – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 3	96
Apêndice E – Conforto térmico dos modelos sem PCM – ZB 1	97

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os edifícios são responsáveis pelo consumo de 52% de toda a energia elétrica utilizada no país, dos quais 26,1% correspondem ao uso de eletricidade em edificações residenciais (BRASIL, 2020). A maior parte deste consumo é atribuída à equipamentos voltados para conservação de alimentos e aquecimento de água, como geladeira e chuveiro. No entanto, verifica-se uma tendência de elevação nos padrões de consumo voltados para o conforto ambiental, marcada pela intensificação do uso de ar condicionado e ventilador, os quais representam cerca de 18% do consumo de eletricidade em residências (ABRAHÃO; SOUZA, 2021).

O uso de sistemas de condicionamento passivo em edificações são a base para uma construção sustentável (AKEIBER *et al.*, 2016). Segundo Geetha e Velraj (2012), esses sistemas consistem na aplicação de processos e técnicas naturais para a prevenção, modificação ou dissipação dos ganhos de calor na edificação. Como exemplo, tem-se o uso de sombreamento em fachadas, de materiais isolantes térmicos e o aproveitamento da ventilação natural nos ambientes, devendo ser utilizados de maneira a melhor adaptar o edifício ao clima da região e ao seu microclima (GEETHA; VELRAJ, 2012).

Um dos métodos de modificação dos ganhos de calor que tem se destacado é o armazenamento de energia térmica (*Thermal Energy Storage* – TES) em elementos construtivos por meio de Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* – PCM), o que tem demonstrado grande potencial em reduzir a amplitude térmica no interior de edificações em vários países (SILVA *et al.*, 2012). Devido ao seu alto calor latente, estes materiais são capazes de armazenar ou liberar grandes quantidades de calor ao longo de variações de temperatura, ajudando a regular a temperatura interna do ar de forma passiva e sustentável. Pode-se resumir este processo da seguinte forma: à medida que a temperatura aumenta, o calor é armazenado durante a sua mudança de fase de sólido para líquido; quando a temperatura cai, o calor é dissipado durante a sua solidificação (KUZNIK *et al.*, 2011).

De modo geral, o emprego de PCM na edificação pode promover uma redução de até 4,2 °C na temperatura máxima de ambientes sob condições climáticas temperadas (CUI *et al.*, 2017). No entanto, a eficácia desses materiais depende de vários fatores, de modo a tornar fundamental a compreensão do seu desempenho térmico frente às diversas condições em que for implementado (SOARES *et al.*, 2014)

Segundo Saffari *et al.* (2017a), uma grande quantidade de estudos numéricos já foi publicada acerca da incorporação de PCMs em sistemas de vedação de edificações sob condições climáticas temperadas, nos quais apresentaram considerável potencial de economia de energia de resfriamento. No Brasil, Brito *et al.* (2017) e Pons e Stanescu (2017) demonstraram que os PCMs apresentam melhor eficácia quando empregados em regiões climáticas amenas. Entretanto, ainda há poucas referências sobre a sua utilização em edificações brasileiras.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de PCM no desempenho térmico de um projeto residencial, sob condições climáticas subtropicais, de maneira passiva. Para isso, avaliou-se o comportamento térmico de uma tipologia residencial típica naturalmente ventilada, com e sem a utilização desses materiais, por meio do procedimento de simulação computacional e do modelo adaptativo de conforto térmico descritos pelas normas NBR 15575-1:2021 e ASHRAE 55-2017, respectivamente. Adicionalmente, como resultados, investigou-se quais propriedades termofísicas destes materiais seriam mais adequadas ao clima avaliado.

1.1 PERGUNTAS DE PESQUISA

A incorporação de PCM na envoltória seria capaz de melhorar o desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas localizadas no clima subtropical brasileiro?

Quais seriam as características de sua incorporação mais adequadas para proporcionar um maior potencial de satisfação das condições de conforto térmico aos ocupantes no clima?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a viabilidade da aplicação de PCMs como alternativa de adequação da envoltória de edificações residenciais naturalmente ventiladas e na melhoria das suas condições potenciais de conforto térmico aos usuários no clima subtropical brasileiro.

1.2.2 Objetivos específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar as zonas e cidades mais adequadas para uso do PCM;

- Selecionar um PCM, disponível no mercado, com características térmicas adequadas para o clima subtropical brasileiro;
- Avaliar o potencial de melhoria do desempenho térmico propiciado por este material em uma tipologia habitacional típica brasileira;
- Analisar a influência deste sistema no desempenho térmico da edificação e nas condições de conforto térmico dos ambientes.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

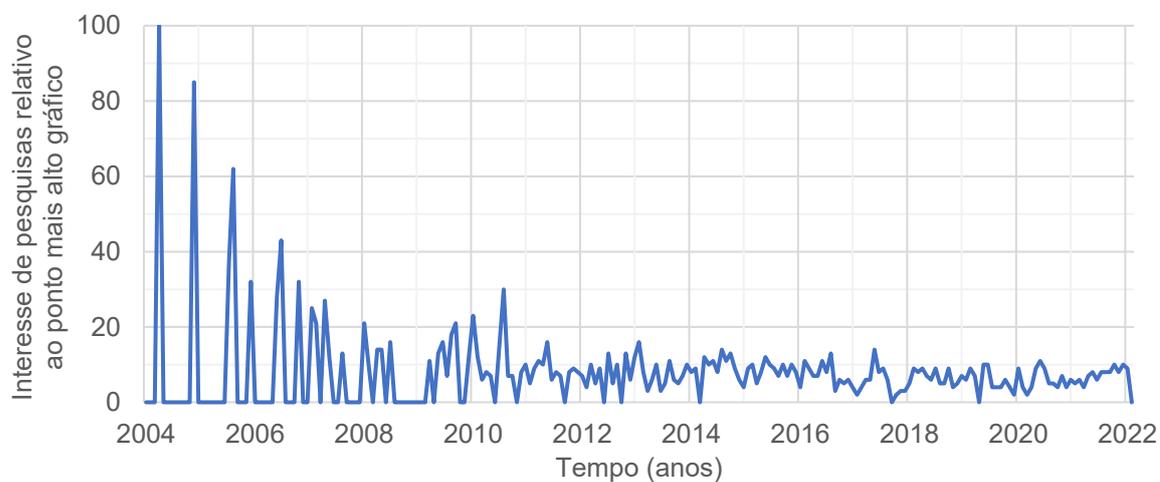
O conjunto de edifícios representa o maior setor consumidor de energia do mundo. Até o ano de 2019, foi responsável por cerca de 28% das emissões globais diretas e indiretas relacionadas ao uso de energia, das quais 17% são atribuídas ao consumo de energia em residências (GLOBAL ABC, 2019). No ano de 2008, cerca de metade do consumo energético em habitações no mundo era relacionada ao uso de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). No Brasil, o consumo elétrico voltado para conforto ambiental apresentou relevante crescimento entre 2005 e 2019, principalmente nas regiões Sudeste e Sul, com um crescimento do consumo de ar condicionado de 3,8 a 5,1 vezes. Já o consumo dos ventiladores dobrou em quase todas as regiões, salvo na região Sul, onde aumentou em aproximadamente 10 vezes (ELETROBRAS, 2019; ABRAHÃO; SOUZA, 2021). Espera-se que essa demanda aumente drasticamente até 2050, devido a fatores como o crescimento populacional e o aumento da demanda por conforto térmico nas edificações (IEA, 2013).

A concepção e construção da envoltória da edificação tem a maior influência sobre as necessidades de aquecimento e resfriamento em edifícios, especialmente ao considerar sua longa vida útil e o seus custos associados (IEA, 2022). Portanto, adequar o projeto arquitetônico ao clima é fundamental para ampliar significativamente os ganhos em racionalização de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Por outro lado, para Mavrigiannaki e Ampatzi (2016), reduzir o consumo de energia das edificações sem comprometer as necessidades de conforto térmico é outro desafio importante.

Visando o aprimoramento do desempenho térmico de edificações, as técnicas de condicionamento passivo na envoltória têm sido o principal foco de pesquisadores e projetistas, visto que auxiliam na mitigação do consumo de energia e de emissões simultaneamente (AKEIBER *et al.*, 2016). Um método eficaz e promissor para

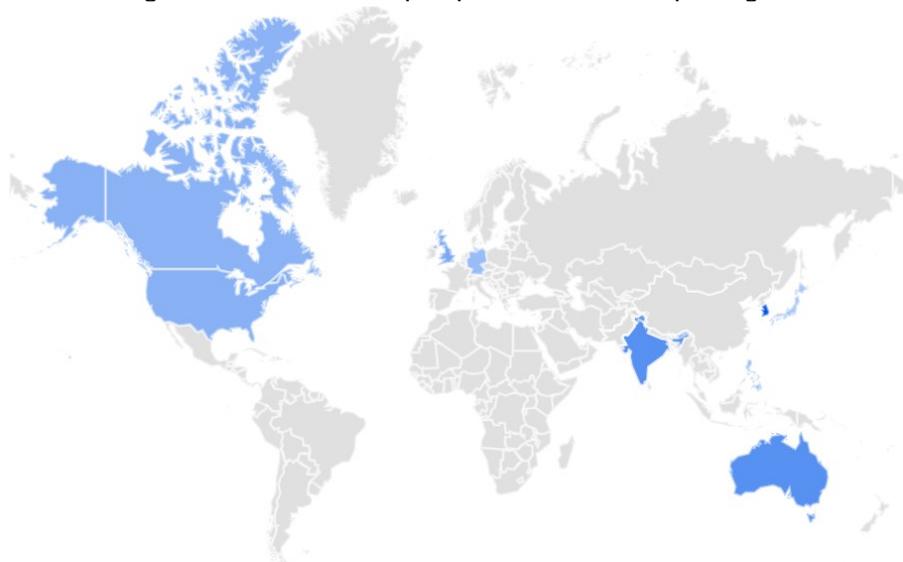
alcançar este objetivo é a incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) na construção (SOARES *et al.* 2013). A quantidade de pesquisas relativas ao uso de PCM para fornecer melhores condições de conforto térmico aos ocupantes ganhou impulso entre os anos de 2004 e 2005 e tem recebido frequente atenção em vários países durante a última década (Figura 1). Na Figura 2, observa-se a proporção de consultas sobre esta temática no mundo representada em uma escala de cores (do azul mais escuro ao mais claro), na qual destaca-se a Coreia do Sul com a maior popularidade, seguida por Hong Kong, Índia, Austrália, Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Filipinas, Alemanha e Japão (GOOGLE TRENDS, 2022).

Figura 1 – Interesse de pesquisas sobre PCM ao longo do tempo no mundo



Fonte: Google Trends (2022).

Figura 2 – Interesse de pesquisas sobre PCM por região



Fonte: Google Trends (2022).

Além disso, nota-se uma tendência de publicações internacionais voltadas para o uso de PCMs para a melhoria do desempenho térmico de edificações, conforme mostra o estudo de revisão feito por Oliveira, Gonzales e Carvalho (2021).

O emprego de PCMs é promissor para melhorar as condições de conforto térmico e o consumo de energia em edificações localizadas em regiões de clima temperado e quente. Especialmente, verifica-se que os PCMs demonstram maior eficácia na melhoria do desempenho térmico de edifícios compostos por sistemas construtivos leves, visto que apresentam baixa inércia térmica em sua configuração inicial. Apesar desses materiais estarem começando a ganhar atenção no Brasil, ainda se verifica a escassez de referências nacionais sobre o uso destes materiais no território nacional, principalmente em edificações naturalmente ventiladas. Estima-se que isto se deve possivelmente à ausência de fabricantes e à necessidade de ajustes nos atuais sistemas construtivos brasileiros, predominantemente pesados, tendo sua inércia térmica pouco afetada pela capacidade de armazenamento térmica adicional oferecida pelos PCMs (BRITO *et al.*, 2017; BRANDALISE; ALMEIDA; ORDENES, 2020; OLIVEIRA; GONZALES; CARVALHO, 2021; VIEIRA; OLIVEIRA, 2021; (LIU *et al.*, 2022).

Frente à obrigatoriedade do desempenho térmico de nível mínimo em habitações brasileiras e ao aumento da popularidade da aplicação de PCMs no mundo como estratégia de condicionamento passivo em edificações, o tema se mostra relevante para o avanço do conhecimento, ao buscar compreender o comportamento térmico de uma tecnologia de ainda pouco explorada no Brasil. Além disso, a escolha desse tema apresenta relevância prática, ao propor uma solução inovadora para a melhoria do desempenho térmico de habitações.

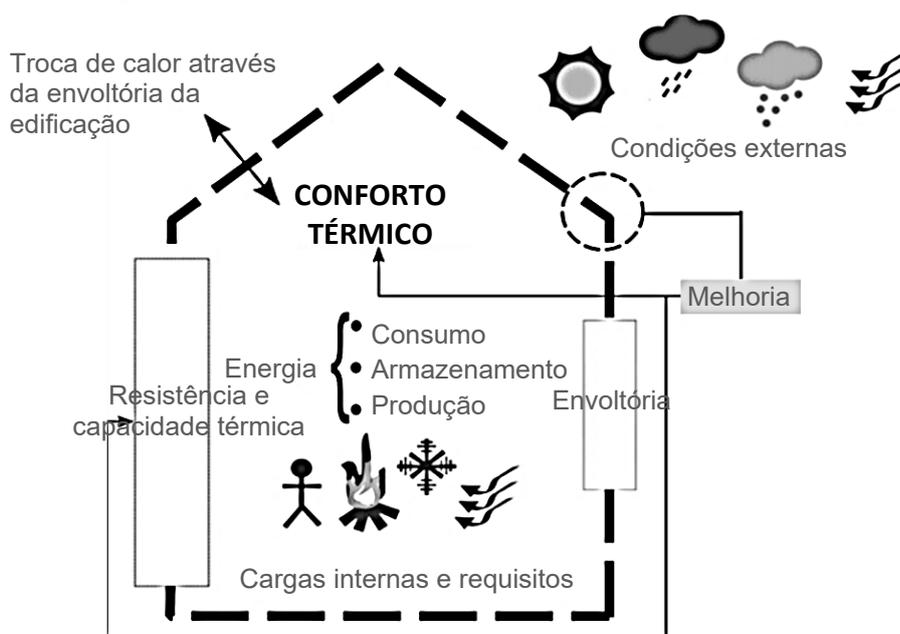
2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

O desempenho edilício pode ser entendido como o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas ao longo do seu ciclo de vida. No Brasil, a primeira norma que avalia o desempenho de sistemas construtivos de maneira global, com caráter obrigatório, é a Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, NBR 15.575. Esta norma estabelece e organiza requisitos mínimos, critérios e métodos de avaliação de desempenho dos principais sistemas que compõem as edificações, voltados para atender as necessidades de segurança, habitabilidade e sustentabilidade dos habitantes e da edificação (ABNT, 2021). A Emenda 1 à Norma relativa ao Desempenho Térmico foi publicada em março de 2021.

Isto se reflete em preocupações impostas a projetistas e engenheiros em relação à necessidade do desempenho térmico de edificações. Uma edificação pode ser entendida como um sistema termodinâmico, no qual a envoltória é o limite do sistema (Figura 3). Os ganhos de calor no interior da edificação dependem de cargas externas, provenientes de condições climáticas locais, temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar, e de cargas internas, resultado da intensidade de calor liberada pela ocupação e pelo uso de equipamentos e iluminação (SOARES *et al.*, 2013).

Figura 3 – Representação das trocas de calor em edificações



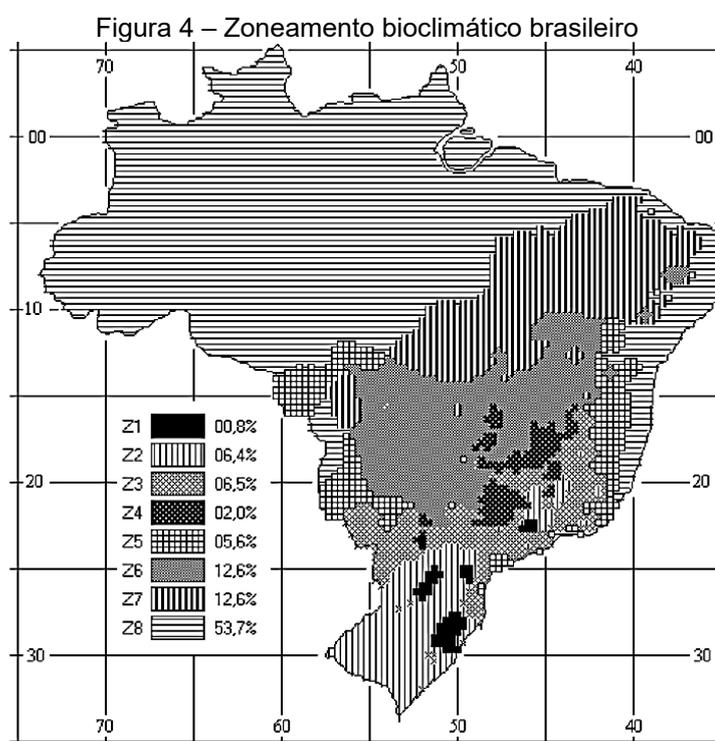
Fonte: adaptado de Soares *et al.* (2013).

Por esta razão, outras variáveis também devem ser analisadas para a implantação adequada de uma edificação, como as propriedades térmicas dos materiais de

construção empregados, a forma arquitetônica, a orientação das fachadas, os índices de aberturas, entre outras. Neste sentido, é importante que as estratégias construtivas sejam tomadas de forma integrada, a fim de prever as principais variáveis envolvidas na sensação de conforto dos usuários e a atender simultaneamente às necessidades de uso e ocupação da edificação (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Em geral, uma pessoa sente conforto térmico quando a temperatura corporal é mantida em equilíbrio, a umidade da pele é baixa e o esforço fisiológico para adaptação ao meio é minimizado (ASHRAE, 2009). Com isto, a norma internacional ASHRAE 55 (2017) estabelece o método adaptativo de avaliação das condições de conforto térmico aceitáveis aos ocupantes, restritas a uma escala quantitativa da sensação de calor e frio que varia entre $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (frio) a $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (calor), em relação à temperatura de conforto neutra.

No que tange o desempenho térmico, a NBR 15575:2021 considera o zoneamento bioclimático¹ do território brasileiro estabelecido na NBR 15220-3:2005 e estabelece procedimentos e requisitos para a avaliação da habitação para atendimento aos níveis de desempenho térmico Mínimo (M), Intermediário (I) e Superior (S) (ABNT, 2021). Na Figura 4, são mostradas as oito zonas bioclimáticas (ZBs) do Brasil.



Fonte: ABNT (2005b).

¹ “Região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre Ambiente Construído e conforto humano” (ABNT, 2005a, p. 7).

O clima subtropical brasileiro é encontrado nas ZBs 1 a 3. A primeira encontra-se na Região Sul do país, que tem o inverno mais frio e maior demanda de aquecimento. As outras duas zonas cobrem principalmente a parte sul e sudeste do país, e têm requisitos semelhantes e pronunciados para verão e inverno (ABNT, 2005b).

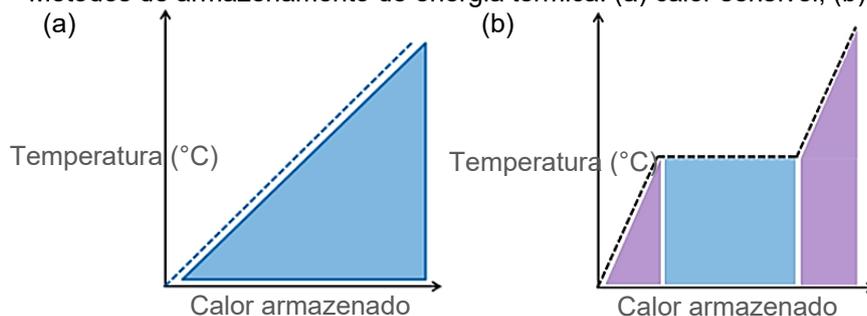
2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA EM EDIFICAÇÕES

Técnicas e sistemas construtivos eficientes podem satisfazer uma parcela significativa das necessidades de condicionamento artificial em edifícios (GEETHA; VELRAJ, 2012). Neste sentido, tecnologias inovadoras de condicionamento passivo, como os sistemas de armazenamento de energia térmica (*Thermal Energy Storage – TES*), podem ajudar a melhorar a eficiência energética de edifícios e a mitigar as emissões de CO₂ nesse setor (SAFFARI *et al.*, 2017b).

As estratégias de TES são métodos eficazes para elevar a massa térmica do envelope de edifícios, que corresponde à capacidade de um material de absorver, armazenar e liberar calor durante variações de temperatura (SHAFIGH; ASADI; MAHYUDDIN, 2018). Se aplicadas de maneira adequada ao clima, estas estratégias podem promover a absorção do calor pelo envelope e sua posterior liberação quando a temperatura externa cai, auxiliando na melhoria das condições de conforto térmico e na diminuição nos picos de carga interna nos edifícios (AKEIBER *et al.*, 2016).

A aplicação dos sistemas TES em edificações pode ser realizada por meio de calor sensível e latente, conforme indicado por Pomianowski, Heiselberg e Zhang (2013). No armazenamento de energia pelo calor sensível, a temperatura de um material varia com a quantidade de energia armazenada (Figura 5a). Por outro lado, pelo calor latente, a energia armazenada em uma substância é utilizada para a mudança de uma fase para outra (como do gelo à água, por exemplo), mantendo a temperatura constante (Figura 5b) (HASNAIN, 1998).

Figura 5 – Métodos de armazenamento de energia térmica: (a) calor sensível; (b) calor latente



Fonte: adaptado de Gracia e Cabeza (2015).

Segundo Gracia e Cabeza (2015), o método por calor sensível é mais simples, o qual consiste em aplicar um gradiente de temperatura a um meio sólido ou líquido para acumular ou liberar calor. Construções mais pesadas, como por exemplo o concreto e alvenaria, tendem a armazenar mais calor do que construções mais leves, como estruturas de aço ou madeira, visto que a capacidade de armazenamento térmico varia de acordo com o calor específico, com a massa e a composição dos materiais construtivos empregados na envoltória (KUZNIK *et al.*, 2011).

Apesar de o armazenamento de calor sensível ser mais comum e barato nas construções, as tecnologias de armazenamento de calor latente (*Latent Heat Storage* – LHS) têm se destacado devido a sua facilidade de aplicação e maior capacidade térmica, demandando assim um volume muito menor de material para armazenar a mesma quantidade de energia (MOHAMED *et al.*, 2017).

Neste contexto, LHS que têm ganhado atenção na literatura são os Materiais de Mudança de Fase (PCM), devido ao seu potencial de aumentar a massa térmica de edifícios sem exigir mudanças drásticas nas técnicas construtivas atuais (NGHANA; TARIKU, 2016). Em comparação aos materiais de construção convencionais, que podem armazenar calor sensível ao longo de variações de temperatura, um volume muito menor de PCM é necessário para armazenar a mesma quantidade de energia por meio de calor latente ao longo de suas mudanças de fase (SOARES *et al.* 2013). Segundo Sharma *et al.* (2009), os PCMs são capazes de armazenar de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume do que materiais convencionais, como água, alvenaria ou rocha.

Nos Estados Unidos, por exemplo, Desai *et al.* (2014) verificaram experimentalmente que a inclusão de 3% de PCM à base de parafina em um compósito cimentício ampliou em 40% a capacidade térmica de fachadas. Na Coreia do Sul, Park *et al.* (2020) demonstraram por meio de simulação que a inclusão de 30% de PCM parafínico no reboco externo de uma casa poderia atenuar a perda de calor por transmissão térmica na camada da parede em até cinco vezes e proporcionar uma economia anual de energia de até 8%.

2.3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

O princípio do PCM é bem simples: à medida que a temperatura aumenta, o PCM muda de fase de sólido para líquido (Figura 6). Por ser um processo endotérmico, o calor é armazenado pelo material. Quando a temperatura cai, o PCM muda de fase

do líquido para o sólido. Por ser uma reação exotérmica, o calor é dissipado (KUZNIK *et al.*, 2011).

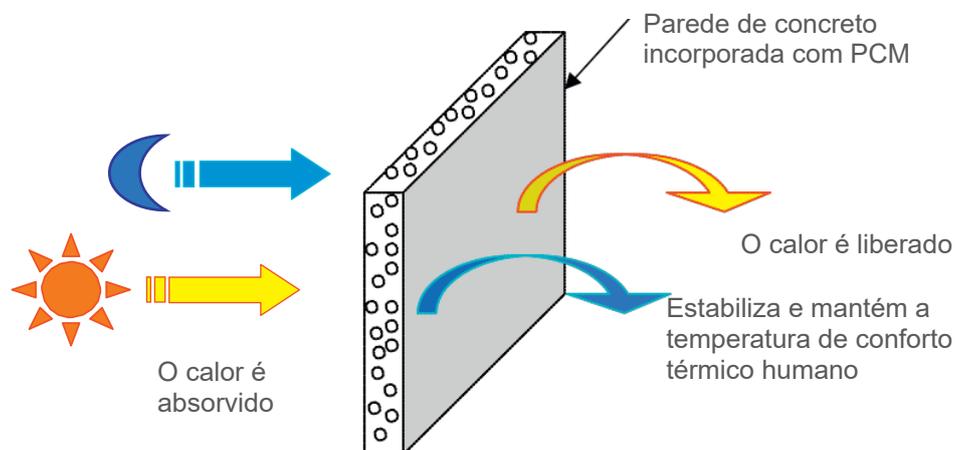
Figura 6 – PCM em diferentes fases



Fonte: Lira (2018).

Durante as mudanças de fase, sua temperatura permanece praticamente constante, pois a energia térmica é armazenada como energia potencial (MOHSENI; TANG, 2021). Assim, quando empregados em edifícios, os PCMs derreterão durante o dia e solidificarão durante a noite, ajudando a reduzir as flutuações de temperatura ambiente entre o dia e a noite e a atrasar a onda de calor no interior do edifício (Figura 7) (KALNÆS; JELLE, 2015; CABEZA; CHÀFER, 2020).

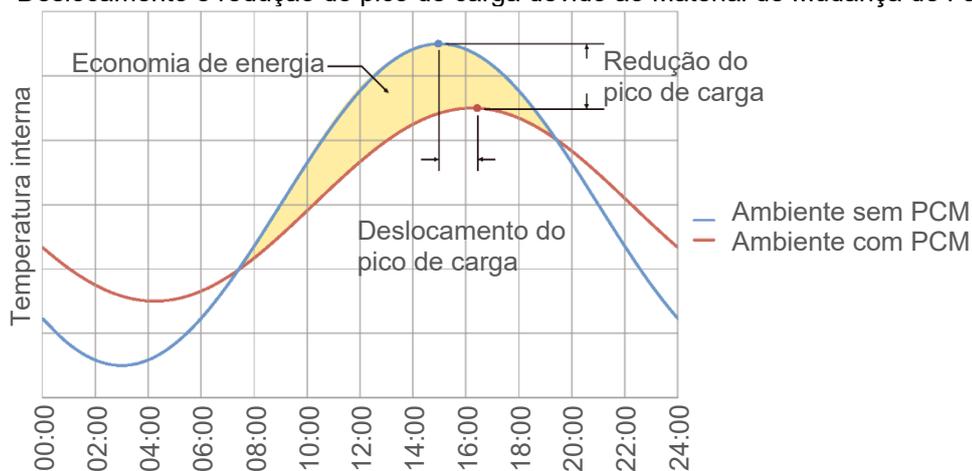
Figura 7 – Parede com PCM para manutenção da temperatura ambiente em conforto térmico



Fonte: adaptado de Ling e Poon (2013)

Como resultado, pode-se propiciar melhores condições de conforto térmico aos usuários, reduzindo o superaquecimento dos ambientes nos meses mais quentes e a necessidade de aquecimento nos meses mais frios (KALNÆS; JELLE, 2015; CABEZA; CHÀFER, 2020). Na Figura 8, é ilustrado como o pico de carga energética pode ser reduzido e deslocado pelo uso dos PCMs na edificação.

Figura 8 – Deslocamento e redução do pico de carga devido ao Material de Mudança de Fase (PCM)

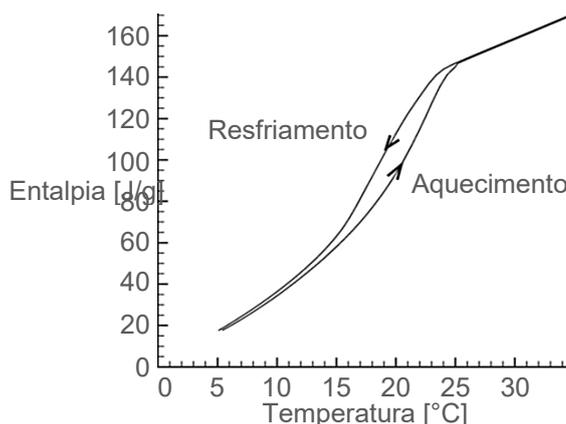


Fonte: adaptado de Tate (2012).

2.3.1 Mecanismos e propriedades

O processo de funcionamento de um PCM ocorre por ciclos de derretimento e solidificação. A diferença entre os valores de entalpia de fusão e solidificação correspondentes a um mesmo valor de temperatura para resfriamento e aquecimento constitui a histerese do PCM (DIACONU; VARGA; OLIVEIRA, 2010), conforme exemplificado na Figura 9. Este fenômeno é de extrema importância e deve ser levado em consideração para prever corretamente a transferência de calor dos PCMs, conforme constatado por Kuznik e Virgone (2009).

Figura 9 – Curva de entalpia de um PCM apresentando histerese



Fonte: adaptado de Kuznik e Virgone (2009).

Neste contexto, Schröder e Gawron (1981) e Abhat (1983) listam outras propriedades e critérios essenciais para um armazenamento de calor latente confiável e eficiente, resumidos no Quadro 1:

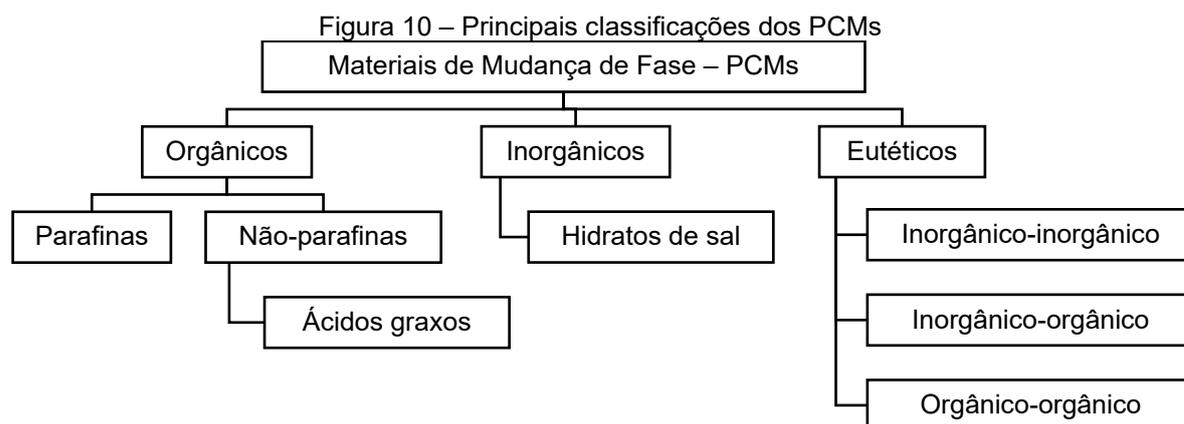
Quadro 1 – Principais propriedades desejadas para a seleção de PCMs

Critérios	Propriedades desejadas
Térmicos e físicos	<ul style="list-style-type: none"> - Ponto de fusão adequado à temperatura operativa de aplicação. - Alto calor de fusão por unidade de volume e peso (para aumentar a capacidade de armazenamento e reduzir a quantidade de material necessária). - Alta densidade e baixo aumento de volume durante a mudança de fase (para evitar a degradação do material que armazena o PCM). - Alto calor específico (para permitir maior capacidade de armazenamento de calor sensível adicional). - Alta condutividade térmica (para reduzir a faixa de temperatura para carga e descarga do material). - Liquefação ou solidificação congruente (completa), visando evitar diferença entre as densidades e a segregação que afetam na composição e eficiência do material.
Cinéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Alta taxa de nucleação e de crescimento dos cristais durante a solidificação (para reduzir o efeito de <i>supercooling</i>²).
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> - Reprodutibilidade dos ciclos de cristalização, sem degradação. - Estabilidade química e baixa corrosão com outros materiais construtivos. - Segurança ao fogo e à saúde humana (não tóxico, não inflamável e não explosivo).
Econômicos	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidade em grandes quantidades e baixo custo.

Fonte: adaptado de Schröder e Gawron (1981), Abhat (1983) e Zhang *et al.* (2007).

2.3.2 Classificações

Existe uma grande variedade de PCMs no mercado. Segundo Abhat (1983), os PCMs podem ser classificados em três grandes grupos baseados em sua composição química: orgânicos, inorgânicos ou eutéticos (mistura de dois ou mais PCMs entre os dois primeiros grupos). Esta classificação permanece assim até hoje e está detalhada na Figura 10.



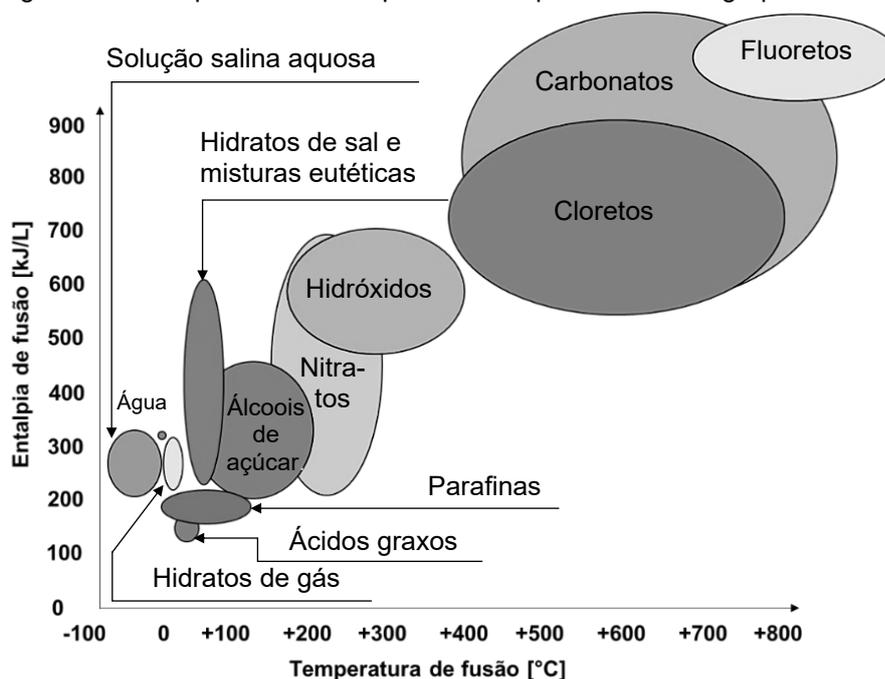
Fonte: adaptado de Rathod e Banerjee (2013).

Várias substâncias têm sido estudadas como possíveis candidatas para uso como PCM, mas apenas algumas são comercializados para este fim (CABEZA *et al.*, 2011).

² Fenômeno no qual o PCM permanece na fase líquida quando a temperatura cai abaixo da temperatura de fusão e a solidificação começa mais tarde, com o aumento repentino da temperatura do material para a temperatura de mudança de fase (KUZNIK *et al.*, 2011).

Cada tipo apresenta vantagens e limitações, de modo que a análise desses aspectos é essencial para selecionar um PCM adequado aos requisitos de sua aplicação (GRACIA; CABEZA, 2015). Assim, na Figura 11, exibe-se uma relação entre faixas de temperatura e entalpia de fusão de diferentes classes de materiais com este potencial, que são fatores determinantes do desempenho térmico de PCMs (BRITO *et al.*, 2017).

Figura 11 – Temperatura e entalpia de fusão para diferentes grupos de PCM



Fonte: adaptado de Cabeza *et al.* (2011 *apud* CABEZA, 2005; MEHLING; CABEZA, 2008).

A maioria dos PCMs comerciais para aquecimento ou resfriamento doméstico está disponível na faixa de temperatura de fusão de 0 a 60 °C, conforme verificado por Agyenim *et al.* (2010). No entanto, segundo Khudhair e Farid (2004), apenas aqueles com temperatura de mudança de fase próxima à temperatura de conforto humano (~20 °C) podem ser aplicados no envelope de edifícios.

2.3.2.1. PCMs Orgânicos – Parafinas

As parafinas (Figura 12) consistem principalmente de n-alcanos hidrocarbonetos de cadeia linear (C_nH_{2n+2}) (ABHAT, 1983). Elas constituem os PCMs comerciais mais utilizados, podendo apresentar temperatura de fusão entre -12 a 71 °C, dependendo do tamanho da cadeia carbônica da molécula, e densidade de armazenamento térmico de 190 a 260 kJ/kg. Estes compostos não sofrem degradação quanto ao desempenho térmico ao longo dos ciclos térmicos, mas apresentam baixa condutividade térmica (cerca de 0,2 W/m.K), mudança de volume relativamente

grande ao longo das mudanças de fase e são inflamáveis (FARID *et al.*, 2004; RATHOD; BANERJEE, 2013).

Figura 12 – PCMs orgânicos parafínicos em diferentes estados



Fonte: Rubitherm (c2023).

2.3.2.2. PCMs orgânicos – Ácidos graxos

Os ácidos graxos são compostos por hidrocarbonetos do tipo $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ (ABHAT, 1983). Os ácidos graxos podem apresentar pontos de fusão entre 7,8 e 187,0 °C e calor de fusão entre 130 e 250 kJ/kg (RATHOD; BANERJEE, 2013). Comparados às parafinas, são significativamente menos inflamáveis e apresentam pequenas mudanças de volume durante a transição de fase (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; JEONG *et al.*, 2013). Porém, custam cerca de 2 a 3 vezes mais e são levemente corrosivos, segundo Akeiber *et al.* (2016).

Conhecidos como *Biobased* PCMs, eles se destacam no grupo dos PCMs não-parafínicos por possuírem fonte biológica renovável e reduzida pegada carbônica associada à sua produção (OKOGERI; STATHOPOULOS, 2021). Sua matéria-prima pode ser proveniente de subprodutos da indústria alimentícia de origem animal ou vegetal, como os óleos de soja, de coco, de palma (azeite de dendê) e sebo bovino (JEONG *et al.*, 2013), conforme mostrado na Figura 13. Por serem totalmente hidrogenados, são capazes de permanecer estáveis por milhares de ciclos de mudança de fase, sem risco de oxidação (KOSNY *et al.*, 2012).

Figura 13 – PCM orgânico à base de gorduras vegetais



Fonte: Boussaba *et al.* (2021).

O Brasil é um grande produtor de soja, mamona e palmeiras, produtos ricos em ácidos graxos, principalmente do tipo oleico e ricinoleico. Por este motivo, Lira (2018) analisou as propriedades térmicas dos óleos de coco, de polpa e semente de pequi e de palma, além da banha de porco e da mistura do óleo de pequi com ácido Ricinoleico. Os resultados de seu estudo mostraram que o óleo de coco possui o maior potencial de uso como *Biobased* PCM em edificações no Brasil por apresentar as propriedades térmicas mais adequadas para o armazenamento térmico em edificações (LIRA, 2018).

2.3.2.3. PCMs inorgânicos – Hidratos de sal

Segundo Soares *et al.* (2013), a maioria dos PCMs inorgânicos para aplicações passivas em edificações são de sais hidratados. Sua fórmula química é caracterizada por $M \cdot nH_2O$, onde M é um composto inorgânico. Como exemplo, tem-se o $Na_2SO_4 \cdot H_2O$, conhecido como sal de Glauber (ABHAT, 1983).

Os hidratos de sal (Figura 14) se destacam devido à sua alta densidade de armazenamento volumétrico (350 MJ/m^3), maior condutividade térmica (cerca de $0,5 \text{ W/m.K}$) e custos moderados em relação às parafinas (FARID *et al.*, 2004; AKEIBER *et al.*, 2016). Podem apresentar pontos de fusão entre 11 e 120°C e calor de fusão entre 100 e 200 kJ/kg (RATHOD; BANERJEE, 2013). Porém, estes compostos são corrosivos à maioria dos metais, além de sua aplicação ser restrita devido a problemas como *supercooling* e segregação de fase, necessitando de medidas para eliminar ou minimizar estes problemas (ABHAT, 1983; BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

Figura 14 – PCM de cloreto de cálcio hexahidratado em temperatura ambiente



Fonte: Evers, Medina e Fang (2010)

2.3.2.4. PCMs eutéticos

Os PCMs eutéticos consistem na mistura de compostos orgânicos e inorgânicos com o intuito de ajustar a temperatura de fusão/solidificação à aplicação desejada e

conter o efeito de *supercooling* (ZHANG *et al.*, 2007; KONG *et al.*, 2013). Eles apresentam pontos de fusão entre 4 e 93°C e calor de fusão entre 100 e 230 kJ/kg (RATHOD; BANERJEE, 2013). Como vantagens, oferecem fusão congruente sem segregação de fase, temperatura de fusão aguda, sem histerese, e densidade de armazenamento volumétrico ligeiramente maior do que a dos compostos orgânicos. Contudo, apresentam altos custos de produção e disponibilidade limitada de informações sobre suas propriedades termofísicas (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; SHARMA *et al.*, 2009; AKEIBER *et al.*, 2016).

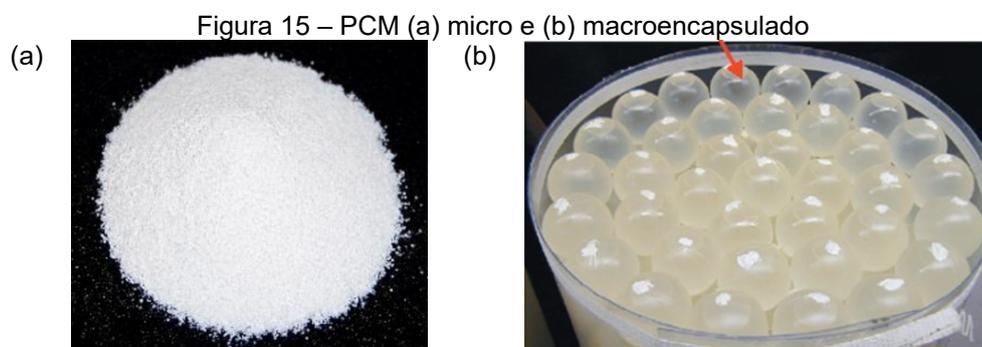
Convém ressaltar que alguns ácidos graxos eutéticos podem apresentar odor forte, limitando sua aplicação em painéis de parede (KENISARIN; MAHKAMOV, 2007). Não obstante, testes realizados por Feldman e Banu (1996) em amostras de painéis desse tipo de PCM demonstraram que o odor poderia ser quase totalmente eliminado ao mantê-los à temperatura de 93 °C por várias horas. Além disso, o odor pode ser neutralizado pela utilização de produtos desodorizantes (FELDMAN; BANU; HAWES, 1995). Uma outra opção para esse problema é o processo de esterificação, que consiste na reação entre álcool e ácidos resultando em ésteres e água (LIRA, 2018). Dentre as vantagens dessa técnica, que visa o controle de temperatura de mudança de fase de bioPCMS, tem-se a obtenção de cadeias carbônicas inodoras e não oxidantes com baixas temperaturas de fusão (YUAN *et al.*, 2014).

2.3.3 Métodos de incorporação

A aplicação do PCM na construção civil varia conforme o tipo de impregnação dos PCMs em materiais de construção, que pode ser feita por meio de diferentes técnicas. Hawes, Feldman e Banu (1993) consideram a incorporação direta, impregnação e o encapsulamento como os três principais métodos.

Os dois primeiros métodos são mais simples. O primeiro consiste na incorporação direta de PCM na produção de materiais construtivos convencionais, como gesso, concreto e argamassa. No segundo, materiais de construção porosos, como placas de gesso, blocos cerâmicos ou de concreto, são imersos no PCM derretido, absorvendo-o por ação capilar (ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012). Contudo, ambos os métodos podem exibir vazamentos do PCM durante as mudanças de fase e incompatibilidade com materiais de construção, o que pode deteriorar suas propriedades mecânicas a longo prazo (SOARES *et al.*, 2013).

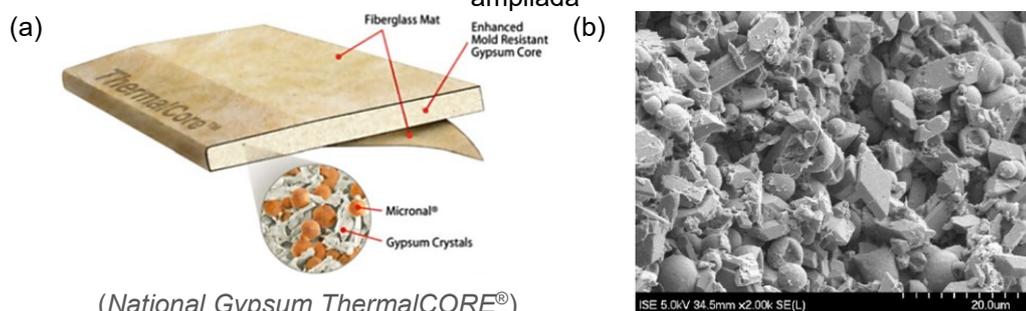
O terceiro método é o encapsulamento, que pode ser classificado como micro (Figura 15a) ou macroencapsulamento (Figura 15b) e deve ser projetado de modo a evitar a ocorrência de vazamentos e corrosão do PCM (GRACIA; CABEZA, 2015).



Fonte: Rubitherm (c2023); Waqas e Din (2013).

Segundo Tyagi *et al.* (2011), o microencapsulamento consiste em envolver partículas individuais de PCM em cápsulas microscópicas de material polimérico. Em seguida, o PCM microencapsulado pode ser facilmente incluído na mistura de um material de construção, como concreto, argamassa, painéis de parede (Figura 16), mármores industriais, tintas e outros revestimentos. Esta técnica é eficaz para a contenção dos PCMs, pois controla o seu volume ao longo da mudança de fase, aumenta a área de transferência de calor (devido ao tamanho das partículas) (TYAGI *et al.*, 2011) e pode reduzir problemas como *supercooling* e segregação (KHUDHAIR; FARID 2004). Porém, Khudhair e Farid (2004) notaram que esta técnica pode afetar a resistência mecânica da construção.

Figura 16 – Painel de gesso contendo PCM microencapsulado em foto (a) esquemática e (b) ampliada



Fonte: Zhou, Zhao e Tian (2012); Schossig *et al.* (2005).

O macroencapsulamento compreende a contenção de PCM em contêineres, tubos, esferas, painéis (Figura 17a), folhas de alumínio ou outros receptáculos, e então inseridos em elementos de construção (Figura 17b) (KHUDHAIR; FARID, 2004). Na Figura 17(c), exemplifica-se a aplicação dos três métodos de incorporação citados

desenvolvida por Mohseni, Tang e Wang (2019). Primeiramente, o agregado leve de escória foi impregnado por PCM. Em seguida, o material foi macroencapsulado por uma camada de resina epóxi, para prevenir o vazamento do PCM, e outra de sílica ativa, para melhorar a coesão entre o agregado revestido e a matriz cimentícia. Por fim, o material foi incorporado diretamente no concreto.

Figura 17 – PCM macroencapsulado em (a) módulo de alumínio, (b) alvenaria e (c) agregado leve



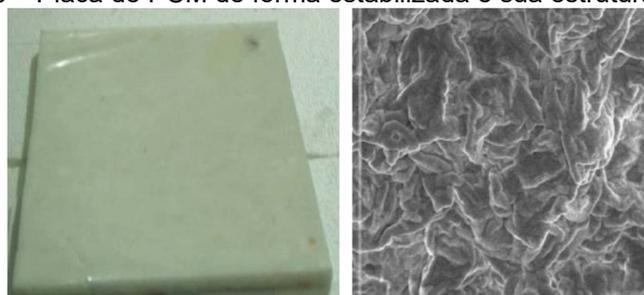
(Rubitherm® CSM)

Fonte: Rubitherm (c2023); Silva *et al.* (2012); Mohseni, Tang e Wang (2019).

Os PCMs macroencapsulados são empregados na maioria dos estudos devido às suas vantagens, como custo razoável de aquisição e facilidade de aplicação (AKEIBER *et al.*, 2016). No entanto, segundo Soares *et al.* (2013), esse processo pode resultar na perda da resistência da construção e em problemas de inflamabilidade dos PCMs. Além disso, o macroencapsulamento pode diminuir a taxa de transferência de calor durante o processo de solidificação, levando a processos incompletos de descarga do PCM durante a noite (KALNÆS; JELLE, 2015). Segundo Schossig *et al.* (2005), outra desvantagem é que o tamanho das macro cápsulas pode gerar a necessidade de protegê-las contra perfurações futuras (como pregos) para evitar vazamentos, o que pode tornar a sua integração mais cara na construção.

Adicionalmente, há os PCMs de forma estabilizada (Figura 18), cuja produção consiste na mistura líquida do PCM (como a parafina) em um material de suporte (como o polietileno de alta densidade), que em seguida é resfriada até se tornar sólida (KUZNIK *et al.*, 2011).

Figura 18 – Placa de PCM de forma estabilizada e sua estrutura cristalina



Fonte: Zhang *et al.* (2006)

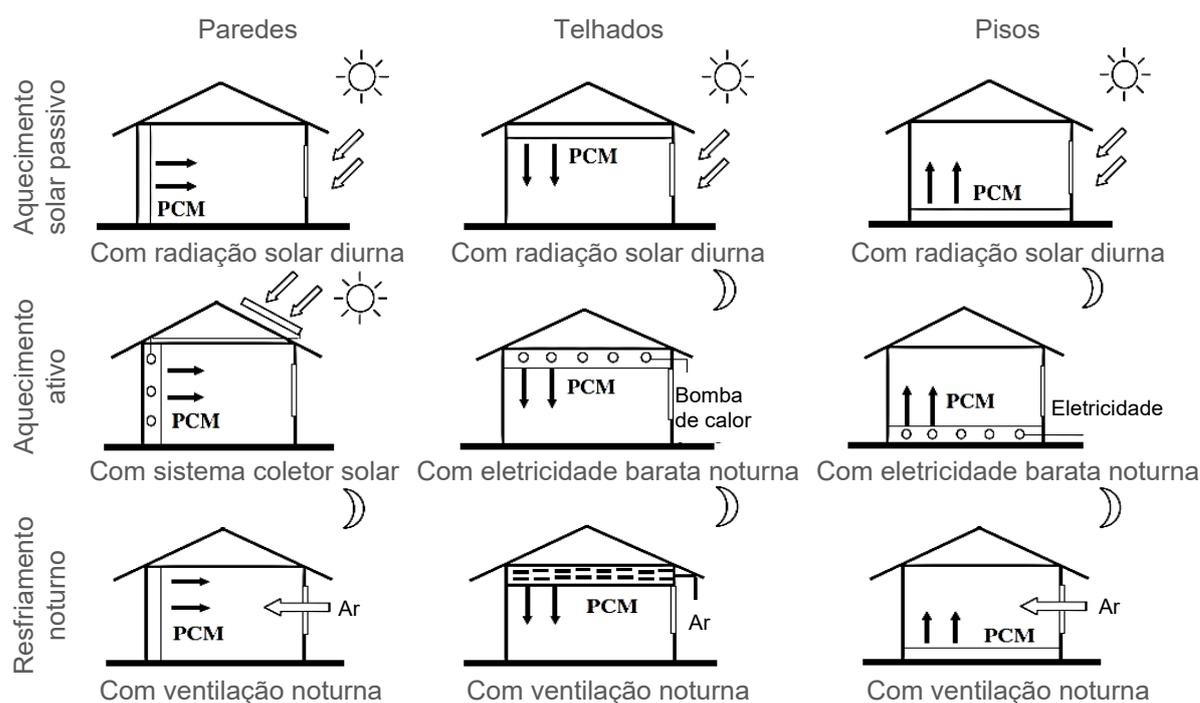
Os PCMs de forma estabilizada se destacam devido as suas melhores propriedades de calor específico aparente, condutividade térmica, capacidade de manter a forma estabilizada e bom desempenho perante múltiplos ciclos térmicos a longo prazo (ZHANG *et al.*, 2006). Ademais, sua forma permite simplicidade de aplicação como revestimento interno de tetos, paredes e pisos, sem a necessidade de dispositivos para encapsular o PCM (ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012).

Segundo Suresh, Kumar Hotta e Saha (2022), o micro/nano encapsulamento e a estabilização de forma são as técnicas de encasulamento mais eficazes quanto ao desempenho térmico em comparação com as técnicas de macroencasulamento e impregnação, devido às suas vantagens como maior transferência de calor, sem vazamentos, e à melhor resistência à corrosão.

2.3.4 Aplicações em edifícios

Os PCMs podem ser incorporados em paredes, telhados, tetos e pisos, bem como em vidros, brises, persianas e venezianas, para aquecimento ou resfriamento passivo de edificações (POMIANOWSKI; HEISELBERG; ZHANG, 2013). Além disso, os PCMs podem ser utilizados em sistemas ativos de AVAC para melhorar a eficiência energética desses sistemas (ZHANG *et al.*, 2007). Algumas formas dessas aplicações estão exemplificadas na Figura 19.

Figura 19 – Formas de aplicação do PCM no envelope de construção



Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2007, *apud* MARCO, 2005).

A incorporação de PCM em elementos construtivos pode oferecer outros benefícios além das melhorias na capacidade térmica. Quando impregnados em concreto ou argamassa, podem auxiliar na diminuição da densidade e peso da estrutura do edifício (DE GRACIA; CABEZA, 2015). Incorporados em elementos transparentes e de sombreamento, podem minimizar ganhos e perdas significativos de calor pelas janelas (POMIANOWSKI; HEISELBERG; ZHANG, 2013). Além disso, podem ser incorporados em materiais de isolamento térmico de sistemas de vedação, melhorando o desempenho de isolamento e promovendo a eficiência energética em edifícios (GRACIA; CABEZA, 2015).

Painéis de gesso são bastantes adequados para incorporar PCM a paredes de edifícios, por serem baratos e amplamente comuns em construções leves (ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012). No entanto, Soares *et al.* (2014) apontam que vários fatores afetam na eficácia dos PCMs, como seu volume e propriedades termofísicas, sua temperatura de mudança de fase e capacidade de calor latente, as características arquitetônicas e construtivas do edifício, as condições climáticas locais, as cargas internas da edificação e uso de sistemas AVAC.

2.3.4.1. Potenciais, desafios e oportunidades

Segundo Soares *et al.* (2013), os sistemas LHS passivos com PCM possuem grande potencial para contribuir no aumento das horas em conforto térmico nos ambientes, melhorar o desempenho térmico e eficiência energética de sistemas construtivos, minimizar e atrasar o pico de consumo de energia para aquecimento e resfriamento bem como reduzir emissões de CO₂ associadas. Para Soares *et al.* (2013), as grandes necessidades de habitação (nos países emergentes) e de renovação térmica de edifícios (nos países desenvolvidos) representam grandes oportunidades para o desenvolvimento de soluções construtivas com PCMs.

No entanto, alguns desafios ainda precisam ser superados para a sua implementação em larga escala. Gracia e Cabeza (2015) destacam a importância de reduzir o custo e aumentar a compactação, a densidade de armazenamento de energia e a baixa condutividade térmica desses materiais e sistemas. Esta última, segundo Zhou, Zhao e Tian (2012), pode impossibilitar a utilização de todo o calor latente ou o descarregamento completo do PCM durante a noite.

Várias soluções foram propostas para melhoria do desempenho destes sistemas, sintetizadas por Pomianowski, Heiselberg e Zhang (2013), bem como por Souayfane, Fardoun e Biwole (2016). Destacam-se como exemplo:

- (i) o aprimoramento da condutividade térmica, por meio do uso de aditivos (como cobre e grafite) e contêineres metálicos;
- (ii) a melhoria da transferência de calor na superfície, pelo aumento da área superficial ou pela aplicação de PCM em materiais porosos;
- (iii) a melhoria da transferência de calor por convecção, por meio de métodos mais eficazes de encapsulamento e pelo uso de ventilação forçada;
- (iv) pelo uso de estratégias adequadas de controle de temperatura, etc.

Outros desafios identificados por Kalnæs e Jelle (2015) foram a necessidade de mais soluções para o problema da baixa resistência dos PCMs orgânicos contra incêndios, bem como de métodos padronizados para identificar e testar PCM adequados para situações e condições climáticas específicas.

Ademais, Akeiber *et al.* (2016) consideram a falta de métodos de análises de custo e avaliações econômicas outras lacunas importantes, uma vez que estes materiais ainda são relativamente novos e caros. Porém, a maioria das aplicações reais dos PCMs ainda estão na escala de testes laboratoriais, conforme demonstrado por Kenisarin e Mahkamov (2016).

Deste modo, a modelagem numérica está se tornando cada vez mais popular para fornecer evidências precisas sobre as melhorias econômicas e ambientais desses sistemas (ALAM *et al.*, 2014; MARIN *et al.*, 2016).

2.3.5 Simulações numéricas

Centenas de ferramentas de simulação de energia de edifícios e sistemas já foram desenvolvidas para fornecer indicadores-chave de desempenho de construção, como uso e demanda de energia, temperatura, umidade e custos (CRAWLEY *et al.*, 2008). No entanto, poucos desses programas são capazes de simular o desempenho térmico do envelope de edifícios com o emprego de PCM (AL-SAAD; ZHAI, 2013). Dentre eles, destacam-se o EnergyPlus®, o TRNSYS e ESP-r pela sua versatilidade e confiabilidade (IBÁÑEZ *et al.*, 2005). Segundo Saffari *et al.* (2017a), o *software* EnergyPlus® é a ferramenta mais importante para investigar o efeito do resfriamento passivo do PCM em edifícios e amplamente utilizado em pesquisas. Por este motivo,

e por ser um *software* de livre acesso, ele foi escolhido no presente estudo para auxiliar no cumprimento do objetivo proposto.

2.3.5.1. EnergyPlus®

O EnergyPlus® é um importante *software* de modelagem do desempenho de energia de edifícios, desenvolvido pelo Departamento de Energia (DOE) nos EUA e validado pela norma ASHRAE *Standard 140-2011: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* (ASHRAE, 2012).

O *software* consiste em códigos modulares estruturados em entradas e saídas orientadas a objetos e configuráveis como sub-rotinas pelo usuário, permitindo a simulação integrada, simultânea e personalizada de sistemas relacionados à energia do edifício (CRAWLEY *et al.*, 2000). Dentre eles, incluem-se os sistemas AVAC, de água quente, iluminação, geração de energia local, sistemas mecanizados para dispositivos de fachadas e materiais de construção avançados, tais como o PCM (ELLIS; TORCELLINI; CRAWLEY, 2007).

Outros recursos fornecidos pelo *software* são cálculos simultâneos de equilíbrio de calor e análises de fenestração e infiltração avançada (CRAWLEY *et al.*, 2000). O EnergyPlus® também oferece algoritmos avançados de estimativa das condições de conforto térmico nos ambientes para modelar a qualidade do ar interno e a saúde dos ocupantes, bem como emissões ambientais e avaliação econômica desenvolvida, incluindo custos de energia e do ciclo de vida (CRAWLEY *et al.*, 2008).

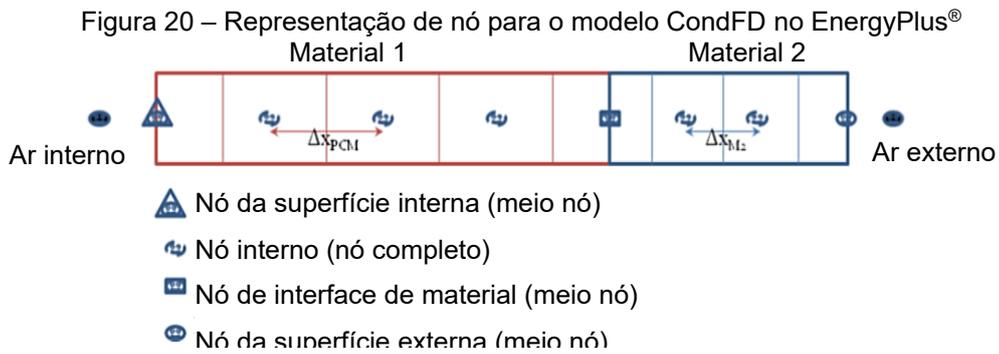
2.3.5.1.1. Modelagem numérica dos PCMs

Para simular materiais de construção com propriedades variáveis no envelope do edifício, tal como os Materiais de Mudança de Fase, o EnergyPlus® utiliza o algoritmo de solução de Diferença Finita de Condução unidimensional (*Conduction Finite Difference – ConDFD*) (TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012). Este algoritmo varia dinamicamente as propriedades térmicas dos PCMs com base em uma relação de entalpia e temperatura fornecidas pelo usuário (NGHANA; TARIKU, 2016).

Existem duas formulações de transferência de calor dentro deste modelo, Crank-Nicholson ou totalmente implícita, as quais podem ser selecionadas pelo usuário como objeto de entrada no EnergyPlus®. Segundo Hoffman (2001), a vantagem do esquema Crank-Nicholson consiste no seu baixo erro de truncamento ao lidar com soluções que necessitem precisão de tempo. Quanto ao esquema totalmente implícito, apresenta

maior estabilidade ao lidar com intervalos de tempo relativamente grandes e fornece maior flexibilidade numérica em relação ao de Crank-Nicholson (DOE, 2020a).

Para ambos os esquemas, o algoritmo CondFD discretiza os elementos da camada de superfície do envelope em vários pontos nodais (vide Figura 20) e resolve numericamente as equações de transferência de calor para cada nó (DOE, 2020a).



Fonte: DOE (2020a). Tradução nossa.

O número de pontos nodais é definido com base no espaçamento de nó de cada camada (Δx), que depende de uma constante de discretização do espaço (C), da difusividade térmica do material (α) e do intervalo de tempo (Δt) de acordo com a Equação 1 (DOE, 2020a).

$$\Delta x = \sqrt{C \cdot \alpha \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Após determinar o espaçamento dos nós de cada camada (Δx), o EnergyPlus® determina o número inteiro real de nós (N) pela divisão entre a espessura da camada do material (L) pelo espaçamento dos nós (Δx), conforme a Equação 2. Em seguida, o valor de N é arredondado para um valor inteiro e o valor de Δx é recalculado pela Equação 3 (DOE, 2020a).

$$N = \frac{L}{\Delta x} \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad | \quad N \in \mathbb{N} \quad (3)$$

Na sequência, as entalpias de nó são atualizadas em cada nova iteração de tempo e então utilizadas para desenvolver o calor específico equivalente do material, devido ao processo de mudança de fase, por meio da inclusão da Equação 4 (DOE, 2020a).

$$C_{p,eq}(t) = \frac{h_{i,new} - h_{i,old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (4)$$

Onde:

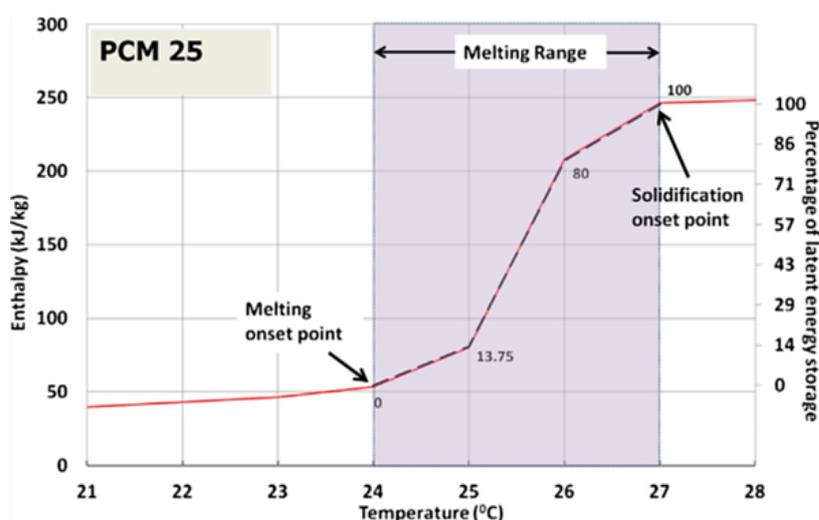
C_p = calor específico equivalente do material [kJ/kg.K];

h = entalpia do nó [kJ/kg];

t = temperatura do Nó [° C]

Para isso, a relação de entalpia e temperatura do PCM, já determinada experimentalmente ou fornecida pelo fabricante, deve ser introduzida no modelo CondFD para contabilizar o calor específico do material em função da temperatura, conforme mostrado na Figura 21. Seguindo todos esses procedimentos, o PCM pode ser modelado no EnergyPlus® como uma camada separada de material e, em seguida, anexado a quaisquer componentes de construção no edifício (AUZEBY *et al.*, 2016).

Figura 21 – Exemplo de relação entalpia-temperatura de um PCM



Fonte: Ramakrishnan *et al.* (2016).

2.3.5.1.2. Validação

A validação é uma etapa essencial para fornecer resultados confiáveis a respeito da transferência de calor e o conforto térmico de edifícios simulados. De acordo com Al-Saadi e Zhai (2013), o algoritmo CondFD do EnergyPlus® é um dos modelos mais utilizados e validados para avaliar o comportamento térmico de PCMs. No entanto, vale a pena mencionar que, antes de 2012, este modelo apresentou alguns resultados irracionais para o fluxo de calor e a distribuição de temperatura de elementos de vedação horizontal em relação a medições experimentais (SHRESTHA *et al.*, 2011).

Por isto, o algoritmo CondFD e o módulo de PCM no *software* EnergyPlus® foi verificado e validado por diversos pesquisadores e pela equipe do EnergyPlus® com base em vários conjuntos de testes (verificação analítica, teste comparativo e validação empírica). Após extenso estudo de comparação entre os modelos energéticos contra resultados experimentais, obteve-se a versão “v 7.1”, também chamada de “v 8”, que inclui o modelo CondFD totalmente validado e corrigido (TABARES-VELASCO *et al.*, 2012).

Mohseni e Tang (2021) também utilizaram dados experimentais de uma sala de teste, com e sem PCM no teto, em comparação com os resultados numéricos de um modelo com a mesma geometria e condições operacionais no EnergyPlus®. Os resultados simulados demonstraram boa concordância com os dados experimentais, com um desvio médio aceitável de cerca de 7%, o que, segundo os autores, pode ser devido à diferença nos métodos de incorporação do PCM realizados no concreto.

Em síntese, considerando a literatura sobre o tema, conclui-se que EnergyPlus®, a partir da versão “v7.1”, é uma das ferramentas mais avançadas e precisas para avaliar o desempenho térmico de aplicações de PCM em edificações. Assim, a versão “v8.9.0” do *software* foi adotada como ferramenta de investigação no presente estudo.

2.3.6 Influência do clima para a adoção do PCM

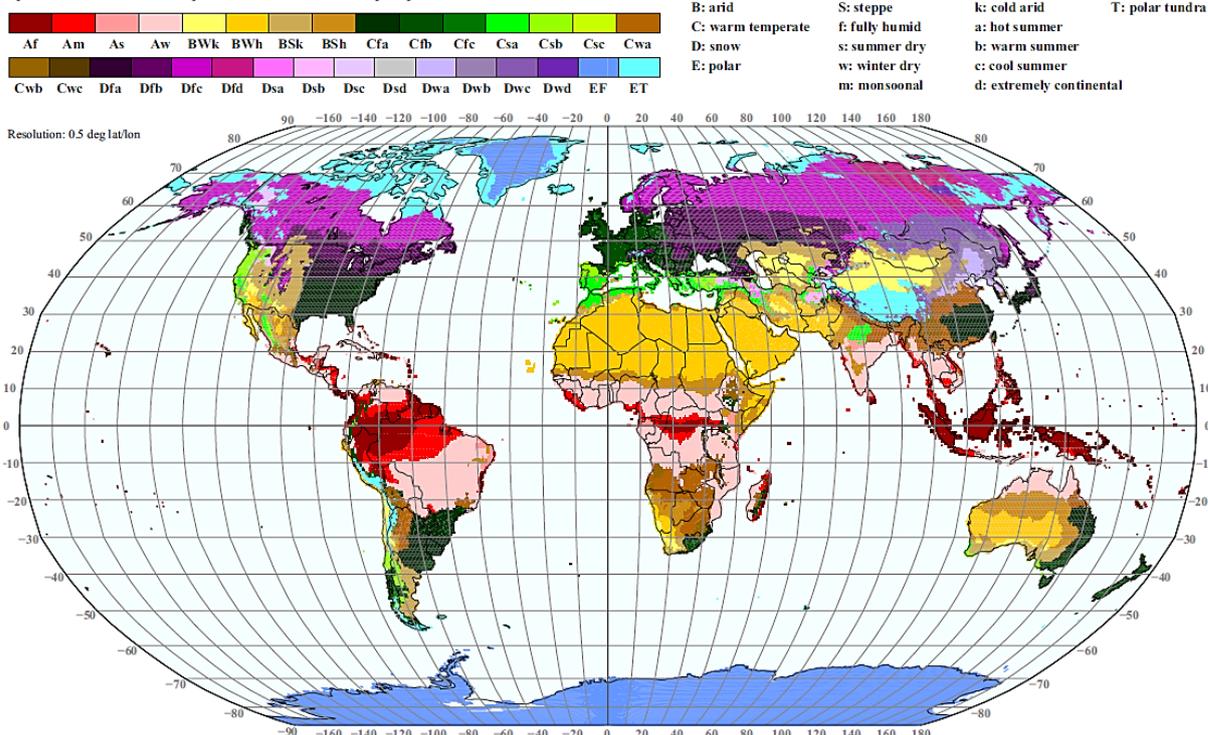
Segundo Alam *et al.* (2014), as condições climáticas desempenham papéis cruciais na eficácia do PCM em edifícios. O clima pode ser influenciado por vários fatores locais, como a latitude, altitude, topografia do terreno, além da presença de corpos d'água, podendo ser categorizado de acordo com a média e as faixas típicas de temperatura e precipitação (SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016).

Um dos sistemas de classificação climática mais populares na literatura é a classificação climática de Köppen-Geiger, apresentada por Kottek *et al.* (2006). Por esta razão, ela foi utilizada no presente trabalho para auxiliar na identificação de estudos que avaliaram o desempenho de PCMs sob condições climáticas comparáveis às zonas bioclimáticas brasileiras. Assim, apresenta-se na Figura 23 o mapa-múndi da classificação climática de Köppen-Geiger. Nesta classificação, os climas são simbolizados por dois ou três caracteres: o primeiro representa a zona climática principal, definida pela temperatura e precipitação; o segundo considera a distribuição da precipitação; e o terceiro indica a variação sazonal da temperatura (KOTTEK *et al.*, 2006).

Em geral, cada zona climática apresenta diferentes necessidades de refrigeração e aquecimento para edificações e, assim, diferentes requisitos de construção e de elaboração de projetos (SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016). Muitos estudos foram conduzidos para investigar o desempenho de PCMs sob diferentes climas, as quais produziram muitos resultados promissores.

Figura 23 – Mapa da classificação climática Köppen-Geiger
World Map of Köppen-Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASCLimO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Legenda: zonas climáticas principais: A = equatorial, B = árido, C = quente, D = neve e E = polar; distribuição da precipitação: W = deserto, S = estepe, f = totalmente úmido, s = verão seco, w = inverno seco e m = monção; variação sazonal da temperatura: h = árido quente, k = árido frio, a = verão quente, b = verão quente, c = verão frio, d = extremamente continental e F = geada polar.

Fonte: adaptado de Kottek *et al.* (2006).

2.3.6.1. Climas Equatoriais (A)

De maneira geral, verifica-se que a utilização de PCM não é muito viável em locais de climas equatoriais, nos quais o consumo anual de energia para climatização pode ser reduzido de maneira muito limitada ou até mesmo aumentar, dependendo da zona climática (SAFFARI *et al.*, 2017b; MARIN *et al.*, 2016; ALAM *et al.*, 2014).

Apesar disso, Saffari *et al.* (2017b) e Marin *et al.* (2016) verificaram que o PCM pode gerar alta economia de energia para resfriamento em locais de altas altitudes, como Brasília (Aw). Segundo Saffari *et al.* (2017b), o aumento da altitude influencia na radiação solar, na cobertura do céu e na velocidade do vento, o que pode auxiliar nos processos de carga e descarga do PCM.

2.3.6.2. Climas Áridos (B)

Kosny *et al.* (2014), Marin *et al.* (2016), Saffari *et al.* (2017b) mostraram que o uso de PCM pode gerar alta economia de energia de resfriamento ou aquecimento em climas áridos. No entanto, verifica-se maiores benefícios energéticos pelo PCM em

locais de climas mais frios (BSk e BWk) e com maiores altitudes. Segundo Saffari *et al.* (2017a), isto acontece porque nestas regiões o calor acumulado no PCM pode ser melhor dissipado pela temperatura fria do ar externo durante à noite.

2.3.6.3. Climas Temperados (C)

Segundo o estudo de revisão de Liu *et al.*, (2022), a grande maioria dos estudos relacionados ao uso de PCM em edificações tem sido realizada para sua possível aplicação em climas temperados. Os trabalhos se concentram principalmente no sudeste asiático, destacando-se a China, sudeste dos Estados Unidos, Europa Ocidental, Oceania e América do Sul, dos quais três estudos são do sul do Brasil (OLIVEIRA; LUCARELLI; CARLO, 2022). Na maioria das cidades avaliadas, os PCMs apresentaram considerável potencial em melhorar as condições de conforto ambiental do usuário e a economia de energia relativa à climatização artificial (SAFFARI *et al.*, 2017a).

Segundo Saffari *et al.* (2017a *apud* CAMPBELL; SAILOR, 2011), essas melhorias podem ser associadas às temperaturas menos severas durante o dia e mais frias durante à noite, o que facilita o carregamento e o descarregamento adequados do PCM. Nghana e Tariku (2016) também corroboram que o uso de PCM em edifícios sob climas mais amenos possibilita maiores benefícios econômicos.

No entanto, vários estudos demonstraram a necessidade da otimização da temperatura de fusão dos PCMs e do aproveitamento da ventilação noturna, visando melhorar a eficácia de sistemas contendo estes materiais e atender às demandas por resfriamento ou aquecimento da maneira mais adequada possível (ALAM *et al.*, 2014; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2017; SAFFARI *et al.*, 2017a; ZHANG *et al.*, 2017; PISELLI *et al.*, 2020). Contudo, tendo em vista que a ventilação mecânica excessiva também pode consumir uma grande quantidade de energia, faz-se necessário também investigar a quantidade e o período de ventilação ideais visando reduzir as cargas de energia nos horários de pico (ZHANG *et al.*, 2017).

2.3.6.4. Climas Continentais (D)

Assim como os climas equatoriais, os climas continentais também apresentam benefícios energéticos limitados ou insignificantes pela utilização de PCM, conforme verificado por Marin *et al.* (2016) e Saffari *et al.* (2017b). Apesar de estes estudos terem apresentado consideráveis economias de energia para resfriamento, as

maiores demandas nestes climas são de aquecimento, de modo a tornar essencial a otimização da temperatura de fusão do PCM para maximizar os benefícios energéticos (SAFFARI *et al.*, 2017a).

2.3.7 PCM no Brasil

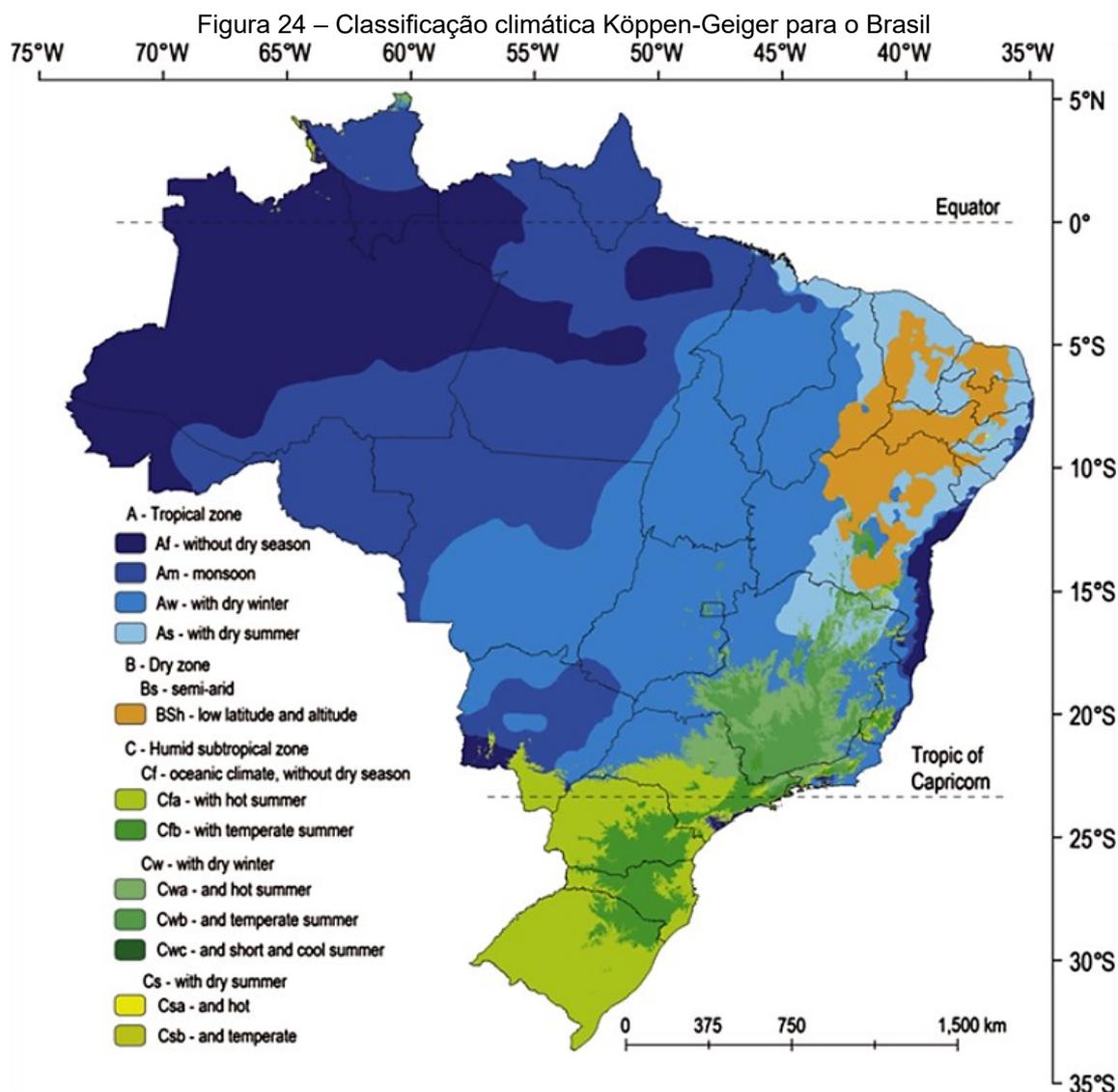
No Brasil, Brito *et al.* (2017) e Pons e Stanescu (2017) verificaram que os PCMs apresentam melhor desempenho nas zonas bioclimáticas (ZBs) 1 a 5, visto que os valores da temperatura máxima e mínima diária do ar interior ficam mais próximos ou dentro da zona de conforto térmico.

Já nas ZBs 6 a 8, que apresentam condições de verão mais extremas, a aplicação e o custo benefício desses materiais precisa ser avaliada com maior ponderação, visto que a inércia térmica adicional proporcionada pelos PCMs pode piorar as condições de conforto térmico do usuário (BRITO *et al.*, 2017).

A partir dessas informações e dos demais resultados expostos anteriormente, os climas Subtropical Úmido (Cfa) e Temperado Oceânico (Cfb) brasileiros foram selecionados para auxiliar na busca por pesquisas correlacionadas com a metodologia desenvolvida no presente trabalho. Estes climas são conhecidos como clima subtropical e estão localizados principalmente nas ZBs 1, 2 e 3 do Brasil.

Na Figura 24, apresenta-se a classificação climática de Köppen-Geiger para o Brasil, produzida por Alvares *et al.* (2013). Nela, os climas Cfa e Cfb estão representados nos dois primeiros tons de verde. Segundo Kottek *et al.* (2006), o clima Cfa apresenta verão quente, com temperatura máxima a partir de 22 °C e temperatura mínima entre -3 °C e 18 °C, sem estação seca. Ele cobre 6,5% do território brasileiro e é encontrado principalmente na região sul do Brasil, em uma área contínua entre o sudoeste de São Paulo e o sul do Rio Grande do Sul (ALVARES *et al.*, 2013).

Já o clima Cfb apresenta verão temperado e temperatura máxima menor que 22°C, com chuva o ano todo (KOTTEK *et al.*, 2006). Ele abrange as regiões mais frias do país e é observado em 2,6% do território brasileiro, desde o sul de Minas e parte do Rio de Janeiro e Espírito Santo até os estados do sul do Brasil (ALVARES *et al.*, 2013).



Fonte: Alvares *et al.* (2013).

Conforme as diretrizes construtivas sugeridas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), o aumento da inércia térmica das superfícies para aquecimento pode ser uma solução passiva para o conforto térmico de inverno de edificações nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, bem como o uso de sistemas de vedação leves.

Assim, este estudo propõe uso de PCMs como estratégia passiva para reduzir as condições de desconforto térmico por frio em habitações brasileiras, por meio do aumento da inércia térmica pelo PCM enquanto sólido, e por calor, pela absorção de calor durante a mudança de fase sem alterar a temperatura interna. Assim, considerando a tipologia típica das habitações do Brasil, estima-se a necessidade de modificar os componentes da envoltória para sistemas de vedação leve permitindo, desta forma a associação do PCM na envoltória da edificação de referência.

2.4 PESQUISAS CORRELACIONADAS

Softwares de simulação podem fornecer informações valiosas sobre o desempenho térmico de Materiais de Mudança de Fase (SAFFARI *et al.*, 2017a). Nesse sentido, observa-se diversas pesquisas desenvolvidas no mundo propondo a utilização de PCMs na construção civil, sob climas semelhantes ao subtropical brasileiro, como os climas Subtropical Úmido (Cfa) e Temperado Oceânico (Cfb), por meio de simulação termoenergética no *software* EnergyPlus®. De acordo com Saffari *et al.* (2017a), uma grande quantidade de estudos já foi publicada para investigar a aplicação passiva de PCMs na envoltória de edifícios sob climas temperados. Em sua maioria, investigou-se a influência da variação de parâmetros de projeto na eficácia do PCM e nas condições de conforto térmico aos ocupantes das edificações.

Segundo Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) e Suresh, Kumar Hotta e Saha (2022), a temperatura de mudança de fase do PCM deve estar próxima da temperatura ambiente desejada para propiciar melhor controle da temperatura interna dentro da faixa de conforto aceitável aos usuários. Peippo, Kauranen e Lund (1991), por sua vez, sugerem que esta temperatura apresente um valor de 1 a 3 °C superior à temperatura média do interior dos ambientes sem esses materiais para maior eficácia no armazenamento de calor diurno.

Já Ramakrishnan *et al.* (2016) demonstraram que a temperatura de fusão do PCM é um fator crítico de projeto e deve ser entre 3 e 5 °C mais alta do que a temperatura média do ar externo para gerar maior eficácia para o conforto térmico interno. Isto se deve ao fato de que o processo de solidificação de PCMs com temperatura de fusão mais altas que este intervalo poderia propiciar a manutenção das temperaturas internas mais altas durante à noite e, conseqüentemente, aumentando o desconforto térmico em comparação a um edifício sem PCM. Por outro lado, Brito *et al.* (2017) mostraram que altos valores para a capacidade de armazenamento térmico latente do PCM podem compensar um ponto de fusão de inadequado às condições climáticas locais.

Auzeby *et al.* (2016) demonstraram que PCMs podem ser usados como uma solução passiva eficiente para mitigar os riscos de superaquecimento em residências do Reino Unido (Cfb) durante o verão. As simulações foram realizadas para uma casa de estrutura pesada, com paredes de alvenaria, cobertura de telha cerâmicas e isolamento térmico na envoltória. Considerou-se a instalação de painéis de PCM de

20 cm de espessura na superfície interna das paredes externas, com temperatura de fusão de 24°C e 86 kJ/kg de calor latente. Os resultados mostraram que o PCM reduziu significativamente a frequência de temperaturas internas acima das condições de conforto, de 31% para até 16%, considerando o clima da cidade de Nottinghamshire (Inglaterra), localizada ao sul Reino Unido.

Além disso, a influência de vários fatores de projeto na eficácia do PCM também foi investigada pelos autores. Observou-se que edificações com alto nível de isolamento térmico necessitam mais de PCMs durante o verão do que aquelas com baixo isolamento, nas quais o PCM reduziu de 40% para até 20% a ocorrência de temperaturas em desconforto por calor. Também verificou-se que a instalação de PCM em paredes externas e divisórias internas apresentou menores temperaturas internas máximas do que pela sua aplicação em tetos, pisos e telhados. Segundo Auzeby *et al.* (2016), esse resultado pode ser um efeito combinado de vários fatores, como a condição de temperatura zonal em torno de cada componente construtivo e às maiores áreas superficiais de exposição às fontes de calor interna (devido à convecção de calor) e externa (devido à radiação solar e condução de calor), Ademais, a eficácia do PCM em edifícios leves demonstrou-se maior do que em edifícios pesados (AUZEBY *et al.*, 2016).

Além disso, Auzeby *et al.* (2016) verificaram que, devido às mudanças climáticas e ao aquecimento global, os PCMs poderão beneficiar todas as regiões do Reino Unido no futuro, inclusive em locais de clima mais frio, como Aberdeen (Escócia), localizada ao norte do Reino Unido, na qual a ocorrência de superaquecimento em residências poderia ser reduzida a um nível aceitável de até 10% pelo uso de PCM.

Sistemas construtivos de tijolos impregnados com PCM têm um potencial promissor de proporcionar conforto térmico e economia de energia para resfriamento em edificações (MUKRAM; DANIEL, 2022). No estudo de Ramakrishnan *et al.* (2016), realizou-se uma análise de otimização paramétrica quanto a aplicação de PCM em edifícios em termos de sua eficiência no armazenamento de calor latente e de sua eficácia na melhoria do conforto térmico interno. Assim, os autores analisaram o desempenho térmico de uma residência pesada, sob condições climáticas temperadas da Austrália durante o verão, composta por paredes externas de tijolos, telhado de concreto e isolamento térmico nas paredes e teto. Consideraram-se a instalação de PCM com 204 kJ/kg de capacidade de armazenamento de calor latente na superfície interna do teto e diferentes pontos de fusão (23, 25, 27, 29 e 31 °C).

Também avaliou-se o impacto da variação de fatores de projeto, como a espessura da camada do PCM (entre 3,75 e 30 mm) e a introdução de ventilação mecânica em diferentes taxas de renovação de ar por hora (ACH – *Air Changes per Hour*) (entre 0 e 8 ACH) durante a noite (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016).

Os resultados indicaram que a incorporação de PCM produz uma redução no pico da temperatura operativa interna de 1 e 2,5 °C em 2 dias consecutivos de verão, além de reduzir entre 1,4 e 2,8°C na flutuação diária da temperatura operativa. As temperaturas ótimas de fusão foram de 25 °C para o clima mais frio (Cfb) de Melbourne e 27°C para o clima mais quente (Cfa) de Brisbane e Sydney. Além disso, a otimização da espessura do PCM para 12,5 mm e da taxa de ventilação noturna para 4 ACH maximizou a eficiência de carga e descarga do PCM na faixa de 54 a 62% nas três cidades. Este resultado foi significativamente alto em comparação ao cenário do PCM não otimizado, cujas eficiências de carga e descarga do PCM foram nas faixas de 3 a 24% e 16 a 42%, respectivamente (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016).

Também foi constatado que a eficiência do armazenamento de energia latente da camada PCM melhora o conforto térmico interno. A otimização proposta por Ramakrishnan *et al.* (2016) garantiu condições de conforto térmico por mais de 60% do período de ocupação para as três cidades, correspondendo a um aumento de 19% a 35% no conforto em relação ao edifício sem PCM. Por outro lado, essa melhoria foi de no máximo 2% para o cenário não otimizado (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016).

Ramakrishnan *et al.* (2017) investigaram o potencial de PCMs na redução de riscos de estresse por calor extremas em moradias sem ar-condicionado em Melbourne (Cfb). A edificação analisada é o mesmo modelo construtivo estudado por Ramakrishnan *et al.* (2016), porém sem isolamento térmico nas paredes. Os resultados mostraram que a instalação de PCM, com 27°C de ponto de fusão e 219 kJ/kg de capacidade de armazenamento de calor latente, nos forros internos de teto e paredes poderia reduzir os riscos de estresse térmico severo em 23% durante os períodos de ondas de calor ocorridos em 2009. No entanto, a adição de ventilação mecânica noturna ao edifício demonstrou-se foi fundamental para melhorar a eficácia do PCM, melhorando a redução das horas de desconforto severo por calor para 32% (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2017).

Além disso, os autores observaram que os riscos de estresse térmico severo diminuem com o aumento da espessura da camada de PCM. Os melhores resultados foram obtidos por meio da otimização da temperatura de fusão para 29°C e do

aumento da espessura do PCM de 12,5 mm para 30 mm, proporcionando uma redução de 65% das horas de desconforto em 2009 e, considerando cenários futuros, até 46% para os eventos de ondas de calor em 2050 (RAMAKRISHNAN *et al.*, 2017).

No Brasil, Brito *et al.* (2017) identificaram as características térmicas ideais dos PCMs, em termos de capacidade de armazenamento térmico latente e ponto de fusão, para o desenvolvimento de produtos mais adequados aos climas brasileiros durante o verão. Dois modelos simplificados foram estudados: um de sistema construtivo pesado, com paredes e teto de concreto e telhas cerâmicas; e outro de sistema construtivo leve, com paredes compostas por chapa cimentícia, isolamento térmico e gesso acartonado e cobertura composta por telhas cerâmicas e forro de gesso. Considerou-se aplicação de 16 diferentes PCMs na superfície interna das paredes externas e do teto. O primeiro é um PCM comercial, originalmente com 22°C de ponto de fusão e 70 kJ/kg de capacidade de armazenamento térmico latente. Os demais correspondem a PCMs teóricos, cujas características térmicas foram determinadas pela variação da capacidade de armazenamento térmico latente (entre 315 e 1260 kJ/m²) do PCM original, por meio da alteração da sua espessura (entre 5 e 20 mm), e diferentes ponto de fusão (entre 22 e 34°C) (BRITO *et al.*, 2017).

Os resultados mostraram que os PCMs teóricos, especialmente com maior capacidade de armazenamento de calor latente e ponto de fusão, propiciaram maior impacto no resfriamento dos ambientes em comparação com os PCMs originais. No entanto, esse impacto não foi significativo em sistemas construtivos pesados, devido a estes já apresentarem inércia térmica significativa, cuja redução na temperatura máxima do ar interno foi de até 1,5 °C. Por outro lado, nos sistemas construtivos leves, essa redução foi mais significativa, podendo alcançar valores entre 2,2 e 5,9 °C para modelos localizados em regiões de clima subtropical (ZBs 1 e 2). De maneira geral, os melhores resultados nestas zonas foram obtidos pelo acréscimo de PCM com 30 °C de ponto de fusão e 20 mm de espessura, atendendo aos requisitos mínimos de desempenho térmico da norma NBR 15575:2013 (BRITO *et al.*, 2017).

Além disso, Brito *et al.* (2017) apontaram que, para proporcionar maior conforto térmico aos usuários, é importante considerar PCMs com capacidade de armazenamento térmico latente maior que 315 kJ/m², visto que este aspecto pode compensar pontos de fusão menos adequados às condições climáticas locais. Como exemplo, o PCM com menor ponto de fusão (22°C), mas com maior capacidade de armazenamento térmico latente (1260 kJ/m²), também foi capaz de reduzir

significativamente a temperatura máxima do ar interior em 4,2 °C em São Paulo (Cfb), localizado na ZB 3, e 4,0°C em Curitiba (Cfb), na ZB 1 (BRITO *et al.*, 2017).

No estudo de Brandalise, Almeida e Ordenes (2020), analisaram-se o desempenho térmico de dois PCMs, com diferentes temperaturas de fusão (22 e 25 °C) e capacidades de armazenamento térmico latente (190 e 230 kJ/kg), quando aplicados na superfície externa das paredes externas de uma habitação de estrutura leve e isolada. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mas demonstraram que o uso de apenas um ponto de fusão não é eficaz em locais que apresentem grande amplitude térmica ao longo do ano, como é o caso do município de Santa Maria (Cfa), na ZB 2. Nesta cidade, o PCM com 25 °C de temperatura de fusão apresentou melhores resultados no conforto e estabilidade na amplitude térmica durante os meses mais quentes, reduzindo em até 1,76 °C os picos de temperatura interna. Por outro lado, durante os meses com maior desconforto por frio, o PCM com 22 °C foi o mais indicado, proporcionando um aumento de até 3,67 °C nas temperaturas mínimas (BRANDALISE; ALMEIDA; ORDENES, 2020).

Na pesquisa de Nurlybekova, Memon e Adilkhanova (2021), o efeito do PCM aplicado em paredes e cobertura de concreto armado no desempenho térmico de verão de edifícios existentes na Polônia (Cfb). Sua pesquisa mostrou que indicou que em um edifício sem ar condicionado, apenas uma faixa ótima de temperatura de fusão do PCM pode não possibilitar sua eficácia durante todos os meses de verão. Resultados semelhantes também foram encontrados no estudo de Staszczuk e Kuczyński (2021), no qual o desempenho térmico e energético de um edifício de concreto com uso de PCM, nas paredes externas e cobertura, foi avaliado sob em cidades de clima subtropical do Paquistão, Vietnam, Nepal e China (Cfa). De maneira geral, o PCM com menor ponto de fusão demonstrou desempenho superior durante o inverno, enquanto o PCM com maior ponto de fusão foi o mais adequado nas temporadas de oscilação de temperatura no verão. Os PCMs ótimos resultaram em valores anuais de economia de energia de até 37% para cenários climáticos atuais e futuros (STASZCZUK; KUCZYŃSKI, 2021).

De fato, devido à sazonalidade, deve-se combinar pelo menos dois PCMs diferentes, otimizados, a sistemas construtivos em climas temperados com grande amplitude térmica diária e anual, sendo difícil de projetar um sistema que atenda à demanda térmico durante todo o ano, principalmente ao considerar o potencial efeito

do aquecimento global e das mudanças climáticas no aumento das condições climáticas extremas do planeta (LIU *et al.*, 2022).

Filippini, Sartori e Torres (2020) verificaram que os PCMs possuem potencial significativo de aumentar os níveis de conforto térmico dos usuários e em uma escola pública localizada em Porto Alegre (Cfa), na ZB 3. A edificação analisada possui estrutura pesada, composta por paredes de alvenaria de cerâmica e cobertura de telhas cerâmicas com isolamento térmico e forro de gesso. Em seu estudo, avaliou-se o efeito de diferentes aplicações de PCMs, variando-se a temperatura de fusão (23, 25 e 27°C), a espessura (25 e 50 mm) e o local de aplicação do material (na superfície interna de paredes externas ou da cobertura) (FILIPPINI; SARTORI; TORRES, 2020).

Os melhores resultados foram obtidos pelos PCMs com pontos de fusão de 23°C e 25 °C, ambos com 5 cm de espessura e aplicados nas paredes externas, os quais propiciaram uma redução média anual na quantidade de dias em condições de desconforto térmico de 7,49 e 7,18%, respectivamente. Nestas condições, o PCM com 23°C de temperatura de fusão propiciou uma redução de 4,49°C na temperatura operativa média durante o verão, enquanto o PCM com 25 °C de temperatura de fusão propiciou um aumento médio de 0,63°C na temperatura durante o inverno. Desse modo, verificou-se que o efeito dos PCMs foi mais notável principalmente durante o verão do que o inverno de Porto Alegre (FILIPPINI; SARTORI; TORRES, 2020).

Diante dos resultados obtidos na literatura, os PCMs possuem grande potencial de melhorar as condições de conforto por frio e calor em edificações no clima subtropical brasileiro. Contudo, com base nos resultados mais satisfatórios ocorridos para modelos construtivos leves, verifica-se a necessidade de modificar os sistemas construtivos brasileiros pesados, predominantemente constituídos de alvenaria cerâmica e de concreto, por modelos construtivos mais leves, visando aumentar a eficácia do PCM (VIEIRA; OLIVEIRA, 2021). Ademais, verifica-se a importância da escolha adequada do ponto de fusão do PCM às condições climáticas locais para a melhoria da sua eficácia e das condições de conforto térmico aos ocupantes.

No estudo de Alam *et al.* (2014), a aplicação de PCM no teto de um casa de estrutura pesada ofereceu benefícios apenas durante o verão nas cidades australianas de clima subtropical oceânico temperado (Cfb), permanecendo-se principalmente inativo durante o inverno, devido à temperatura da zona durante o dia não ser quente o suficiente para derreter o PCM. Já nas cidades de clima subtropical oceânico quente (Cfa), ocorreu o contrário: o PCM apresentou bons resultados

durante o inverno, mas a temperatura externa durante o verão não foi capaz de solidificar o PCM.

Por meio de uma abordagem experimental, Li *et al.*, (2019) examinaram o desempenho térmico de paredes de tijolos com incorporação de 13 diferentes PCMs em Isfahan, Irã (clima semiárido frio). Seus resultados mostraram o PCM com menor condutividade térmica, alto calor latente de fusão e temperatura de fusão próxima à temperatura ambiente pode reduzir a transferência de calor para o interior da edificação com mais eficiência. Segundo os autores, a condutividade térmica tem prioridade sobre as outras propriedades termofísicas do PCM, visto que leva a transferir a menor quantidade de calor para o espaço interior (LI *et al.*, 2019).

Segundo o estudo de revisão de Amoatey, Al-Jabri e Al-Saadi (2022), poucos estudos mostraram uma redução considerável das emissões de gases de efeito estufa propiciado por edificações aprimoradas com PCM. No estudo de Mohseni e Tang (2021), por exemplo, o uso de PCM na envoltória de uma edificação em Newcastle, Austrália (Cfa), poderia reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera em até 264 toneladas em 50 anos. Contudo, o conhecimento das capacidades de redução de emissões dos PCMs a longo prazo ainda é limitado. Além disso, ainda há carência de estudos sobre as emissões de poluentes atmosféricos internos e os efeitos potenciais à saúde humana relacionadas ao emprego de PCM em edificações (AMOATEY; AL-JABRI; AL-SAAD, 2022).

Segundo Faraj *et al.* (2021), ainda há escassez de estudos sobre tamanho, massa e localização de aplicação do PCM. Além disso, a maioria dos estudos de otimização atuais são baseados em modelos numéricos que não são evidenciados experimentalmente (FARAJ *et al.*, 2021). Ademais, poucos estudos avaliaram a viabilidade econômica do PCM na edificação. Na Austrália, Mohseni e Tang (2021) mostraram que o PCM poderia gerar uma economia de energia de até 38%, com um tempo de retorno viável de 16,6 anos. No estudo de Ramakrishnan *et al.* (2016), o menor período de retorno foi de 31 a 35 anos. Segundo Faraj *et al.* (2021), a análise econômica deve ser adicionada à análise do desempenho térmico e da eficiência energética da edificação para propiciar uma visão mais ampla dos recursos alocados pelo uso de PCM.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

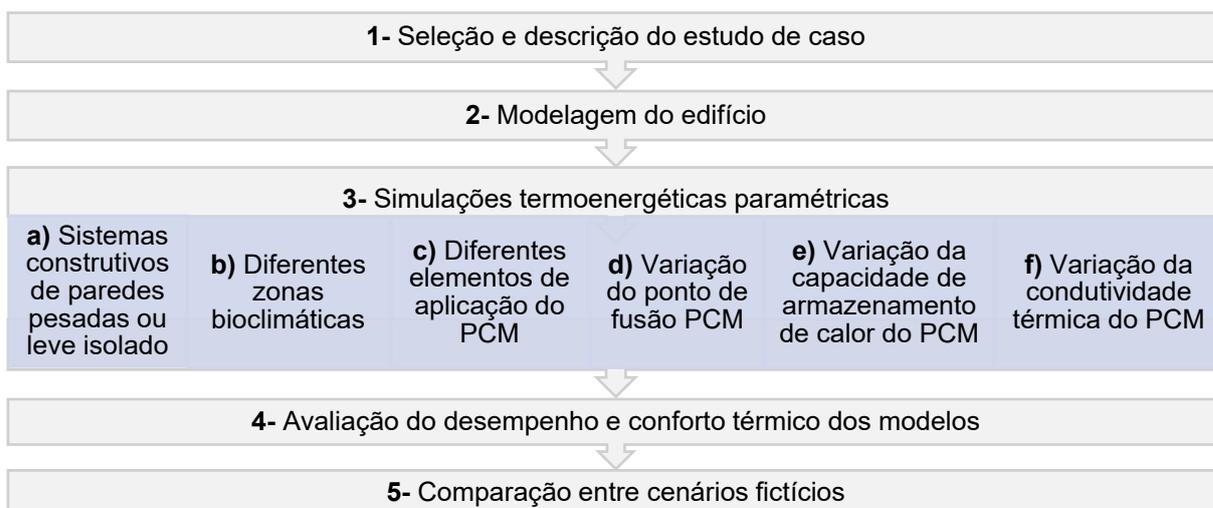
Segundo a definição de Kauark, Manhães e Medeiros (2010), a natureza deste trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, que buscou investigar o potencial de Materiais de Mudança de Fase em melhorar o desempenho térmico de habitações brasileiras e, conseqüentemente, proporcionar melhores condições de conforto térmico aos ocupantes, de maneira passiva. Quanto à forma de abordagem do problema, trata-se de uma pesquisa quantitativa, ao requerer o uso de técnicas estatísticas para validação das relações de causa e efeito entre o emprego de PCM e a melhoria dos resultados de desempenho térmico da envoltória obtidos nas simulações. Também se trata de uma pesquisa qualitativa, ao requerer a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados aos resultados, envolvendo a análise de referências bibliográficas e de trabalhos científicos semelhantes (KAUARK; MANHÃES; MEDEIROS, 2010).

Do ponto de vista de seus objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória, que torna o problema do desempenho térmico inadequado para os ocupantes de habitações explícito por meio de um estudo de caso. Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa quase-experimental, que envolve o desenvolvimento de um experimento de simulação computacional, de maneira que variáveis serão impostas, controladas e analisadas, mas sem a distribuição aleatória nos tratamentos e nem grupos-controle. Além disso, também trata-se de um estudo de caso, que envolve a investigação específica direcionada às características típicas de habitações brasileiras, de maneira a permitir o conhecimento amplo e circunstanciado da questão problematizada (GIL, 2002). A partir disso, foi possível analisar o desempenho térmico da edificação proposta e analisar o impacto do emprego de PCMs no seu desempenho térmico e nas condições de conforto térmico aos usuários.

3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTOS

Para realização do trabalho proposto, cinco etapas foram estabelecidas, conforme se observa na Figura 25. Todas as etapas deste trabalho foram desenvolvidas por meio de programas computacionais.

Figura 25 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: elaboração própria.

3.2.1 Seleção do estudo de caso

3.2.1.1. Seleção das cidades de análise

O clima subtropical brasileiro foi selecionado para testar o desempenho do PCM, por ser o clima mais ameno do país. Localiza-se nas zonas bioclimáticas (ZB) 1, 2 e 3. Assim, três centros urbanos representativos para cada um desses climas foram selecionados como locais para o estudo de caso (Tabela 1 e Figura 26).

Tabela 1 – Cidades selecionadas

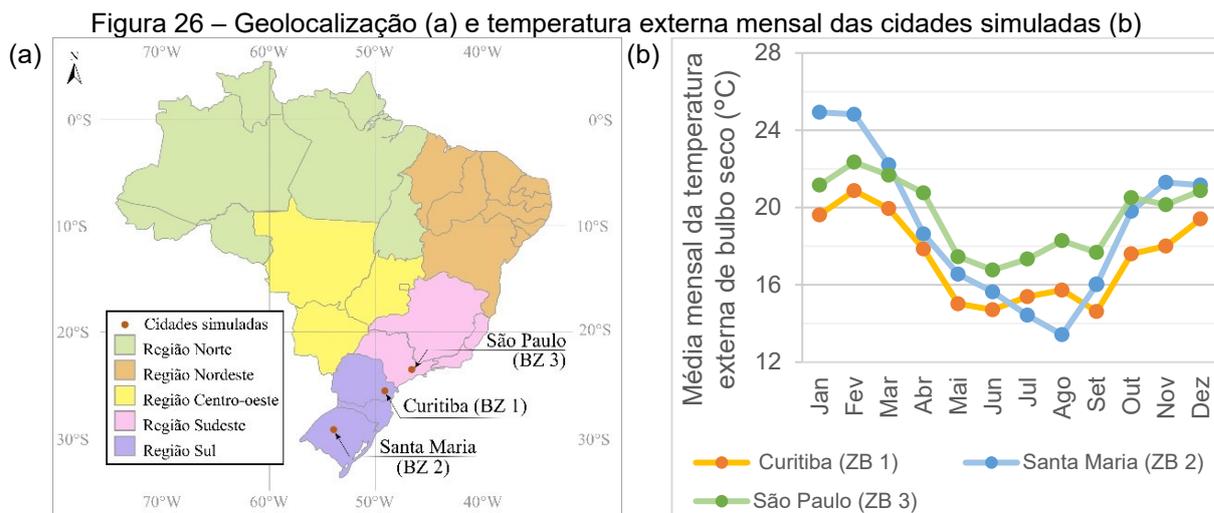
UF	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	TBSm ³ (°C)	Zona bioclimática (ZB)
PR	Curitiba	-25,43	-49,27	924	17,4	ZB 1
RS	Santa Maria	-29,68	-53,81	95	19,0	ZB 2
SP	São Paulo	-23,85	-46,64	792	19,6	ZB 3

* TBSm = Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm)

Fonte: elaboração própria.

Tais cidades foram selecionadas por possuírem disponibilidade do seu arquivo climático pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Em particular, a cidade de Curitiba foi selecionada por ser a capital de clima mais frio do Brasil. Santa Maria foi selecionada com o intuito de testar o desempenho do PCM em um local de grande amplitude térmica ao longo do ano, como observa-se na Figura 26(b). Por outro lado, a cidade de São Paulo foi selecionada para permitir a expansão do estudo à região sudeste do Brasil.

³ “Temperatura do ar medida por um termômetro com dispositivo de proteção contra a influência da radiação térmica” (ABNT, 2005a, p. 5).

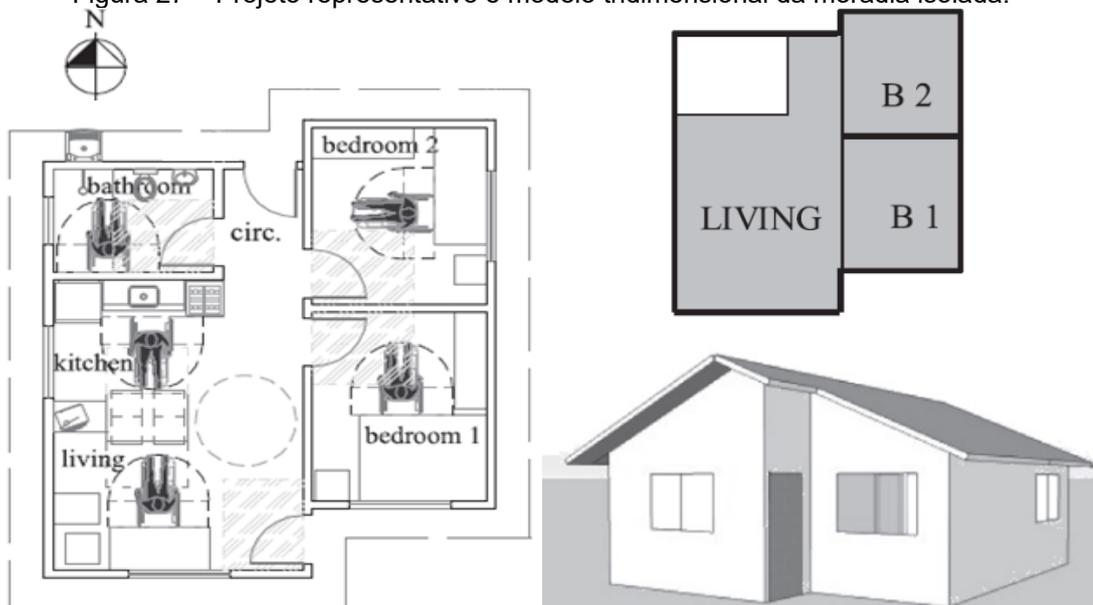


Fonte: elaboração própria.

3.2.1.2. Seleção dos modelos construtivos

Na ausência de dados de uma edificação real, adotou-se uma tipologia de pequeno porte representativa de habitação brasileira, conforme referencial estabelecido por Triana, Lamberts e Sassi (2015). Assim, selecionou-se uma moradia unifamiliar térrea, com área total construída de 44,96 m², composta por dois quartos, uma cozinha integrada com a sala e um banheiro (Figura 27).

Figura 27 – Projeto representativo e modelo tridimensional da moradia isolada.



Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Por meio do estudo de Triana, Lamberts e Sassi (2015), pôde-se determinar a geometria, a orientação das fachadas e as especificações técnicas dos materiais construtivos. Na Tabela 2 apresentam-se os valores adotados para a geometria da unidade habitacional.

Tabela 2 – Valores para a geometria da unidade habitacional

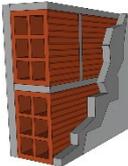
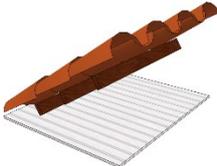
Descrição	Dimensão
Área útil	39,73 m ²
Pé-direito	2,50 m
Sala / Cozinha	17,81 m ²
Quarto 1	8,06 m ²
Quarto 2	7,54 m ²
Banheiro	4,08 m ²
Circulação	2,23 m ²

Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Suas paredes internas e externas são de alvenaria de blocos cerâmicos de 6 furos, revestidas interna e externamente por reboco. A cobertura é composta por telhas cerâmicas de duas águas e inclinação de 23,6°, estrutura de madeira e forro de PVC. O piso é composto por piso cerâmico de 1 cm de espessura, argamassa de regularização de 2 cm, contrapiso de 5 cm e camada de lastro de brita de 3 cm. Este modelo é referido no presente estudo como o “modelo de paredes pesadas (MPP)”.

Adicionalmente, para avaliar o efeito de construções leves PCM, um segundo modelo foi proposto considerando as alterações apenas nos elementos construtivos e denominado aqui como “modelo leve isolado (MLI)”. Assim, a transmitância térmica (U_t) e a capacidade térmica (CT) foram estimadas para cada componente da envoltória conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2008) e podem ser vistos na Tabela 3 e na Tabela 4 para os modelos MPP e MLI, respectivamente.

Tabela 3 – Propriedades térmicas da envoltória – modelo de paredes pesadas (MPP)

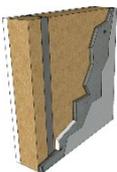
Vedação	Elemento	Composição	U_t (W/m ² .K)	CT (kJ/m ² .K)	α
Paredes externas		1) Pintura externa 2) Argamassa externa (2,0 cm) 3) Bloco cerâmico (9 x 14 x 19 cm) 4) Argamassa interna (2,0 cm)	2,55	129	0,6
Cobertura		1) Telha cerâmica (1,0 cm) 2) Câmara de ar (> 5,0 cm) 3) Forro PVC (1,0 cm)	2,09	30	0,6

Fonte: elaboração própria.

Convém destacar que, após a realização das simulações do presente estudo, em fevereiro de 2022, a norma NBR 15220-2 obteve nova atualização, pela qual os métodos de cálculo de resistência e transmitância térmica foram revisados (ABNT, 2022). Além disso, verificou-se que a edificação em suas características originais do

MPP (Tabela 3), naturalmente não atende ao valor limite de transmitância térmica de coberturas ($U_t \leq 2,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) recomendado para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). Por outro lado, as características térmicas do modelo leve isolado (MLI) apresentadas Tabela 4 atendem a todas as diretrizes construtivas recomendadas para as três zonas pela referida norma.

Tabela 4 – Propriedades térmicas da envoltória – modelo leve isolado (MLI)

Vedação	Elemento	Composição	U_t ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	CT ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$)	α
Paredes externas		1) Placa cimentícia (1,0 cm) 2) Isolamento térmico (5,0 cm) 3) Placa de gesso (1,25 cm)	0,75	30	0,6
Cobertura		1) Telha cerâmica (1,0 cm) 2) Isolamento térmico (5,0 cm) 3) Câmara de ar (> 5,0 cm) 4) Placa de gesso (1,25 cm)	0,63	31	0,6

Fonte: elaboração própria.

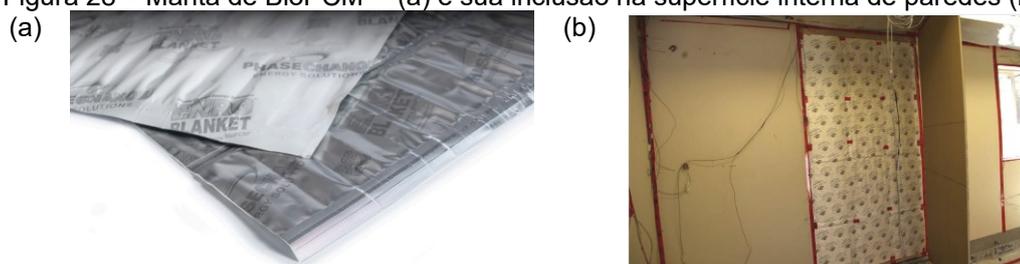
A absorptância solar (α) de 0,6 foi adotada a ambos os modelos por representar o limite para maiores transmitâncias térmicas aceitas às vedações externas pela NBR 15575-4:2021 e NBR 15575-5:2021.

3.2.1.3. Seleção do PCM

No estudo de revisão de Vieira e Oliveira (2021), na maioria dos estudos de simulação realizados para climas temperados, o PCM foi adicionado à superfície interna de paredes e tetos. Além disso, o principal PCM comercial avaliado nesta revisão foram *Biobased*PCMs, devido à sua fonte orgânica renovável e fácil instalação nos sistemas construtivos. Estima-se que eles possam ser uma alternativa promissora para implementação no Brasil, devido à grande abundância de ácidos graxos na flora e fauna brasileira.

Portanto, o ENRG Blanket® (Figura 28a) foi selecionado para análise no presente estudo. Trata-se de uma manta de polímero e/ou alumínio contendo BioPCM™ macroencapsulado, um PCM orgânico de ácidos graxos de base vegetal disponível em quatro pontos de fusão (23, 25, 27 e 29 °C) produzido pela empresa *Phase Change Energy Solutions* (2018).

Figura 28 – Manta de BioPCM™ (a) e sua inclusão na superfície interna de paredes (b)



Fonte: PCES (2018) e Nghana e Tariku (2016).

Sua instalação consiste na sua simples colocação anteriormente à placa de gesso em paredes (Figura 28b) e tetos suspensos, não necessitando de manutenção. Em eventuais intervenções em luminárias e equipamentos acima do teto, basta mover as mantas para o lado e reposicioná-la cuidadosamente para onde estavam anteriormente ao serviço, para garantir que não sejam perfuradas ou danificadas. Segundo os fabricantes, esta manta é resistente a rasgos, duradouro, atende ou excede os padrões normativos americanos de combate a incêndio e é capaz de manter seu desempenho térmico por mais de 100 anos (PCES, 2018).

3.2.1.4. Seleção dos cenários a serem simulados

Diversos fatores influenciam o desempenho térmico dos PCMs. Neste contexto, diferentes cenários de sua aplicação foram considerados, variando-se: propriedades termofísicas ajustáveis do PCM (de valores mínimos a valores máximos) fornecidas pelo fabricante (PCES, 2020a; 2020b; 2020c; 2020d); características físicas da construção, como o modelo da construção (MPP e MLI) e a superfície para instalação do PCM (teto e/ou paredes externas); e as condições climáticas (ZB 1, 2 e 3) para localização da edificação. Assim, 438 cenários foram avaliados, no total, conforme apresentado na (Quadro 2).

Quadro 2 – Descrição dos 438 cenários simulados

Tipo de fator	Fator	Descrição do cenário
Características da edificação (com ou sem PCM)	Modelo da construção	Modelo de paredes pesadas (MPP) ou modelo leve isolado (MLI)
	zona bioclimática (ZB)	ZBs 1, 2 e 3
Características de aplicação do PCM	Superfície de instalação do PCM	Interior das paredes externas e/ou acima do teto rebaixado
	Ponto de fusão (PF)	23, 25, 27 ou 29 (°C)
	Capacidade de armazenamento de energia térmica (CapT)	400, 825 ou 1250 (kJ/m ²)
	Condutividade térmica (CondT)	0,15 ou 2,5 (W/m.K)

Fonte: elaboração própria.

Dentre eles, 6 cenários foram testados sem PCM e 432 com PCMs teóricos, derivados das seguintes combinações: 2 tipos de construção; 3 zonas bioclimáticas (ZBs); 3 locais de instalação do PCM; 4 pontos de fusão do PCM (PF); 3 valores de capacidades de armazenamento de calor do PCM (CapT); e 2 valores de condutividade térmica do PCM (CondT).

Convém comentar que diversas tentativas de contato foram realizadas por *e-mail* com a empresa fabricante, visando obter conhecimento da possibilidade de existência de mantas de BioPCM™ contendo as exatas propriedades termofísicas avaliadas no Quadro 2, bem como do seu preço de compra e fornecimento. Contudo, não foram obtidas respostas e nem referências em estudos anteriores quanto a estas questões. Portanto, considerou-se os cenários do Quadro 2 como fictícios, apesar das diferentes combinações terem sido provenientes da variação de propriedades termofísicas do PCM dentro dos limites mínimos e máximos permitidos no catálogo do fabricante.

3.2.2 Modelagens termoenergéticas conforme a NBR 15575-1:2021

A segunda etapa consistiu nas modelagens termoenergéticas da envoltória da edificação proposta (modelo real) e da envoltória com características de referência (modelo de referência), conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Para isso, utilizou-se o *software* SketchUp Make (2016), em conjunto com o *plug-in* OpenStudio (1.12.0) como interface gráfica e a extensão Euclid (0.9.3). Além disso, o AutoCAD (2018) foi utilizado paralelamente para a consulta de dimensões e demais detalhes do projeto necessários para a realização das modelagens energéticas. Cabe ressaltar que, por se tratar de uma edificação hipotética, fez-se necessário o estabelecimento de simplificações, tais como a desconsideração da influência do entorno e da degradação dos revestimentos externos nas simulações.

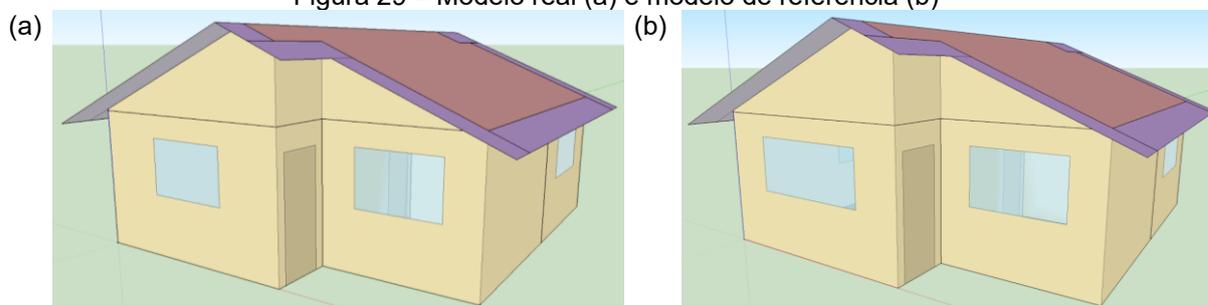
A modelagem da envoltória do modelo real foi a mesma para os dois sistemas construtivos propostos para análise, modelo de paredes pesadas (MPP) e modelo leve isolado (MLI), visto que possuem as mesmas características geométricas. Para a envoltória do modelo de referência, por sua vez, as dimensões das janelas dos ambientes de permanência prolongada (APP) foram redimensionados para atender a porcentagem de elementos transparentes (17%) estabelecida pela NBR 15575-1:2021 (Tabela 5). Sendo assim, exibe-se na Figura 29 as modelagens produzidas neste trabalho, na qual observa-se a diferença dimensional das aberturas entre os modelos real e de referência.

Tabela 5 – Tabela de esquadrias da habitação dos modelos real e de referência

Elemento	Ambiente	Modelo real – paredes pesadas (MPP) ou leve isolado (MLI)		Modelo de referência		Peitoril	Tipo	Favor de Ventilação – FV (%)
		Largura (cm)	Altura (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)			
Portas	Todos	80	210	80	210	-	Abrir	-
Janelas	Quarto 1	150	100	162,24	100	110	2 faixas deslizantes horizontais	45
	Quarto 2	150	100	152,42	100			
	Cozinha	120	100	176,60	100			
	Sala	150	100	222,03	100			
	Banheiro	80	60	80	60	150	Basculante	70 (45°) / 90 (90°)

Fonte: elaboração própria.

Figura 29 – Modelo real (a) e modelo de referência (b)



Fonte: elaboração própria.

3.2.3 Simulações termoenergéticas conforme a NBR 15575-1:2021

A terceira etapa consistiu nas simulações termoenergéticas dos 438 cenários fictícios de projeto definidos, seguindo às instruções da NBR 15575-1:2021. Além disso, 3 simulações adicionais foram necessárias para avaliação do modelo de referência, um para cada zona bioclimática. Sendo assim, no total, 441 simulações termoenergéticas foram realizadas.

Todas as simulações foram realizadas com auxílio do *software* EnergyPlus® versão 8.9.0. A alteração de todas as variáveis de projeto foi realizada manualmente dentro do próprio *software*. O algoritmo de Diferença Finita de Condução (CondFD) foi utilizado para permitir a simulação adequada do PCM, com o esquema totalmente implícito para as formulações de transferência de calor. Além disso, o valor padrão de 3 para a Constante de Discretização Espacial e um passo de tempo igual a 3 minutos foram selecionados para fornecer resultados anuais aceitáveis (TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012).

Considerou-se como *input* os modelos termoenergéticos definidos na etapa anterior bem como os arquivos climáticos do Ano Meteorológico Típico (*Typical*

Meteorological Year – TMY) de cada cidade, desenvolvidos pelo INMET e disponibilizados no site do LabEEE/ UFSC (2018) para as três cidades selecionadas.

3.2.3.1. Características construtivas

As características térmicas dos elementos da construção, inseridas como *input* no EnergyPlus®, foram obtidas por meio de consulta a NBR 15220-2 (ABNT, 2008) e aos trabalhos de Ordenes *et al.* (2003) e Weber *et al.* (2017) e estão apresentadas na Tabela 6. Para o modelo de paredes pesadas (MPP), consideraram-se as características construtivas definidas por Triana, Lamberts e Sassi (2015), enquanto no modelo de referência (MRef), consideraram-se as especificações da NBR 15575-1 (ABNT, 2021). As características termofísicas fixas dos PCMs testados, além das propriedades variáveis apresentadas no Quadro 2, estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6 – Características térmicas dos elementos construtivos

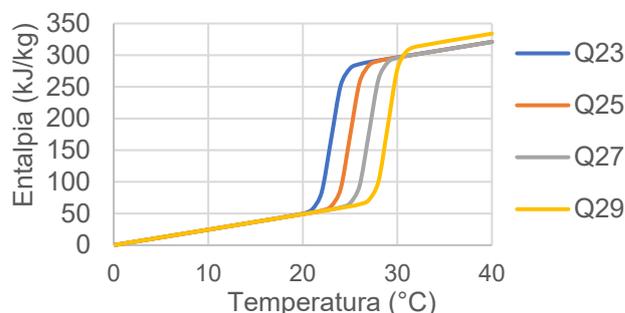
Material	Espessura (cm)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/kg.K)
Porta de madeira	3,0	0,14	600	2300
Argamassa de reboco ou regularização	2,0	1,15	2000	1000
Bloco cerâmico	1,66 *	0,9	1600	920
Argamassa de assentamento	1,3	1,15	2000	1000
Telha cerâmica	1,0	1,05	1900	920
Forro PVC	1,0	0,2	1300	960
Forro de gesso	1,25	0,35	900	840
Piso Cerâmico	1,0	1,05	1900	920
Contrapiso	5,0	1,75	2300	1000
Brita	3,0	0,7	1250	800
Placa cimentícia	1,0	0,95	2000	840
Isolamento térmico	5,0	0,045	100	750

Fonte: elaboração a partir de NBR 15220-2 (2008), Ordenes *et al.* (2003) e Weber *et al.* (2017).

Tabela 7 – Propriedades termofísicas constantes e curvas de entalpia-temperatura dos PCMs

Ponto de fusão (°C)	Calor latente (J/g)	Calor específico (J/gK)	Densidade (kg/m ³)
Q23*	223	2,45	850
Q25	223	2,45	850
Q27	223	2,45	850
Q29	236	2,45	850

*O número à direita da letra Q indica a temperatura de mudança de fase.



Fonte: elaboração a partir de *Phase Change Energy Solutions* (2020a; 2020b; 2020c; 2020d).

Nos cenários fictícios em que a aplicação do BioPCM™ foi considerada nas paredes do MPP, a argamassa interna foi substituída por acabamento em placa de gesso, visando atender as recomendações dos fabricantes. Assim, a manta de PCM

foi posicionada entre a placa de gesso e a alvenaria cerâmica. Por sua vez, para o modelo leve isolado (MLI), considerou-se o PCM posicionado entre o isolamento térmico e a placa de gesso tanto nas paredes externas quanto no teto da edificação.

As propriedades térmicas dos vidros foram determinadas a partir de consulta à biblioteca de materiais fornecida pela biblioteca do programa EnergyPlus®. Considerou-se vidro simples de 4 mm de espessura para os modelos MPP e MLI e 3 mm de espessura para o MRef. Na falta de especificações técnicas dos caixilhos, optou-se por adotar as especificações estabelecidas pela NBR 15575-1:2021 para a modelagem das molduras das janelas. Os fatores de ventilação (FV) da Tabela 5 foram utilizados para detalhar os fatores de largura e altura de abertura das janelas no objeto *Airflow Network MultiZone* do EnergyPlus®.

Para a resistência do ar, adotaram-se os valores de 0,16 m².K/W para os furos dos blocos cerâmicos e 0,21 (m².K)/W para o ático, referentes às direções horizontal e descendente do fluxo de calor para superfícies de alta emissividade, conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2008). Porém, após o cálculo da espessura equivalente dos blocos cerâmicos, considerou-se uma resistência de 0,15 m².K/W para a câmara de ar dos furos, visando manter a transmitância térmica original do elemento.

3.2.3.2. Condições de contorno

Os modelos foram simulados com todas as paredes externas expostas à radiação solar direta, sem sombreamento nas aberturas e sem taxa de renovação do ar nos ambientes. Adotou-se uma velocidade do ar padrão de 0,20 m/s, conforme proposto pela ASHRAE (2017).

Para levar em consideração as temperaturas do solo, utilizou-se o objeto *Ground Domain Slab*, cujo procedimento de simulação seguiu o manual desenvolvido por Mazzaferro, Melo e Lamberts (2015). Neste procedimento, optou-se por utilizar o modelo *Finite Difference* de temperaturas do solo não perturbadas para obter as condições de contorno da superfície. Para isso, utilizaram-se os valores mensais de temperatura do solo à profundidade de 2 m que se encontram no arquivo climático do EnergyPlus. Ao final, essa condição de limite externo foi atribuída às superfícies do piso em contato com o solo no objeto *Outside Boundary Condition Object*.

Cabe informar que a classificação da eficiência energética do modelo habitacional escolhido já foi verificada previamente por Triana, Lamberts e Sassi (2015) sob diferentes configurações para as condições climáticas da zona bioclimática 3. A partir

da análise de seus resultados, optou-se para a caracterização da presente simulação o azimute de 0°, que apresentou a pior classificação, visando investigar o potencial do PCM em melhorar o desempenho térmico da edificação em seu pior cenário.

3.2.3.3. Rotinas de uso e ocupação

As variáveis mensuráveis que determinam o conforto térmico podem ser divididas em humanas e ambientais. Dentre as variáveis humanas, tem-se o metabolismo gerado pelas atividades físicas e a resistência térmica oferecida pelas vestimentas das pessoas, bem como a abertura de janelas e o uso de sistemas de condicionamento artificial de ambientes para a redução do desconforto. Dentre as variáveis ambientais, tem-se a fração radiante, a velocidade, a temperatura e a umidade relativa do ar (ASHRAE, 2017; ASHRAE, 2009).

A ocupação máxima das unidades habitacionais foi considerada como quatro indivíduos, sendo quatro pessoas na sala/cozinha e duas pessoas nos quartos. Em todos os modelos, consideraram-se as taxas de calor metabólico, fração radiante, potências de lâmpadas e equipamentos e rotinas de uso, ocupação e a abertura e fechamento das esquadrias estabelecidas pela NBR 15575-1:2021. As propriedades isolantes da vestimenta dos usuários e a velocidade do vento não são abarcados nos procedimentos de cálculo do nível desempenho térmico da norma NBR 15575-1:2021, mas são considerados para a determinação da zona de conforto térmico da ASHRAE 55-2017. Assim, os valores recomendados pela ASHRAE (2017) para isolamento térmico das vestimentas foram adotados (Tabela 8), visando possibilitar a análise das simulações termoenergéticas segundo ambas as normas.

Tabela 8 – Isolamento térmico das vestimentas

Descrição da roupa	Isolamento das roupas (clo)
Calça e camisa de manga curta	0,57
Calça e camisa de manga comprida	0,61
Calças, camisa de manga comprida mais casaco	0,96
Bermuda e camisa de manga curta	0,36
Roupa de dormir	0,96

Fonte: elaboração a partir de ASHRAE (2017).

Visando simplificar a programação computacional do modelo termoenergético, realizou-se a média aritmética entre “Calça e camisa de manga curta”, “Bermuda e camisa de manga curta” e “Roupa de dormir”, obtendo-se o valor de 0,63 clo para os períodos quentes. Para os meses mais frios, calculou-se a média entre os valores de “Calça e camisa de manga comprida”, “Calças, camisa de manga comprida mais

casaco” e “Roupa de dormir”, resultando em 0,84 clo. Na Tabela 9, exibem-se os valores obtidos para os períodos quente e frio.

Tabela 9 – Isolamento térmico das vestimentas: valor médio

Período	Isolamento das roupas (clo)
Quente (janeiro a abril e setembro a dezembro)	0,63
Frio (maio a agosto)	0,84

Fonte: elaboração própria.

3.2.4 Avaliação do desempenho e conforto térmico dos modelos

A quarta etapa consistiu na avaliação do desempenho térmico e da frequência de horas em condições de conforto térmico aos ocupantes em cada cenário de simulação (Quadro 2) definido para a edificação, com e sem aplicação de PCM na envoltória. Para todas as análises, os resultados de temperatura operativa fornecidos como *output* das simulações foram analisados e manipulados por meio das ferramentas de cálculo do Microsoft Excel (2019).

Para avaliação do nível de desempenho térmico dos modelos, aplicou-se o método de simulação para ambientes naturalmente ventilados, estabelecido pela norma NBR 15575-1:2021. Em seguida, verificou-se se a edificação proposta atendeu aos requisitos para obter o nível de desempenho térmico Mínimo (M), que é obrigatório (ABNT, 2021). Este procedimento está detalhado no Anexo A do presente trabalho.

Para o cálculo das horas em condições de conforto térmico nos modelos, aplicou-se o método de conforto adaptativo descrito na seção 5.4.2.2. da ASHRAE 55-2017, considerando-se 80% de aceitabilidade em relação à temperatura neutra.

3.2.5 Comparação entre os cenários

Por fim, a quinta etapa consistiu na comparação descritiva e estatística de resultados entre os modelos com e sem PCM, visando validar os efeitos da utilização de PCM no desempenho da unidade habitacional (UH) e no proporcionamento das condições de conforto térmico aos ocupantes da edificação. Todos os testes estatísticos e comparações foram realizados por meio dos *softwares* Rstudio v. 4.0.5, e Microsoft Excel (2019), considerando nível de confiança de 95%.

Nas análises descritivas, parâmetros foram comparados, como as temperaturas operativas anuais máximas ($T_{o\max_{UH}}$) e mínimas ($T_{o\min_{UH}}$) durante os períodos de ocupação da UH, definidos pela Norma de Desempenho, bem como o percentual de horas em condições de conforto obtidos pela aplicação da ASHRAE 55-2017, obtidos um valor global para cada um dos 438 cenários fictícios.

Nas análises estatísticas, testes não-paramétricos foram realizados devido à não normalidade das amostras. Para tanto, utilizou-se o teste de Friedman⁴ para verificar se há alguma interferência dos diversos cenários de aplicação de PCM teóricos considerados nos resultados de conforto térmico. Na sequência, aplicou-se o teste *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni⁵, visando identificar quais são essas interferências e investigar os cenários nos quais a aplicação do PCM propiciou maior potencial de atendimento de horas em conforto em cada cidade testada. Nessa análise, o banco de dados continha os resultados de horas em condições de conforto térmico de 365 dias, referentes a um ano (variável dependente), obtidos para os 438 cenários fictícios diferentes simulados (variáveis independentes intra-sujeito).

Convém destacar que cada cenário de simulação recebeu uma identificação nominal única (ID) para categorização dos resultados, visando auxiliar nas análises descritivas e estatísticas. Cada ID foi obtida por meio da combinação de códigos referentes à cada variável de projeto considerada nos cenários. Por exemplo: o código “MPP.Q23.CapT400.MaCondT.PT.C” corresponde ao caso de modelo de paredes pesadas (MPP) com uso de PCM com 23 °C de ponto de fusão (Q23), 400 kJ/m² de capacidade de armazenamento de calor (CapT400), maior condutividade térmica de 2,5 W/m.K (**MaCondT**), aplicados nas paredes e no teto (PT) em Curitiba (C). Tal método de identificação permitiu que, na tabulação de resultados, a ID de cada cenário pudesse ser desmembrada, posteriormente, em 6 colunas, uma para cada fator de projeto, por meio da ferramenta de separação de colunas do Microsoft Excel (2019). Assim, foi possível comparar, também, por meio de gráficos descritivos, a influência dos fatores de projeto nos resultados do percentual de horas em condições de conforto térmico.

⁴ O teste de Friedman é o teste não-paramétrico utilizado para a comparação múltipla de dados amostrais pareados, onde a suposição de normalidade pode ser violada. A hipótese nula (H_0) é que existe igualdade entre as medianas populacionais, com nível de significância de 5% ($p\text{-value} > 0,05$). A hipótese alternativa (H_1) indica que nem todas as medianas são iguais ou que existe alguma diferença entre o formato de distribuição dos dados ($p\text{-value} \leq 0,05$) (HOLLANDER; WOLFE; CHICKEN, 2013).

⁵ O *post-hoc* de Wilcoxon compara grupos pareados de amostras, dois a dois, para todos os grupos possíveis. Já a correção de Bonferroni é utilizado para ajustar os valores de p para comparações múltiplas consecutivas, visando corrigir o erro do Tipo 1 (rejeição inadequada de H_0). A hipótese nula (H_0) é que existe igualdade entre as medianas amostrais, com nível de significância de 5% ($p\text{-value} > 0,05$). A hipótese alternativa (H_1) indica que existe diferença estatística entre as medianas amostrais ($p\text{-value} \leq 0,05$) (HOLLANDER; WOLFE; CHICKEN, 2013).

4 RESULTADOS

A seguir, o desenvolvimento da pesquisa é descrito, no qual são apresentadas a aplicação do método e a discussão dos resultados obtidos.

4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DOS MODELOS

A seguir, apresentam-se os resultados do desempenho térmico da edificação do estudo de caso, de acordo com o método de Simulação da NBR 15575-1:2021 para ambientes naturalmente ventilados, bem como do percentual de horas em condições de conforto térmico aos ocupantes, conforme a metodologia de conforto adaptativo da ASHRAE 55-2017 com 80% de aceitação em relação à temperatura neutra (T_n). No total, 438 cenários fictícios foram avaliados, variando-se: propriedades termofísicas do PCM (ponto de fusão, capacidade de armazenamento de energia e condutividade térmica); sistema construtivo (paredes pesadas ou sistema leve isolado); superfície de aplicação do PCM (teto e/ou paredes externas); e zona bioclimática (ZB 1, 2 e 3) para localização da edificação.

Vale lembrar que, para obter classificação de desempenho térmico de nível Mínimo (M) em edificações unifamiliares, é necessário que a unidade habitacional (UH) atenda a três critérios:

- $PHFT_{UH,real} > 0,90 \cdot PHFT_{UH,ref}$;
- $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + 2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

O sufixo “ref” das equações se refere aos resultados da UH do modelo de referência (MRef), enquanto o sufixo “real” é referente à UH proposta para análise (modelo real). Neste trabalho, os critérios de desempenho do modelo real foram analisados para os dois tipos de sistemas construtivos propostos: modelo de paredes pesadas ($UH_{,real-MPP}$) e modelo leve isolado ($UH_{,real-MLI}$).

4.1.1 Desempenho térmico segundo a NBR 15575-1:2021 – modelos sem PCM

A seguir, os valores dos parâmetros de desempenho ($PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$) da UH analisada são apresentados para as três cidades nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI) sem PCM. Convém destacar que os critérios especificados no item anterior já foram aplicados nos resultados

apresentados nesta sessão e que a memória de cálculo está apresentada no Apêndice A ao Apêndice D.

4.1.1.1. Modelo de paredes pesadas (MPP)

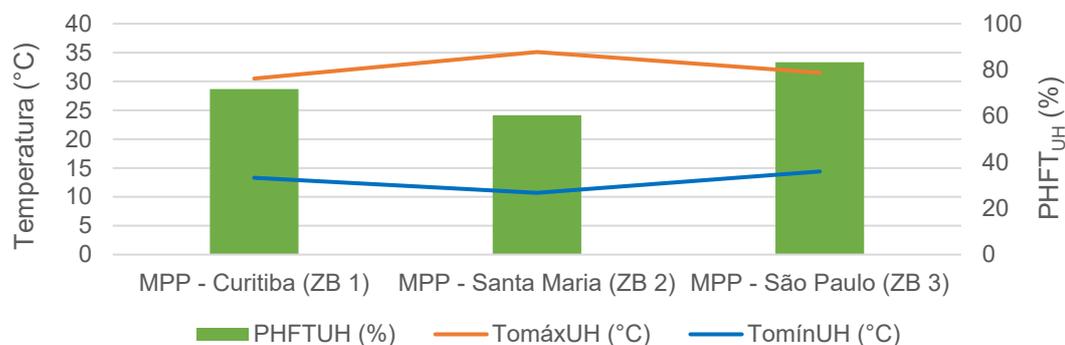
Na Tabela 10, são indicados os valores obtidos para os limites de referência de cada critério de desempenho térmico para que a UH em análise apresente nível Mínimo (M) de desempenho térmico em cada zona bioclimática do modelo de paredes pesadas, cujo atendimento ou não está destacado nas cores verde e vermelho, respectivamente. Um resumo dessa avaliação está apresentado na Figura 30.

Tabela 10 – Diagnóstico de desempenho térmico – MPP sem PCM

Modelo	Critérios	Zona bioclimática (ZB)		
		ZB 1	ZB 2	ZB 3
Referência (MRef)	PHFT limite (%)	> 67,2	> 55,1	> 81,1
	Tomáx limite(°C)	≤ 29,8	≤ 34,6	≤ 30,6
	Tomín limite(°C)	≥ 12,7	≥ 11,1	≥ 14,4
Paredes pesadas (MPP) sem PCM	PHFT _{UH,real-MPP} (%)	71,7	60,4	83,3
	Tomáx _{UH,real-MPP} (°C)	30,5	35,1	31,5
	Tomín _{UH,real-MPP} (°C)	13,3	10,7	14,4
	Atendimento do nível Mínimo (M) de desempenho térmico	Não	Não	Não

Fonte: elaboração própria.

Figura 30 – PHFT_{UH}, Tomáx_{UH} e Tomín_{UH} da edificação em cada zona bioclimática (ZB) – modelo de paredes pesadas (MPP) sem PCM



Fonte: elaboração própria.

Os resultados mostraram que a edificação em suas características originais (modelo de paredes pesadas sem PCM) não apresentou desempenho térmico de nível Mínimo (M) para nenhuma das cidades avaliadas, o que deveria ser obrigatório. Isto indica a necessidade de ajuste na envoltória para a adequação do desempenho térmico da UH ao clima, visando o atendimento da norma NBR 15575-1:2021.

Em suma, nenhum cenário atendeu ao critério da Tomáx_{UH}, sendo o menor valor de Tomáx_{UH} (30,5°C) encontrado em Curitiba (ZB 1).

Santa Maria (ZB 2) apresentou os piores resultados em todos os critérios de desempenho térmico, o que pode estar relacionado com a grande amplitude térmica na região. Os piores extremos de temperatura foram verificados na cidade, tanto para frio como calor, com $Tomín_{UH}$ de $10,7^{\circ}C$, $Tomáx_{UH}$ de $35,1^{\circ}C$ e $PHFT_{UH}$ de até $60,4\%$.

Por outro lado, São Paulo (ZB 3) apresentou os melhores resultados dentro dos critérios atendidos, com $PHFT_{UH}$ de até $83,3\%$ e $Tomín_{UH}$ de $14,4^{\circ}C$, mas ainda assim não atendeu à Norma de Desempenho.

4.1.1.2. Modelo leve isolado (MLI)

Os resultados da edificação composta por sistema construtivo leve (modelo leve isolado sem PCM) atingiu desempenho térmico de nível Mínimo (M) nas três cidades avaliadas. Um resumo desta avaliação é apresentado na Tabela 10, seguindo a mesma lógica de interpretação da tabela anterior.

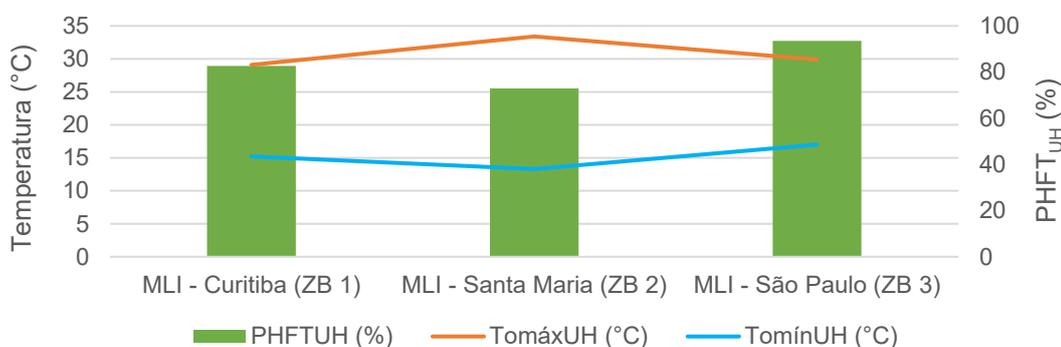
Tabela 11 – Diagnóstico de desempenho térmico – modelo leve isolado (MLI) sem PCM

Modelo	Critérios	Zona bioclimática (ZB)		
		ZB 1	ZB 2	ZB 3
Referência (MRef)	PHFT limite (%)	> 67,2	> 55,1	> 81,1
	Tomáx limite($^{\circ}C$)	\leq 29,8	\leq 34,6	\leq 30,6
	Tomín limite($^{\circ}C$)	\geq 12,7	\geq 11,1	\geq 14,4
MLI sem PCM	$PHFT_{UH,real-MLI}$ (%)	82,7	72,9	93,5
	$Tomáx_{UH,real-MLI}$ ($^{\circ}C$)	29,1	33,4	29,9
	$Tomín_{UH,real-MLI}$ ($^{\circ}C$)	15,2	13,3	17,0
	Atendimento do nível Mínimo (M) de desempenho térmico	Sim	Sim	Sim

Fonte: elaboração própria.

Na Figura 31, é apresentado o gráfico com os valores do $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ para a UH analisada para as três cidades no MLI sem PCM.

Figura 31 – $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ da edificação em cada zona bioclimática (ZB) – modelo leve isolado (MLI) sem PCM



Fonte: elaboração própria.

Em suma, todos critérios de desempenho térmico foram atendidos. Logo, a troca do sistema construtivo, de paredes pesadas para leve isolado, foi uma estratégia eficaz para o alcance do Nível Mínimo (M) de desempenho térmico pela edificação nas três cidades, mesmo sem PCM. Esta estratégia permitiu o aumento dos valores de $PHFT_{UH}$ (entre 10,2 e 12,5%) e de $Tomín_{UH}$ (entre 1,9 e 2,6 °C), bem como a redução dos valores de $Tomáx_{UH}$ (entre 1,4 e 1,7°C) nas três cidades, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Impacto no desempenho térmico da edificação em cada zona bioclimática (ZB) devido à troca do modelo de paredes pesadas (MPP) para o leve isolado (MLI) – sem PCM

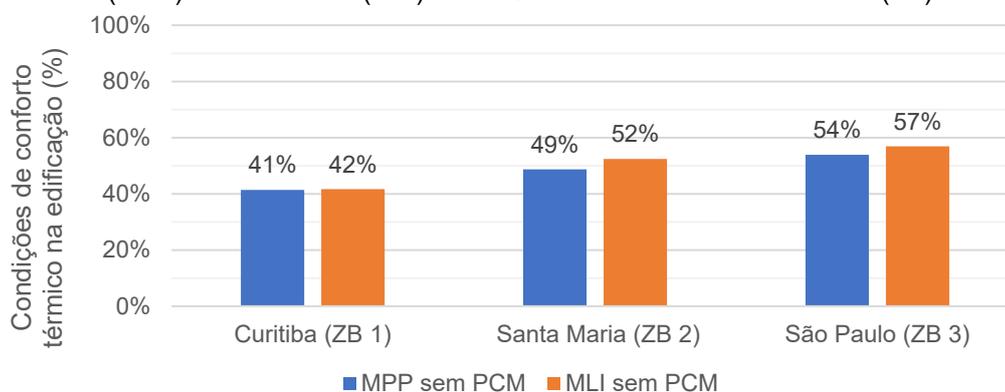
Melhoria dos critérios de desempenho térmico	ZB 1	ZB 2	ZB 3
Aumento do $PHFT_{UH,real}$ (%)	11,0	12,5	10,2
Redução do $Tomáx_{UH,real}$ (°C)	1,4	1,7	1,6
Aumento do $Tomín_{UH,real}$ (°C)	1,9	2,6	2,6

Fonte: elaboração própria.

4.1.2 Conforto térmico conforme a ASHRAE 55-2017 – modelos sem PCM

Os resultados do percentual de horas em condições de conforto térmico obtidos para a edificação no modelo de paredes pesadas (MPP) e no modelo leve isolado (MLI) sem PCM, em cada zona bioclimática (ZB), estão apresentadas na Figura 32. A memória de cálculo dessa avaliação pode ser consultada no Apêndice E. Verifica-se que a troca do sistema construtivo do MPP para o MLI propiciou uma melhoria no conforto térmico de 0,3% em Curitiba-PR (ZB 1), 3,7% em Santa Maria-RS (ZB 2) e 3,0% em São Paulo-SP (ZB 3), mesmo sem PCM.

Figura 32 – Percentual de horas em condições de conforto térmico nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI) sem PCM em cada zona bioclimática (ZB)



Fonte: elaboração própria.

Apesar de Santa Maria (ZB 2) ter apresentado o pior desempenho térmico, Curitiba (ZB 1) foi a cidade que apresentou os piores resultados de conforto térmico entre as três cidades. Por outro lado, São Paulo (ZB 3), que apresentou os melhores resultados

de desempenho térmico, também foi a cidade com melhores resultados das condições de conforto térmico. Também pode-se verificar que os valores encontrados de PHFT foram maiores do que os resultados encontrados para o percentual de horas em condições de conforto térmico, considerando um mesmo cenário de análise.

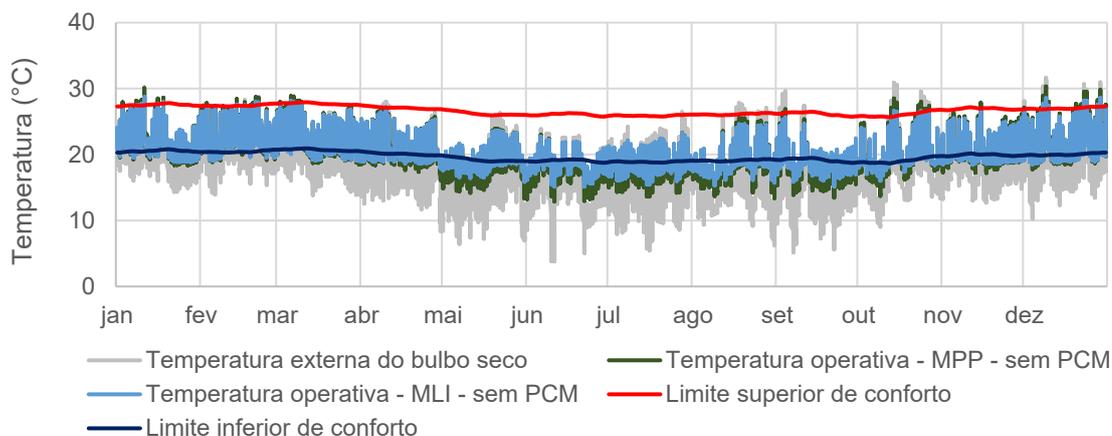
Esta diferença entre os resultados de desempenho e conforto térmico nos modelos se deve aos diferentes limites de temperatura estabelecidos pelas normas NBR 15575-1:2021 e ASHRAE 55-2017. Na norma brasileira, o intervalo limite de temperatura permitido para o cálculo do PHFT varia de 18 a 26 °C. Por outro lado, na norma americana, os limites da faixa de temperatura aceitável aos usuários obtida pelas simulações foram mais altos e menos permissivos, variando, em média para as três ZBs, entre 20,1 e 27,1 °C, equivalente à temperatura neutra (23,6 °C) \pm 3,5 °C. Além disso, as horas em que a temperatura externa está acima de 33,5 °C ou abaixo de 10°C não são consideradas pelo método adaptativo de conforto da ASHRAE. Assim, a maior parte horas ocupadas em condições de desconforto térmico nos modelos foram devido ao frio, conforme observa-se na Tabela 13 e na parte inferior à linha azul escura da Figura 33.

Tabela 13 – Condições de desconforto térmico nos modelos sem PCM em cada zona bioclimática (ZB)

Condições de desconforto térmico (%)	Modelo de paredes pesadas (MPP) sem PCM			Modelo leve isolado (MLI) sem PCM		
	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
Frio	51,5	33,8	43,1	52,1	32,2	41,3
Calor	1,4	6,4	2,7	0,6	4,4	1,6

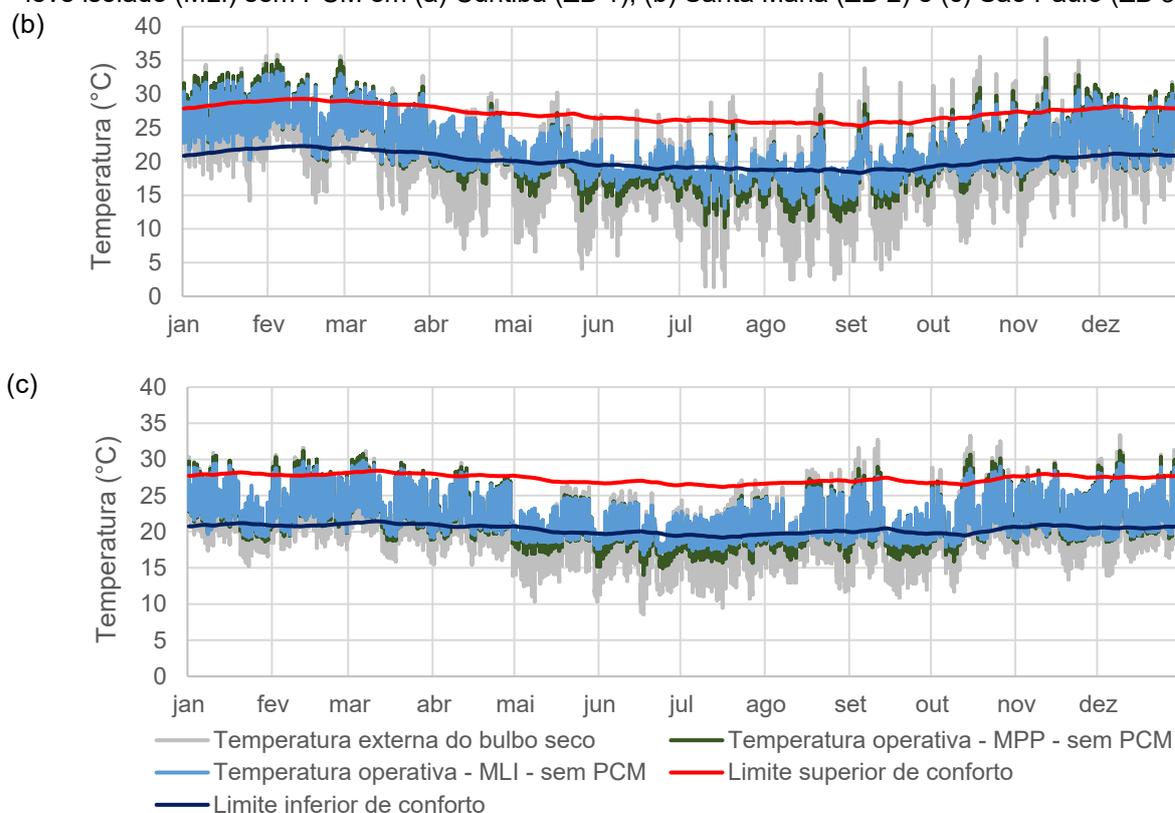
Fonte: elaboração própria.

Figura 33 – Comportamento térmico anual do Quarto 2 nos modelos de paredes Pesadas (MPP) e Leves Isoladas (MLI) sem PCM em (a) Curitiba (ZB 1), (b) Santa Maria (ZB 2) e (c) São Paulo (ZB 3) (a)



(continua)

Figura 33 – Comportamento térmico anual do Quarto 2 nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI) sem PCM em (a) Curitiba (ZB 1), (b) Santa Maria (ZB 2) e (c) São Paulo (ZB 3)



Fonte: elaboração própria.

4.1.3 Desempenho e conforto térmico dos modelos com PCM

4.1.3.1. Modelo de paredes pesadas (MPP) – com PCM

Os resultados sintetizados na Tabela 14 indicam que mais da metade dos casos do modelo de paredes pesadas (MPP) com aplicação de PCM, o nível Mínimo (M) de desempenho térmico não foi atingido pela edificação, como pode ser visto nas **células hachuradas**. Por outro lado, houve melhoria do percentual horas potenciais em condições de conforto térmico em quase todos os casos de aplicação de PCM no MPP.

Sendo assim, em **vermelho** na Tabela 14, destacam-se os casos em que houve piora dos resultados, quando comparados ao MPP, sem PCM. Em **negrito verde**, por sua vez, apresentam-se os melhores benefícios para cada ZB, nos quais o uso de PCM propiciou reduções máximas de 1,5 a 3,3 °C na $Tomá_{UH}$ e aumento máximo de 8,6 a 12,5% no potencial de atendimento às condições de conforto térmico, dependendo da zona. Pouco ou nenhum impacto foi observado nos valores de $Tomín_{UH}$ (até $\pm 0,3$ °C), devido ao PCM, em todos os cenários do MPP. Contudo, os

casos em que ofereceram potencialmente as melhores condições de conforto térmico no ambiente coincidiram com aqueles em que houve maior aumento do $Tomín_{UH}$.

Tabela 14 – Efeito do PCM nos valores de $Tomáx_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico nos cenários do modelo de paredes pesadas (MPP) para cada zona bioclimática (ZB)

PF (°C)	CondT (W/m.K)	CapT (kJ/m ²)	Superfície com PCM	Redução da $Tomáx_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento da $Tomín_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento do potencial das condições de conforto pelo PCM (%)		
				ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
23	0,15	400	t	0	-0,1	0,1	0	0	0	3,2	1,8	3,3
			p	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0	3,4	2,3	3,7
			t+p	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,2	0	5,5	3,8	5,8
		825	t	0,2	0	0,3	0	0	0,1	5,6	3,2	5,8
			p	0,1	-0,2	0	-0,1	0	0,1	7,1	4,8	7,1
			t+p	0,3	-0,2	0,1	-0,1	0	0,1	10,4	6,9	9,9
		1250	t	0,3	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	6,5	4,0	6,7
			p	0,3	-0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	9,1	5,8	8,9
			t+p	0,5	0	0,4	0,2	0,2	0,3	12,5	8,6	12,0
	2,5	400	t	0	-0,1	0,1	0	-0,1	0	3,2	1,8	3,3
			p	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0	3,4	2,3	3,7
			t+p	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,3	0	5,4	3,8	5,8
		825	t	0,1	-0,1	0,2	0	0	0	5,3	3,0	5,5
			p	0,1	-0,2	0	-0,2	-0,1	0	6,8	4,5	6,8
			t+p	0,2	-0,3	0	-0,2	-0,2	0	10	6,6	9,4
		1250	t	0,2	0	0,2	0	0	0	6,2	3,7	6,3
			p	0,3	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	0	8,4	5,5	8,5
			t+p	0,4	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	0	11,9	7,8	11,2
25	0,15	400	t	0,1	0	0,2	0	0	0	1,6	1,4	1,8
			p	0	-0,3	0	-0,2	-0,2	0	1,3	1,4	1,4
			t+p	0,2	-0,3	0,2	-0,3	-0,2	0	2,6	2,4	2,7
		825	t	0,5	0,1	0,5	0	0	0,1	3,7	2,7	4,1
			p	0,7	-0,2	0,5	-0,1	0	0,1	3,6	3,4	4,1
			t+p	1,2	-0,1	0,9	-0,1	0	0,1	5,5	5,5	6,3
		1250	t	0,8	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1	4,9	3,7	5,3
			p	1,5	-0,1	0,9	0	0,1	0,2	4,9	5,0	5,8
			t+p	2,3	0	1,5	0,1	0,2	0,3	7,1	7,5	8,2
	2,5	400	t	0,1	-0,1	0,2	0	-0,1	0	1,8	1,4	1,9
			p	0	-0,3	0	-0,2	-0,2	0	1,4	1,4	1,5
			t+p	0,1	-0,4	0,2	-0,3	-0,3	0	2,8	2,4	2,8
		825	t	0,4	0	0,4	0	0	0	3,6	2,6	3,9
			p	0,7	-0,2	0,5	-0,2	-0,1	0	3,5	3,2	4,0
			t+p	1,0	-0,3	0,7	-0,2	-0,2	0	5,2	4,9	5,9
		1250	t	0,6	0	0,6	0	0	0	4,7	3,4	5,0
			p	1,4	-0,1	0,9	-0,1	-0,1	0	4,4	4,4	5,4
			t+p	2,0	-0,1	1,2	-0,1	-0,1	0	6,5	6,9	7,6

(continua)

(continuação)

Tabela 14 – Efeito do PCM nos valores de TomáxUH, TomínUH e nas condições de conforto térmico nos cenários do modelo de paredes pesadas (MPP) para cada zona bioclimática (ZB)

PF (°C)	CondT (W/m.K)	CapT (kJ/m ²)	Superfície com PCM	Redução da TomáxUH,real-MPP pelo PCM (°C)			Aumento da TomínUH,real-MPP pelo PCM (°C)			Aumento do potencial das condições de con-forto pelo PCM (%)		
				ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
27	0,15	400	t	0,2	0	0,3	0	0	0	1,1	0,9	1,0
			p	0,2	-0,1	0,2	-0,2	-0,2	0	0	0,7	0,1
			t+p	0,5	-0,1	0,5	-0,3	-0,2	0	0,8	1,4	0,8
		825	t	0,8	0,2	0,9	0	0	0,1	2,3	2,2	2,5
			p	1,4	0	1,5	-0,1	0	0,1	1,5	2,3	1,8
			t+p	2,3	0,2	2,4	-0,1	0	0,1	2,8	4,0	3,6
		1250	t	1,6	0,3	1,6	0,1	0,1	0,1	2,8	3,1	3,4
			p	1,8	0,2	2,2	0	0,1	0,2	2,2	3,3	3,0
			t+p	3,2	0,5	3,3	0,1	0,2	0,3	4,0	6,0	5,2
	2,5	400	t	0,2	0	0,3	0	-0,1	0	1,2	0,9	1,2
			p	0,2	-0,2	0,2	-0,2	-0,2	0	0	0,7	0,2
			t+p	0,4	-0,2	0,4	-0,3	-0,3	0	1,1	1,4	1,1
		825	t	0,7	0,1	0,8	0	0	0	2,2	2,0	2,2
			p	1,3	0	1,4	-0,2	-0,1	0	1,1	1,9	1,5
			t+p	2,1	0	2,2	-0,2	-0,2	0	2,5	3,6	3,1
		1250	t	1,5	0,2	1,4	0	0	0	2,6	2,7	3,0
			p	1,8	0,2	2,1	-0,1	-0,1	0	1,8	2,9	2,5
			t+p	3	0,2	3,1	-0,1	-0,1	0	3,3	5,2	4,4
29	0,15	400	t	0,3	0,2	0,4	0	0	0	0,6	0,5	0,5
			p	0,4	0,1	0,4	-0,2	-0,2	0	-0,8	-0,1	-0,7
			t+p	0,8	0,2	0,8	-0,3	-0,2	0	-0,4	0,2	-0,3
		825	t	1,1	0,5	1,1	0	0	0,1	1,5	1,4	1,5
			p	1,0	0,7	1,4	-0,1	0	0,1	0,1	1,1	0,4
			t+p	2	1,0	2,3	-0,1	0	0,1	1,2	2,3	1,6
		1250	t	1,5	0,7	1,9	0,1	0,1	0,1	1,9	1,9	2,2
			p	1,3	1,1	1,7	0	0,1	0,2	0,8	1,9	1,1
			t+p	2,4	1,5	3	0,1	0,2	0,2	2,1	3,9	3,1
	2,5	400	t	0,2	0,1	0,3	0	-0,1	0	0,8	0,5	0,6
			p	0,4	0,1	0,4	-0,3	-0,2	0	-0,6	0	-0,6
			t+p	0,7	0,2	0,7	-0,3	-0,3	0	-0,1	0,3	-0,1
		825	t	1,0	0,4	1,0	0	0	0	1,3	1,3	1,3
			p	1,0	0,6	1,3	-0,2	-0,1	0	-0,2	0,9	0,1
			t+p	1,9	0,8	2,2	-0,2	-0,2	0	0,9	1,8	1,1
		1250	t	1,4	0,5	1,8	0	0	0	1,6	1,5	1,8
			p	1,2	1,0	1,6	-0,1	-0,1	0	0,2	1,5	0,7
			t+p	2,3	1,2	2,8	-0,1	-0,1	0	1,6	2,8	2,2

Legenda: células não hachuradas – atendimento ao nível Mínimo (M) de desempenho térmico de acordo com a Norma NBR 15575-1:2021; células hachuradas – não atenderam ao nível M de desempenho térmico; **texto em negrito verde:** melhores resultados de TomáxUH, TomínUH e de condições de conforto térmico; **texto em vermelho:** piora dos resultados de TomáxUH e de conforto térmico; siglas: PF = ponto de fusão; CondT = condutividade térmica; CapT = capacidade de armazenamento de energia; t = teto; p = paredes; t+p = teto e paredes.

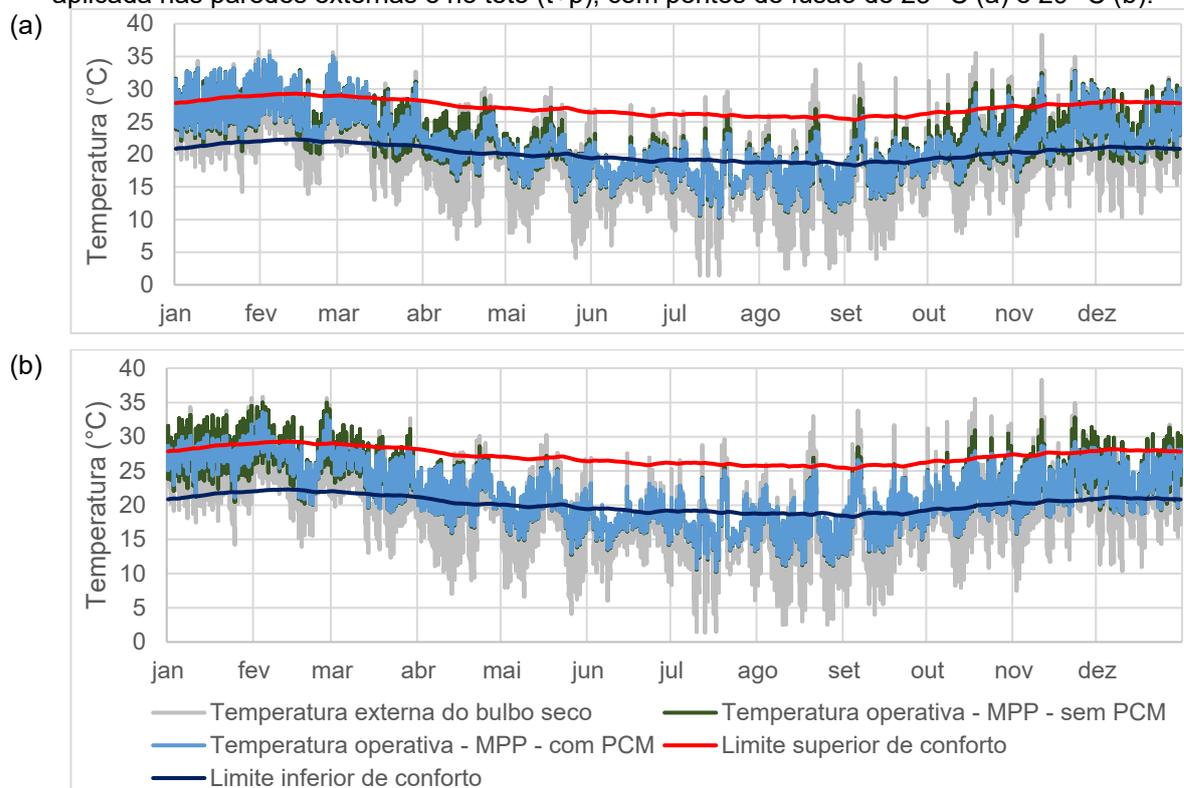
Fonte: elaboração própria.

Em geral, o aumento do ponto de fusão do PCM até um nível ótimo proporcionou maiores reduções de $Tomá_{UH}$, assim como observado por Brito *et al.* (2017), sendo 27 °C para as ZBs 1 e 3 e 29°C para a ZB 2. Por outro lado, pontos de fusão mais baixos (entre 23 e 25 °C) proporcionaram melhores benefícios no potencial de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes (Tabela 14), o que está de acordo com as faixas de pontos de fusão ideais recomendadas na literatura e apresentadas no Apêndice A (PEIPPO; KAURANEN; LUND, 1991; BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016; SURESH; KUMAR HOTTA; SAHA, 2022). Estes resultados demonstram uma incongruência entre os critérios das normas NBR 15575-1:2021 e ASHARE 55-2017. Ou seja, uma única ocorrência em que a temperatura interna máxima esteja acima do valor máximo estabelecido pela norma brasileira impediu que a UH atingisse o nível Mínimo (M) de desempenho térmico. No entanto, isso não implicou necessariamente no agravamento das suas condições de conforto térmico aos usuários ao longo de todo o ano.

Os piores resultados foram encontrados na ZB 2, no qual nenhum caso com PCM atingiu nível Mínimo (M) de desempenho térmico da NBR 15575-1:2021 (Tabela 14). Assim como observado por Brandalise, Almeida e Ordenes (2020), Alam *et al.* (2014), Staszczuk e Kuczyński (2021) e Nurlybekova, Memon e Adilkhanova (2021), a eficácia de cada ponto de fusão do PCM foi diferente para cada época do ano, o que pode ser devido à grande amplitude térmica e à brusca flutuação da temperatura externa em Santa Maria (ZB 2) durante o dia, não sendo suficiente para derreter completamente o PCM. Nesta zona, o ponto de fusão de 23 °C propiciou melhor desempenho na primavera (Figura 34a). Enquanto isso, o ponto de fusão de 29 °C foi mais adequado para o verão, permanecendo quase inativo no inverno (Figura 34b). Isso sugere que, durante as ondas de calor, pode-se esperar problemas com a solidificação incompleta do PCM (NURLYBEKOVA; MEMON; ADILKHANOVA, 2021).

Diante disso, pode-se concluir que o PCM auxiliou na manutenção das temperaturas internas da UH do modelo de paredes pesadas (MPP) dentro da faixa de conforto térmico recomendada para o clima ao longo do ano. Contudo, o PCM avaliado não se mostrou vantajoso para a melhoria do nível de Desempenho térmico da UH no MPP, segundo a NBR 15575-1:2021, principalmente na ZB 2.

Figura 34 – Comportamento térmico no Quarto 2 (ZB 2) ao longo do ano – PCM com capacidade máxima de armazenamento de energia (1250 kJ/m²) e condutividade térmica mínima (0,15 W/m.K) aplicada nas paredes externas e no teto (t+p), com pontos de fusão de 23 °C (a) e 29 °C (b).



Fonte: elaboração própria.

4.1.3.2. Modelo leve isolado (MLI) – com PCM

Nos cenários do modelo leve isolado (MLI), todas as aplicações de PCM atingiram o nível Mínimo (M) de Desempenho Térmico segundo a NBR 15575-1:2021. Além disso, todos os PCMs testados proporcionaram melhorias nos valores de $Tomá_{UH}$ (reduções de até 3,6 °C), $Tomín_{UH}$ (aumentos de até 0,7 °C) e também no potencial de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes (em até 14,5%), em comparação com os MLI sem PCM (Tabela 15). Novamente, os pontos de fusão para melhores condições de conforto térmico foram menores do que aqueles para maiores reduções de $Tomá_{UH}$ e também apresentam maiores aumentos do $Tomín_{UH}$.

Segundo Auzeby *et al.* (2016), o uso de PCM em edificações aumenta a capacidade de armazenamento térmico do edifício, tornando uma construção "leve" mais próxima de uma "pesada". Cabe lembrar que uma construção pesada já apresenta maior inércia térmica que uma construção leve (sem isolamento) e sem PCM. Não obstante, a redução da amplitude térmica propiciada pelo PCM se dá pelo processo de armazenamento de calor latente durante sua mudança de fase,

mantendo assim faixas de temperatura constantes em torno de um ponto de fusão selecionado.

Tabela 15 – Efeito do PCM nos valores de $Tomá_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico em cada cenário do modelo leve isolado (MLI) para cada zona bioclimática (ZB)

PF (°C)	CondT (W/m.K)	CapT (kJ/m ²)	Superfície com PCM	Redução da $Tomá_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento da $Tomín_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento do potencial das condições de conforto pelo PCM (%)		
				ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
23	0,15	400	t	0,5	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	5,8	3,4	6,1
			p	0,7	0,2	0,5	0,2	0,2	0,1	8,3	5,7	8,1
			t+p	1,1	0,4	0,8	0,3	0,3	0,2	10,3	7,6	10,4
		825	t	0,8	0,3	0,6	0,2	0,2	0,1	7,1	4,1	7,5
			p	1,1	0,4	0,8	0,3	0,3	0,1	10,8	7,4	10,9
			t+p	1,9	0,6	1,1	0,5	0,5	0,2	13,0	9,1	13,1
		1250	t	1,1	0,4	0,8	0,3	0,3	0,1	7,4	4,5	8,4
			p	1,7	0,5	1,0	0,4	0,4	0,2	12,1	8,2	12,3
			t+p	3,1	0,8	1,3	0,7	0,6	0,3	14,1	9,9	14,5
	2,5	400	t	0,5	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1	6,1	3,5	6,3
			p	0,7	0,3	0,5	0,2	0,2	0,1	8,6	6,0	8,4
			t+p	1,1	0,5	0,8	0,4	0,4	0,3	10,9	7,9	10,8
		825	t	0,8	0,3	0,6	0,2	0,2	0,1	7,1	4,2	7,5
			p	1,1	0,4	0,8	0,3	0,3	0,1	10,8	7,3	10,9
			t+p	1,9	0,6	1,1	0,5	0,5	0,3	13,1	9,2	13,1
		1250	t	1,2	0,3	0,7	0,3	0,3	0,1	7,5	4,6	8,5
			p	1,7	0,5	1,0	0,4	0,4	0,1	12,0	8,2	12,3
			t+p	3,1	0,8	1,3	0,6	0,6	0,3	14,1	9,8	14,5
25	0,15	400	t	1,4	0,2	1,0	0,1	0,2	0,1	3,6	3,7	4,1
			p	1,7	0,3	1,2	0,2	0,2	0,1	4,3	4,7	4,7
			t+p	2,7	0,5	1,6	0,3	0,3	0,2	5,7	6,4	6,4
		825	t	2,0	0,3	1,4	0,2	0,2	0,1	4,4	4,8	5,5
			p	2,4	0,5	1,7	0,3	0,3	0,1	5,6	6,8	6,5
			t+p	3,3	0,7	2,6	0,5	0,5	0,2	7,1	8,5	7,9
		1250	t	2,2	0,4	1,7	0,2	0,3	0,1	5,1	5,4	6,3
			p	2,7	0,6	2,2	0,4	0,4	0,2	6,6	8,0	7,5
			t+p	3,6	0,9	3,1	0,6	0,6	0,30	8,4	9,4	9,2
	2,5	400	t	1,4	0,2	1,0	0,2	0,2	0,1	3,7	3,9	4,4
			p	1,7	0,3	1,2	0,2	0,2	0,1	4,7	5,0	5,2
			t+p	2,7	0,6	1,6	0,4	0,4	0,3	6,4	6,8	7,0
		825	t	2	0,3	1,4	0,2	0,2	0,1	4,6	4,9	5,5
			p	2,4	0,5	1,7	0,3	0,3	0,1	5,8	6,9	6,5
			t+p	3,3	0,7	2,6	0,5	0,5	0,3	7,3	8,5	8,1
		1250	t	2,2	0,4	1,7	0,2	0,3	0,1	5,1	5,4	6,3
			p	2,7	0,6	2,2	0,4	0,4	0,2	6,5	7,9	7,5
			t+p	3,5	0,9	3,1	0,6	0,6	0,30	8,4	9,2	9,2
27	0,15	400	t	1,2	0,5	1,4	0,1	0,2	0,1	2,1	2,7	2,7
			p	1,5	0,6	1,7	0,2	0,2	0,1	3,1	3,9	3,6
			t+p	2,1	0,9	2,3	0,3	0,3	0,2	4,2	5,9	4,8
		825	t	1,5	0,7	1,6	0,2	0,2	0,1	2,7	3,9	3,5
			p	1,9	0,9	2,1	0,3	0,3	0,1	3,9	5,6	4,5
			t+p	2,4	1,3	2,7	0,5	0,5	0,3	5,4	7,6	5,9
		1250	t	1,6	0,9	1,7	0,2	0,3	0,1	3,2	4,5	4,0
			p	2,1	1,1	2,2	0,4	0,4	0,2	4,7	6,5	5,2
			t+p	2,6	1,7	2,8	0,6	0,6	0,3	6,0	8,3	6,5

(continua)

Tabela 15 – Efeito do PCM nos valores de $Tomá_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e nas condições de conforto térmico em cada cenário do modelo leve isolado (MLI) para cada zona bioclimática (ZB)

PF (°C)	CondT (W/m.K)	CapT (kJ/m ²)	Superfície com PCM	Redução da $Tomá_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento da $Tomín_{UH,real-MPP}$ pelo PCM (°C)			Aumento do potencial das condições de conforto pelo PCM (%)		
				ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
29	2,5	400	t	1,2	0,5	1,4	0,2	0,2	0,1	2,5	3,0	3,2
			p	1,5	0,6	1,7	0,2	0,3	0,1	3,6	4,2	4,1
			t+p	2,1	0,9	2,3	0,4	0,4	0,3	5,1	6,3	5,8
		825	t	1,5	0,7	1,6	0,2	0,2	0,1	2,8	4,0	3,6
			p	1,9	0,9	2,1	0,3	0,3	0,1	4,1	5,6	4,6
			t+p	2,4	1,3	2,7	0,5	0,5	0,3	5,6	7,6	6,1
		1250	t	1,6	0,9	1,7	0,3	0,3	0,1	3,2	4,6	4,1
			p	2,1	1,1	2,2	0,4	0,4	0,2	4,7	6,5	5,2
			t+p	2,6	1,7	2,8	0,6	0,6	0,3	6,1	8,3	6,6
	0,15	400	t	0,7	1,2	0,9	0,1	0,2	0,1	1,6	1,7	1,8
			p	0,9	1,4	1,2	0,2	0,2	0,1	2,5	2,4	2,7
			t+p	1,2	2,3	1,6	0,3	0,3	0,2	3,6	4,0	4,1
825			t	0,8	1,9	1,1	0,2	0,2	0,1	2,1	2,3	2,4
			p	1,2	2,4	1,5	0,3	0,3	0,1	3,3	3,7	3,6
			t+p	1,6	3,1	1,8	0,5	0,5	0,2	4,7	5,7	5,2
1250			t	1,0	2	1,2	0,2	0,3	0,1	2,6	2,7	2,9
			p	1,4	2,6	1,6	0,4	0,4	0,2	4,1	4,5	4,3
			t+p	1,7	3,3	2,0	0,6	0,6	0,3	5,5	6,8	5,9
2,5		400	t	0,7	1,2	0,9	0,2	0,2	0,1	2,0	1,9	2,3
			p	0,9	1,4	1,2	0,2	0,3	0,1	3,1	2,8	3,3
			t+p	1,3	2,3	1,6	0,4	0,4	0,3	4,7	4,7	5,0
	825	t	0,8	1,9	1,1	0,2	0,2	0,1	2,3	2,4	2,5	
		p	1,2	2,4	1,5	0,3	0,3	0,1	3,5	3,7	3,8	
		t+p	1,5	3,1	1,8	0,5	0,5	0,3	5,1	5,8	5,4	
	1250	t	0,9	2,0	1,2	0,2	0,3	0,1	2,7	2,8	3,0	
		p	1,3	2,5	1,6	0,4	0,4	0,2	4,1	4,5	4,3	
		t+p	1,7	3,3	2,0	0,6	0,6	0,3	5,7	6,7	6,1	

Legenda: células não hachuradas – atendimento ao nível Mínimo (M) de desempenho térmico conforme a NBR 15575-1:2021; **texto em negrito verde:** melhores resultados de $Tomá_{UH}$, $Tomín_{UH}$ e de condições de conforto térmico; siglas: PF = ponto de fusão; CondT = condutividade térmica; CapT = capacidade de armazenamento de energia; t = teto; p = paredes; t+p = teto e paredes.

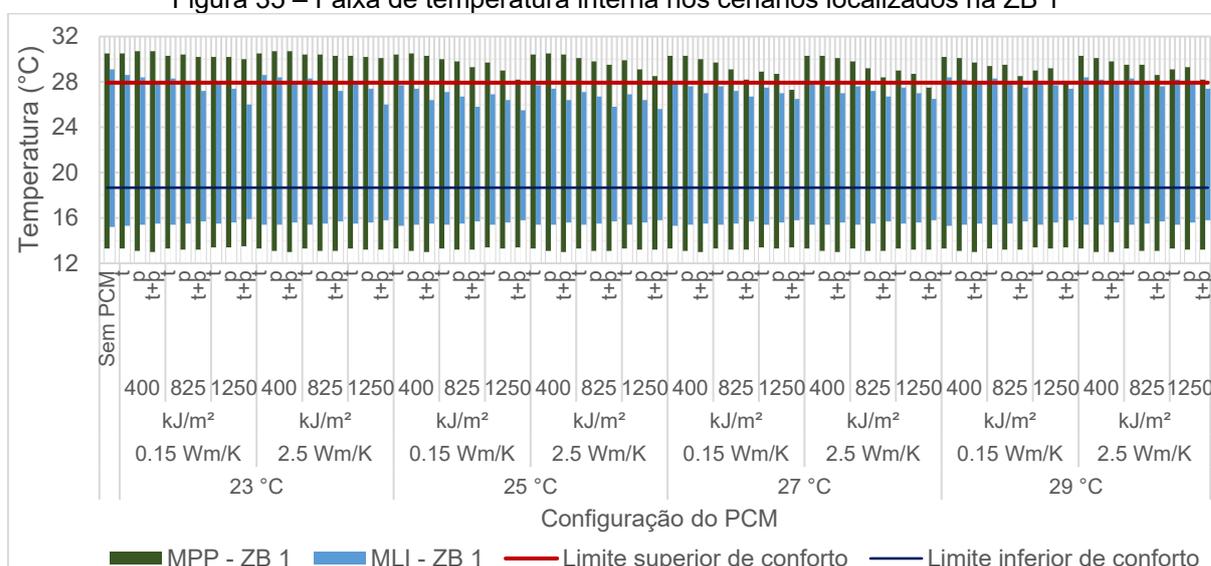
Fonte: elaboração própria.

Por outro lado, na construção pesada sem PCM, a temperatura operativa dos ambientes varia linearmente com o armazenamento de calor sensível, minimizando assim a manutenção da temperatura interna dentro de uma faixa de conforto térmico aceitável. Ademais, assim como também encontrado por Brito *et al.* (2017) e Auzeby *et al.* (2016), os efeitos do PCM na redução da amplitude térmica interna nos cenários do MLI foram melhores do que nos cenários do MPP, o que deve ser devido à estrutura pesada já apresentar maior inércia térmica (BRITO *et al.*, 2017). Portanto, em conformidade com os resultados observados na literatura, o PCM pode não ser a

melhor estratégia para a melhoria do desempenho térmico de edifícios “pesados” (AUZEBY *et al.*, 2016).

De fato, a substituição dos materiais construtivos, da alvenaria cerâmica por sistemas mais leves e isolados, demonstrou-se uma estratégia eficaz para a melhoria tanto do desempenho térmico da habitação quanto do potencial de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes nas três ZBs, mesmo sem aplicação de PCM, como observa-se nas Figuras de 35 a 37. Tal estratégia construtiva inclusive já é sugerida pela norma brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, NBR 15220-3 (ABNT, 2005b).

Figura 35 – Faixa de temperatura interna nos cenários localizados na ZB 1

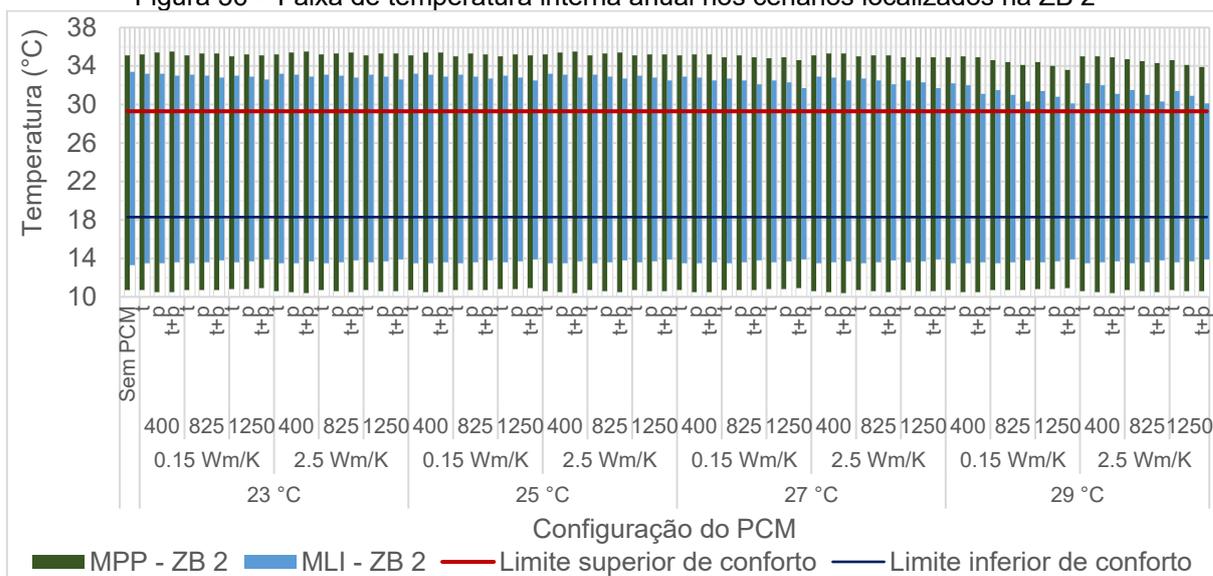


Fonte: elaboração própria.

Os PCMs com ponto de fusão de 29 °C passaram a apresentar menor efeito na redução da amplitude térmica anual nas ZBs 1 e 3, devido à temperatura interna nestas zonas estar abaixo da faixa de fusão do PCM. Enquanto isso, a maior temperatura de fusão proporcionou melhor efeito na ZB 2, uma vez que as maiores faixas de temperatura do ar nesta zona poderiam derreter e solidificar os PCMs pelo calor solar de forma eficaz (SAFFARI *et al.*, 2017b).

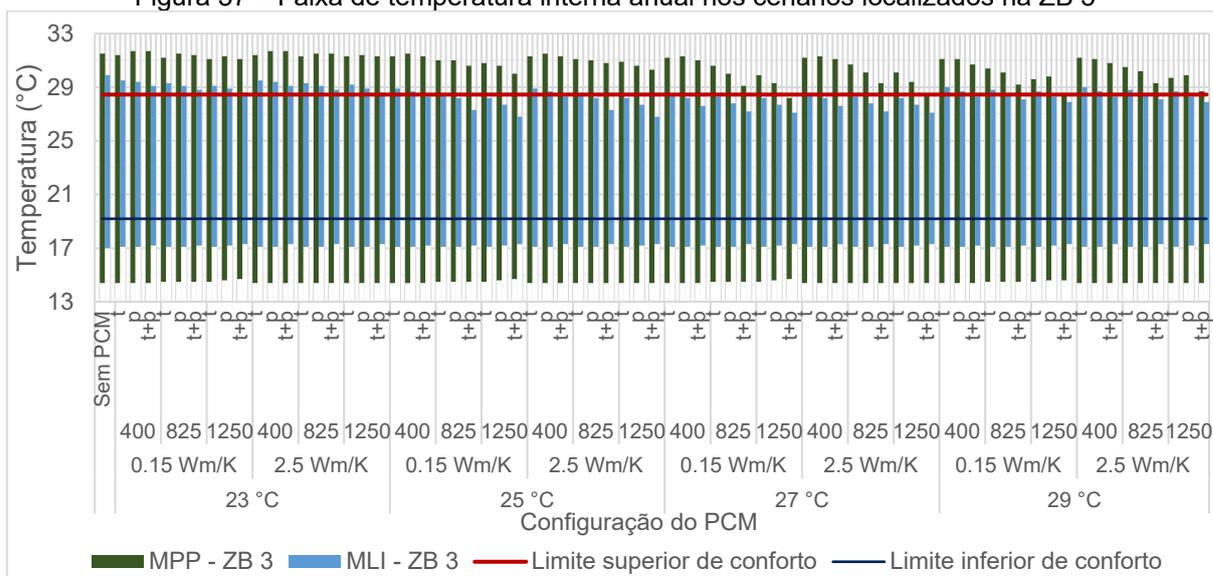
No entanto, os menores efeitos do PCM foram encontrados novamente na zona bioclimática 2 (Figura 36). Portanto, sugere-se que os PCMs avaliados neste estudo podem não ser os mais adequados nesta condição climática ou a necessidade de estratégias de ventilação noturna para auxiliar efetivamente na liberação do calor interno acumulado pelo PCM, conforme apontado pela literatura (ALAM *et al.*, 2014; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2016; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2017; SAFFARI *et al.*, 2017a; ZHANG *et al.*, 2017; PISELLI *et al.*, 2020).

Figura 36 – Faixa de temperatura interna anual nos cenários localizados na ZB 2



Fonte: elaboração própria.

Figura 37 – Faixa de temperatura interna anual nos cenários localizados na ZB 3



Fonte: elaboração própria.

4.2 COMPARAÇÕES ENTRE OS CENÁRIOS

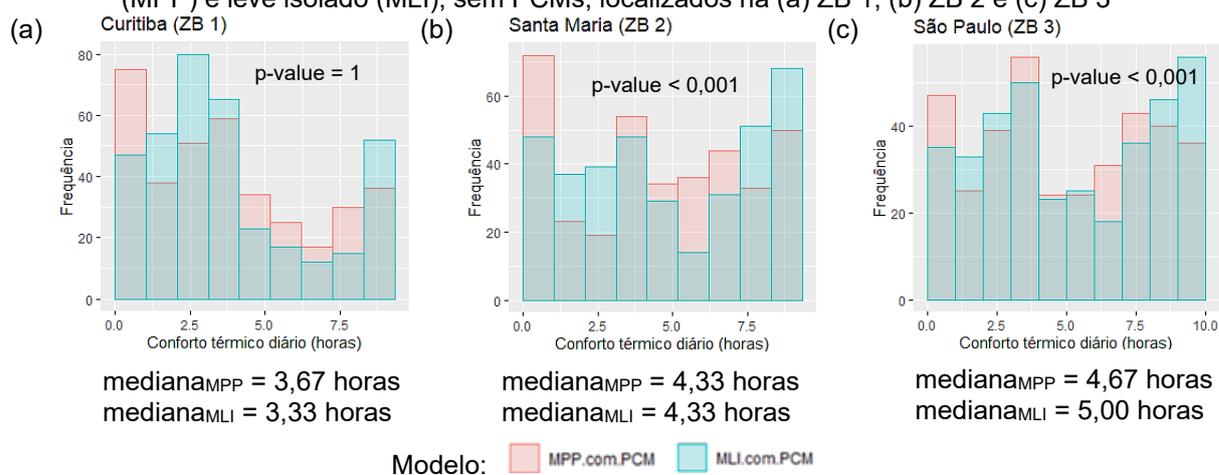
O teste estatístico não-paramétrico de Friedman mostrou que existe algum efeito do PCM na mediana ou na distribuição de horas diárias de conforto térmico da UH na ZB 1 ($X^2_{(145)} = 14248$; $p < 0,001$), ZB 2 ($X^2_{(145)} = 15552$; $p < 0,001$) e ZB 3 ($X^2_{(145)} = 18056$; $p < 0,001$). No entanto, cada configuração de PCM forneceu comportamentos térmicos diferentes em cada cenário, os quais estão explorados nos próximos tópicos. Portanto, a seguir, são apresentados os resultados quanto à significância estatística da variação dos fatores de configuração de projeto de cada cenário de aplicação de

PCM nas horas médias diárias de conforto térmico, segundo o teste de *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni.

4.2.1 Modelo da construção

Os resultados mostraram que a simples mudança da construção do modelo de paredes pesadas (MPP) para o leve isolado (MLI), sem PCM, já poderia melhorar o potencial de atendimento das condições de conforto térmico médio anual da edificação do estudo de caso em 0,35%, 3,7% e 2,95% durante as horas de ocupação nas ZBs 1, 2 e 3, respectivamente. O *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni mostrou que houve melhorias estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$), pela troca do MPP pelo MLI, sem PCM, na distribuição de horas diárias em conforto térmico ao longo do ano em Santa Maria (ZB 2) (Figura 38b) e São Paulo (ZB 3) (Figura 38c). Porém, na ZB 1 (Figura 38a), este efeito não foi significativo ($p > 0,05$).

Figura 38 – Distribuição anual de horas de conforto térmico diário nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI), sem PCMs, localizados na (a) ZB 1, (b) ZB 2 e (c) ZB 3

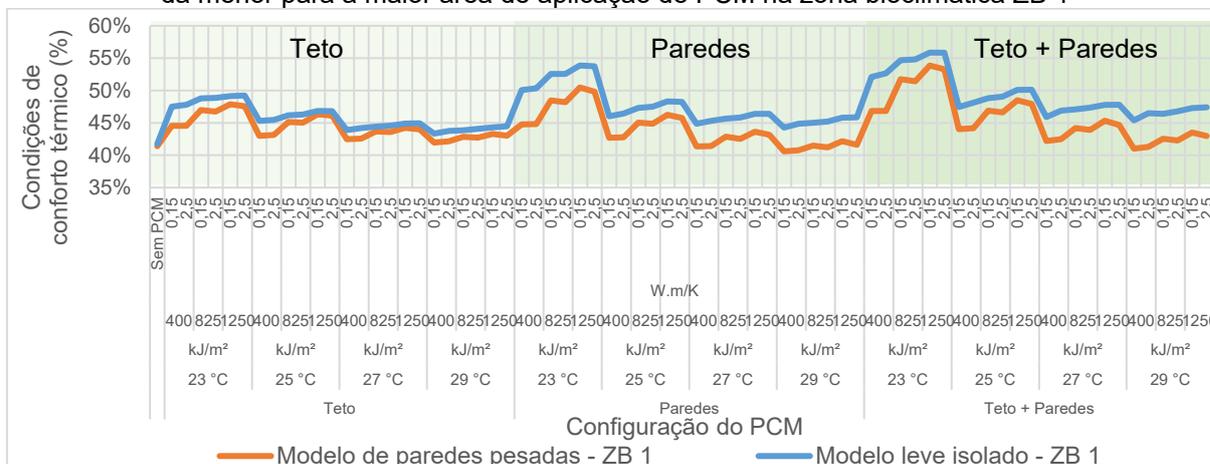


Fonte: elaboração própria.

Ao comparar os cenários do MPP e do MLI com aplicações idênticas de PCM, notaram-se melhorias no potencial de atendimento das condições médias anuais de conforto térmico do ocupante do edifício até 5,82%, 8,65% e 8,11% nas ZB's 1, 2 e 3, respetivamente. Além disso, o *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni confirmou que as horas diárias de conforto térmico devido ao uso dos PCMs tendem a ser maiores nos cenários MLI do que nos cenários MPP na maioria dos casos ($p \leq 0,05$), sobretudo nas ZBs 2 e 3. No entanto, os efeitos encontrados foram insignificantes ($p > 0,05$) em 32% das aplicações de PCM na ZB 1, dentre os quais destacaram-se aqueles com aplicação de PCM apenas no teto (menor área superficial). Neste sentido, na Figura 39 é mostrado que a diferença nos resultados

de potencial de atendimento das condições de conforto térmico entre os modelos MPP e MLI aumenta com o aumento da área de aplicação do PCM em Curitiba (ZB 1).

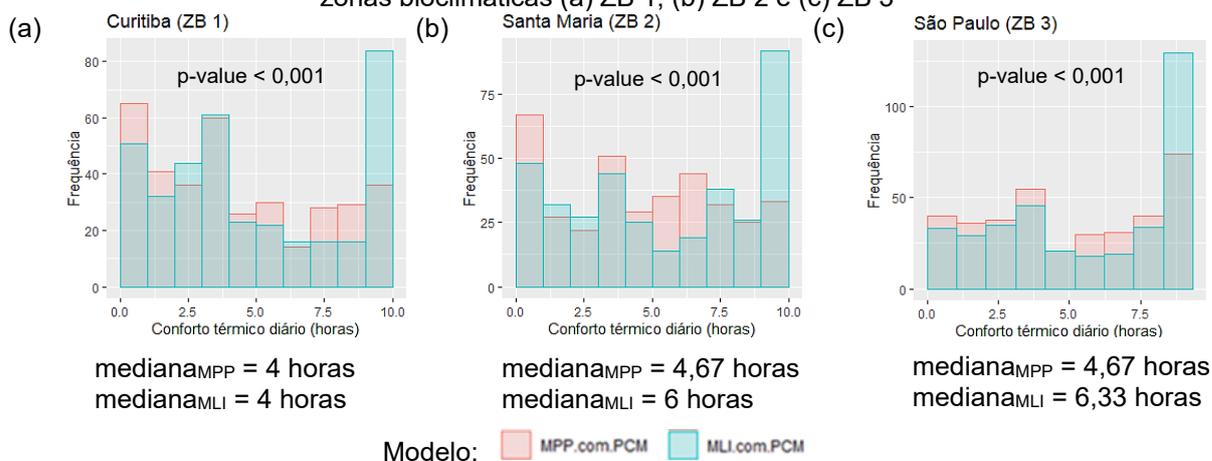
Figura 39 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos com PCM, ordenados da menor para a maior área de aplicação de PCM na zona bioclimática ZB 1



Fonte: elaboração própria.

Ademais, observa-se pela Figura 40 que a troca do MPP pelo MLI, para uma mesma configuração e PCM, aumentou a frequência de dias em que houve mais horas ocupadas em condições de conforto térmico (10 horas) ao longo do ano. Da mesma forma, o PCM reduziu a frequência em que houve menos ocorrências, ou nenhuma, de horas diárias em condições de conforto aos ocupantes durante o ano. Verifica-se que, nesses casos, o ponto de fusão foi diferente em cada zona bioclimática (ZB), sendo 23 °C para ZB 1, 27 °C para ZB 2 e 29 °C para a ZB 3.

Figura 40 – Comparação entre a distribuição anual de horas de conforto térmico diário nos cenários com maior impacto pela troca do modelo de paredes pesadas (MPP) pelo leve isolado (MLI) nas zonas bioclimáticas (a) ZB 1, (b) ZB 2 e (c) ZB 3

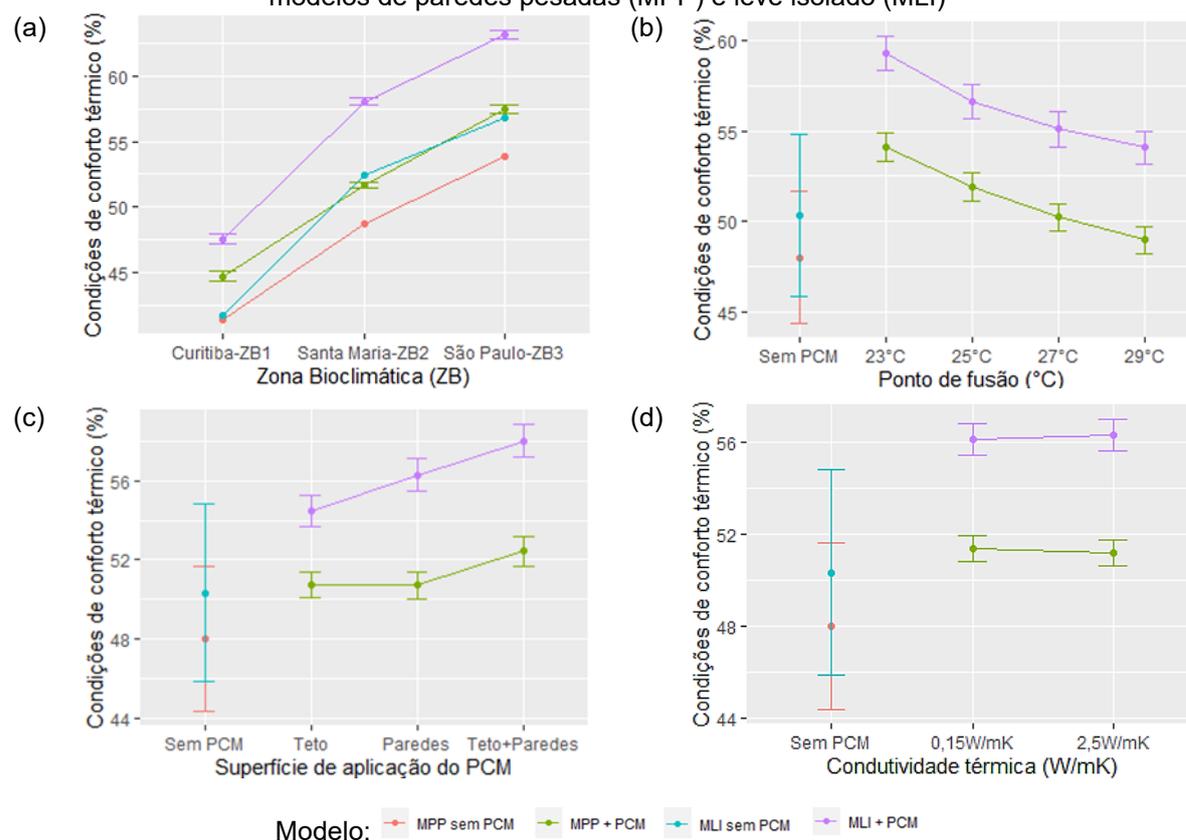


OBS: Nestes casos, o PCM apresentou capacidade de armazenamento de energia de 400 kJ/m² e condutividade térmica máxima de 2,5 W/m.K, aplicado nas paredes externas e no teto (+p), com pontos de fusão de 23 °C (a) e 27 °C (b) e 29 °C (c).

Fonte: elaboração própria.

Conforme já constatado neste estudo, o aumento do ponto de fusão do PCM gera uma queda brusca nos resultados do percentual de atendimento potencial das condições de conforto térmico do ocupante da UH, sendo mais acentuada no MLI do que no MPP, bem como nas ZBs com temperatura externa dentro da faixa de mudança de fase do PCM (Figura 41).

Figura 41 – Influência dos fatores (a) “zona bioclimática (ZB)”, (b) “ponto de fusão”, (c) “superfície de aplicação do PCM” e (d) “condutividade térmica do PCM” nas condições de conforto térmico dos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI)



Fonte: elaboração própria

De maneira geral, conclui-se que o MLI apresentou melhor eficácia na melhoria das condições potenciais de conforto térmico, em relação ao MPP, em quase todos cenários avaliados, conforme apresentado na Figura 41, especialmente nos casos de uso do PCM (representados pela linha roxa). Este resultado condiz com vários estudos da literatura, que enfatizam que os PCMs podem ser bastante eficazes em edifícios com baixa inércia térmica. Caso contrário, o efeito do PCM na temperatura do ar ambiente é difícil de ser observado (LIU *et al.*, 2022).

Todavia, observa-se na Figura 41(a) que o MPP com PCM (linha verde) apresentou melhores resultados do que o MLI sem PCM (linha azul) na maioria dos casos, demonstrando que o efeito da inclusão do PCM foi mais importante do que a

simples troca do sistema construtivo. Salvo exceções, em Santa Maria (ZB 2), onde observa-se tendência contrária, demonstrando que o MPP com PCM pode propiciar maior desconforto térmico humano em comparação com o MLI sem PCM. Ponto de fusão do PCM (°C).

Ao comparar cenários fictícios de aplicação de PCM, variando-se apenas seu ponto de fusão, observou-se que o aumento da temperatura de mudança de fase levou à piora das condições de conforto em quase todos os casos. Nos cenários do MLI, por exemplo, a alteração do ponto de fusão de 23 para 25 °C apresentou uma piora de até 5,87% nas condições de conforto térmico em Curitiba (ZB 1), 1,15% em Santa Maria (ZB 2) e 5,29% em São Paulo (ZB 3). Isto se deve à temperatura de fusão se distanciar da faixa de temperatura neutra de conforto térmico, que foi em média de 23,6 °C nas três zonas bioclimáticas, o que está de acordo com as recomendações de Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) e Suresh, Kumar Hotta e Saha (2022). Por outro lado, ao alterar o ponto de fusão de 23 para 29°C, essa piora foi alcançou valores de até 8,58%, 3,74% e 8,60% nas ZBs 1, 2 e 3, respectivamente. Isto era esperado, devido ao aumento da temperatura de fusão do PCM propiciar a manutenção das temperaturas internas acima da faixa recomendada de conforto térmico.

O *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni (Tabela 16) mostrou que este efeito foi estatisticamente significativo ($p \leq 0,05$) em 98% dos cenários avaliados da ZB 1 e em 99% dos casos da ZB 3.

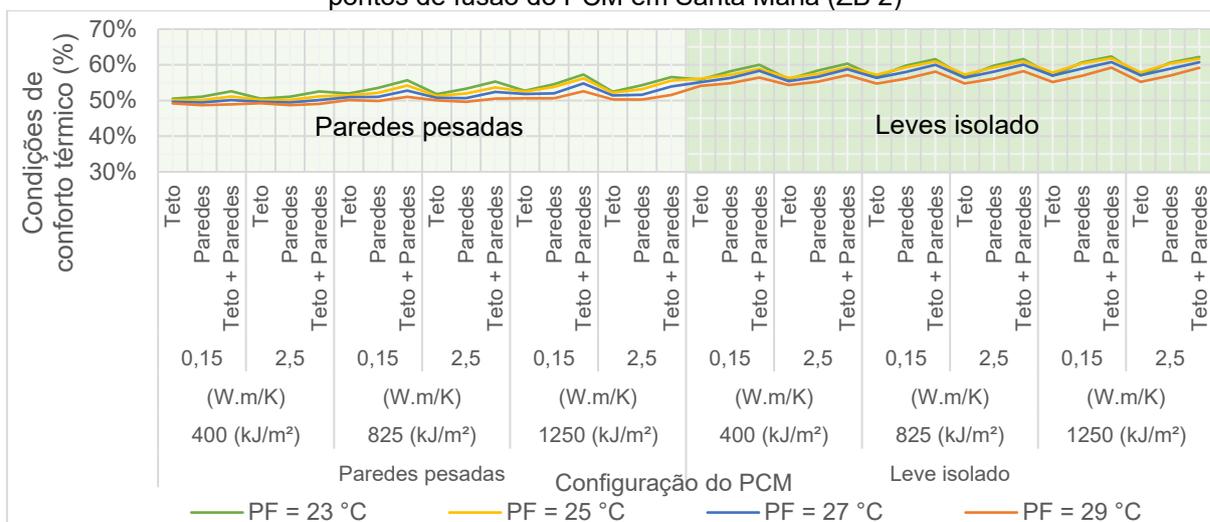
Tabela 16 – Significância do efeito da variação do ponto de fusão do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico ao longo do ano em cada zona bioclimática (ZB)

Alteração do ponto de fusão	Efeito insignificante ($p \text{ value} > 0,05$)			Efeito significativo ($p \text{ value} \leq 0,05$)		
	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
23 para 25 °C	0%	14%	1%	17%	3%	16%
23 para 27 °C	0%	11%	0%	17%	6%	17%
23 para 29 °C	0%	1%	0%	17%	16%	17%
25 para 27 °C	0%	13%	0%	17%	4%	17%
25 para 29 °C	0%	0%	0%	17%	17%	17%
27 para 29 °C	2%	0%	0%	15%	17%	17%
Total	2%	38%	1%	98%	62%	99%

Fonte: elaboração própria.

Porém, na ZB 2, na qual verifica-se uma maior amplitude térmica, este efeito foi significativo em apenas em 62% dos casos, sobretudo pelo aumento dos diversos pontos de fusão para 29°C, que tendem a apresentar piores resultados do potencial de atendimento das condições de conforto térmico em comparação com os de pontos de fusão mais baixos (Figura 42).

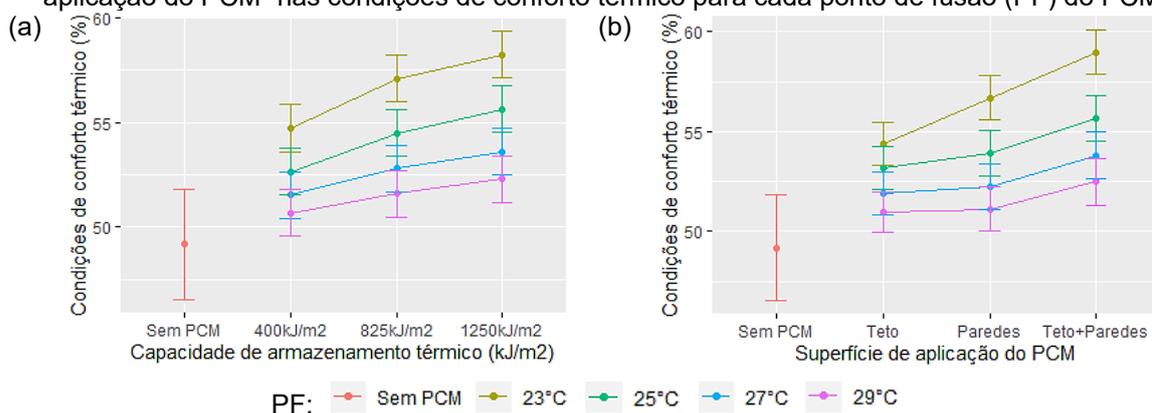
Figura 42 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos pela variação dos pontos de fusão do PCM em Santa Maria (ZB 2)



Fonte: elaboração própria.

O melhor ponto de fusão considerando o potencial de atendimento das condições para conforto térmico dos ocupantes com 80% de satisfação pela ASHRAE 55/2017 foi de 23 °C para todos os cenários fictícios avaliados. Na Figura 43, pode-se visualizar que os resultados das horas atendidas para as condições de conforto térmico aumentaram com o aumento da capacidade térmica do PCM e da área superficial de sua aplicação.

Figura 43 – Influência dos fatores (a) “capacidade de armazenamento térmico” e (b) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada ponto de fusão (PF) do PCM



Fonte: elaboração própria

4.2.2 Capacidade de armazenamento de energia térmica (kJ/m²)

Ao comparar cenários fictícios com as mesmas configurações de aplicação de PCM, variando-se apenas a capacidade de armazenamento térmico (CapT) do PCM, verificou-se que o aumento do CapT proporcionou melhoria das condições de conforto térmico anual em todos os casos, alcançando valores de até 7,02% em Curitiba (ZB

1), 5,13% em Santa Maria (ZB 2) e 4,07% em São Paulo (ZB 3). Tais resultados são consistentes com achados de outros autores (SOARES *et al.*, 2014; RAMAKRISHNAN *et al.*, 2017; BRITO *et al.*, 2017; MOHSENI; TANG, 2021; SAFFARI *et al.*, 2017b).

O *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni (Tabela 17) mostrou que este efeito foi estatisticamente significativo ($p \leq 0,05$) em quase todos os cenários avaliados. Porém, em alguns casos, este efeito não foi significativo ($p > 0,05$), sobretudo pela troca do PCM com CapT de 825 kJ/m² (valor médio) para 1250 kJ/m² (valor máximo) quando aplicado apenas no teto (menor área de aplicação).

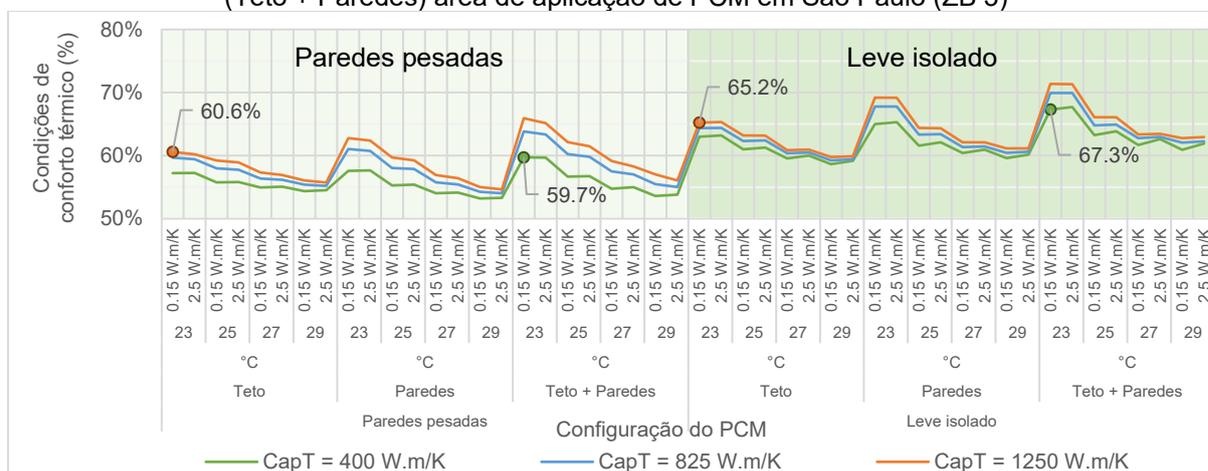
Tabela 17 – Significância da variação da capacidade de armazenamento de calor (CapT) do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico em cada zona bioclimática (ZB)

Alteração da CapT do PCM (kJ/m ²)	Efeito insignificante (p value > 0,05)			Efeito significativo (p value ≤ 0,05)		
	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1	ZB 2	ZB 3
400 para 825	2%	1%	2%	31%	32%	31%
400 para 1250	0%	0%	0%	33%	33%	33%
825 para 1250	6%	5%	1%	28%	28%	33%
Total	8%	6%	3%	92%	94%	97%

Fonte: elaboração própria.

Portanto pode-se concluir que os melhores resultados em relação ao potencial de atendimento das condições de conforto térmico foram obtidos com PCMs com maior CapT (1250 kJ/m²) em todos os cenários avaliados, por meio do aumento de sua espessura, sem alteração do ponto de fusão ótimo do PCM. De fato, pode-se ver exemplificado na Figura 44 a ocorrência de casos em que o PCM com maior CapT (marcadores verdes) e menor área de sua aplicação (apenas no teto) apresentaram melhores resultados do que um PCM com menor CapT (marcadores laranjas) e maior área de aplicação (teto e paredes externas). Este resulta do está de acordo com os achados por Saffari *et al.* (2017b) Soares *et al.* (2014) e Ramakrishnan *et al.* (2017).

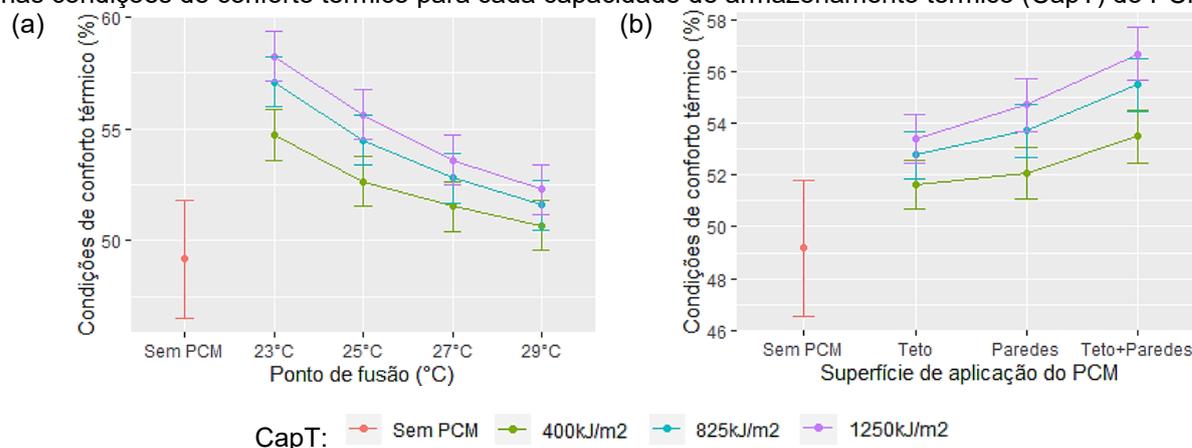
Figura 44 – Comparação entre as condições de conforto térmico dos modelos com PCM, para cada valor de capacidade de armazenamento de energia (CapT), ordenados da menor (Teto) para a maior (Teto + Paredes) área de aplicação de PCM em São Paulo (ZB 3)



Não obstante, para uma mesma quantidade de volume de PCM, a eficácia do PCM pode aumentar com a diminuição da sua espessura e com o aumento da área superficial até um nível ótimo, conforme demonstrado por Alam *et al.* (2014). Segundo os autores, isso se deve ao aumento da taxa de transferência de calor gerada entre o PCM e a zona, melhorando assim a eficiência dos seus ciclos de derretimento e solidificação ao longo das variações de temperatura (ALAM *et al.*, 2014).

Na Figura 45, observa-se o efeito brusco do aumento da temperatura de mudança de fase no decaimento do atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes, acentuando-se com o aumento da área de aplicação de PCM.

Figura 45 – Influência dos fatores (a) “ponto de fusão do PCM” e (b) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada capacidade de armazenamento térmico (CapT) do PCM



Fonte: elaboração própria

4.2.3 Condutividade térmica (W/m.K)

Considerando as mesmas configurações de aplicação de PCM, o aumento da condutividade térmica (CondT) do PCM proporcionou efeitos mínimos ou desprezíveis, de até $\pm 1,1\%$, nas condições de conforto térmico anual nos modelos.

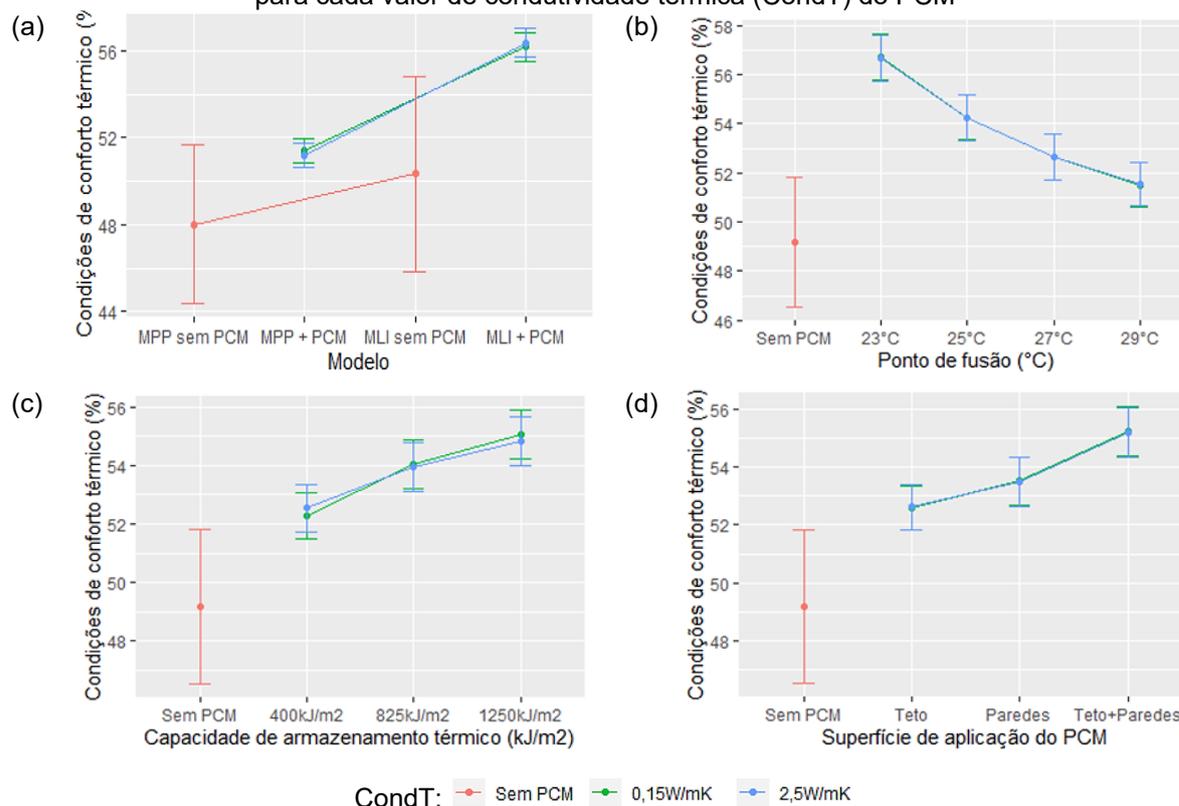
O post-hoc de Wilcoxon com correção de Bonferroni (Tabela 18) mostrou que este efeito não foi estatisticamente significativo ($p > 0,05$) na maioria dos cenários avaliados, sobretudo nos cenários do modelo de paredes pesadas (MPP). Estima-se que isso se deva ao fato de o MPP já apresentar maior inércia térmica do que o modelo leve isolado (MLI), e seu desempenho ser pouco afetado pela condutividade térmica dos PCMs. Entretanto, no MLI, houve melhorias mais significativas ($p \leq 0,05$) nos resultados de atendimento das condições de conforto térmicos dos ocupantes pelo aumento da CondT (Figura 46a), mas ainda mínimas (de até 1,1%).

Tabela 18 – Significância do efeito da variação dos valores de condutividade térmica (CondT) do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico em cada zona bioclimática (ZB)

Alteração da CondT do PCM (W.m/K)	Efeito insignificante (p value > 0,05)			Efeito significativo (p value ≤ 0,05)					
	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1		ZB 2		ZB 3	
				Melhoria	Piora	Melhoria	Piora	Melhoria	Piora
0,15 para 2,5	74%	81%	64%	11%	15%	4%	15%	13%	24%

Fonte: elaboração própria.

Figura 46 – Influência dos fatores (a) “modelo”, (b) “ponto de fusão do PCM”, (c) “capacidade de armazenamento térmico” e (d) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada valor de condutividade térmica (CondT) do PCM



Fonte: elaboração própria

De maneira geral, os melhores resultados foram obtidos pelos menores valores de CondT (0,15 W.m/K), conforme observa-se na Tabela 18 e na Figura 46(c). Isto vai contra as recomendações da literatura, na qual ressalta-se a importância de selecionar PCMs com maiores condutividades térmicas para auxiliar nos processos de transferência de calor do PCM (ZHANG et al., 2007; POMIANOWSKI; HEISELBERG; ZHANG, 2013; GRACIA; CABEZA, 2015; SOUAYFANE; FARDOUN; BIWOLE, 2016).

Conforme já comentado, observa-se pela Figura 46(c) que a redução da CondT, aliada ao aumento da CapT do PCM, apresentou maior efeito sobre os resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico aos ocupantes dos cenários testados. Estima-se que esse resultado se deva ao fato do PCM, com

maiores valores de CapT e CondT, seja capaz de conduzir maior quantidade da energia térmica absorvida, propiciando assim maiores ganhos de temperatura no ambiente e gerando maior ocorrência de horas em desconforto térmico por calor, assim como encontrado por Li *et al.*, (2019). As demais interações entre os fatores do PCM com a condutividade térmica não demonstraram efeito notável (Figura 46b e d).

4.2.4 Superfície de aplicação do PCM

Considerando as mesmas configurações de PCM teórico, variando-se apenas as superfícies de sua aplicação, o aumento do número de superfícies proporcionou uma melhoria nos resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico aos ocupantes em quase todos os cenários testados. Tais resultados são consistentes com achados de outros autores (BRITO *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2014; MOHSENI; TANG, 2021; SAFFARI *et al.*, 2017b). Estas melhorias foram de até 6,73% em Curitiba (ZB 1), 5,36% em Santa Maria (ZB 2) e 6,14% em São Paulo (ZB 3).

O *post-hoc* de Wilcoxon com correção de Bonferroni (Tabela 19) mostrou que este efeito foi estatisticamente significativo ($p \leq 0,05$) em cerca de 84,7% dos cenários avaliados. Por outro lado, este efeito não foi significativo ($p > 0,05$) em 15,3% dos casos, sobretudo pelo aumento da área de aplicação do PCM do teto (T) para a parede (P), aliado ao aumento dos pontos de fusão do PCM (27 e 29 °C). Esta configuração também propiciou piora dos resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes em alguns casos das ZBs 1 e 3, o que deve ser devido à flutuação da temperatura interna na maior parte do tempo estar fora da faixa de temperatura de fusão do PCM.

Tabela 19 – Significância do efeito da variação da superfície de aplicação do PCM nos resultados de horas diárias em conforto térmico anual em cada zona bioclimática (ZB)

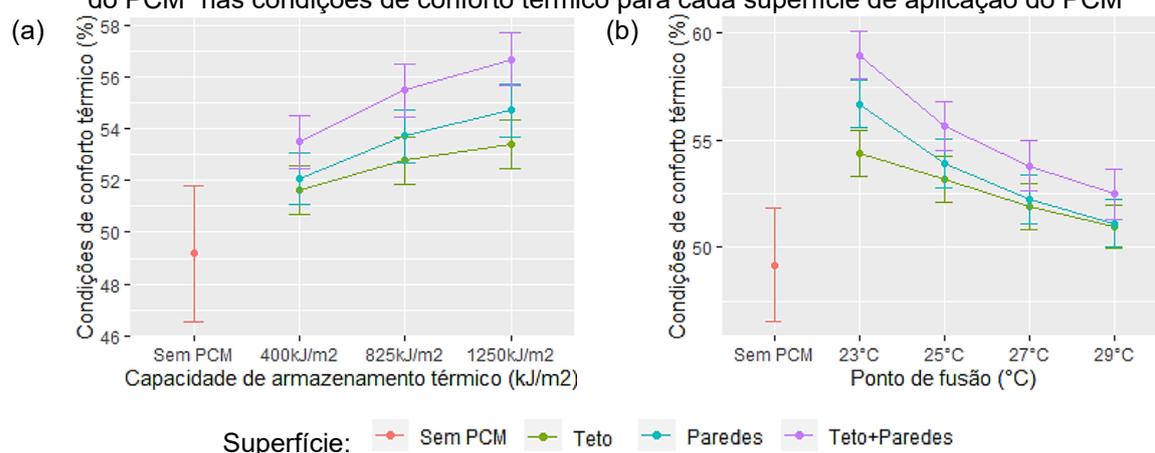
Alteração da superfície do PCM	Efeito insignificante (p value > 0,05)			Efeito significativo (p value ≤ 0,05)					
	ZB 1	ZB 2	ZB 3	ZB 1		ZB 2		ZB 3	
				Melhoria	Piora	Melhoria	Piora	Melhoria	Piora
T para P	7%	13%	8%	19%	7%	21%	0%	19%	6%
T para T+P	6%	4%	3%	26%	1%	29%	0%	28%	1%
P para T+P	1%	1%	1%	32%	0%	32%	0%	32%	0%
Total	15%	18%	13%	77%	8%	82%	0%	80%	7%

Fonte: elaboração própria.

Os melhores resultados foram obtidos com PCMs teóricos aplicados em todas as superfícies da envoltória (Teto + Paredes), em todos os cenários testados. Pela Figura 47, observa-se que o aumento das áreas de aplicação do PCM, aliado ao aumento dos valores de CapT do PCM e da redução dos seus pontos de fusão, apresentou

maior efeito sobre os resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes. Convém destacar que o presente estudo avaliou a aplicação do PCM apenas em superfícies externas da edificação, considerando radiação solar em todas as superfícies da envoltória, tendo em vista que é preferível manter a camada de PCM próxima à fonte de calor para melhor desempenho térmico em aplicações de resfriamento (MUKRAM; DANIEL, 2022).

Figura 47 – Influência dos fatores (a) “capacidade de armazenamento térmico” e (b) “ponto de fusão do PCM” nas condições de conforto térmico para cada superfície de aplicação do PCM



Superfície: ● Sem PCM ● Teto ● Paredes ● Teto+Paredes

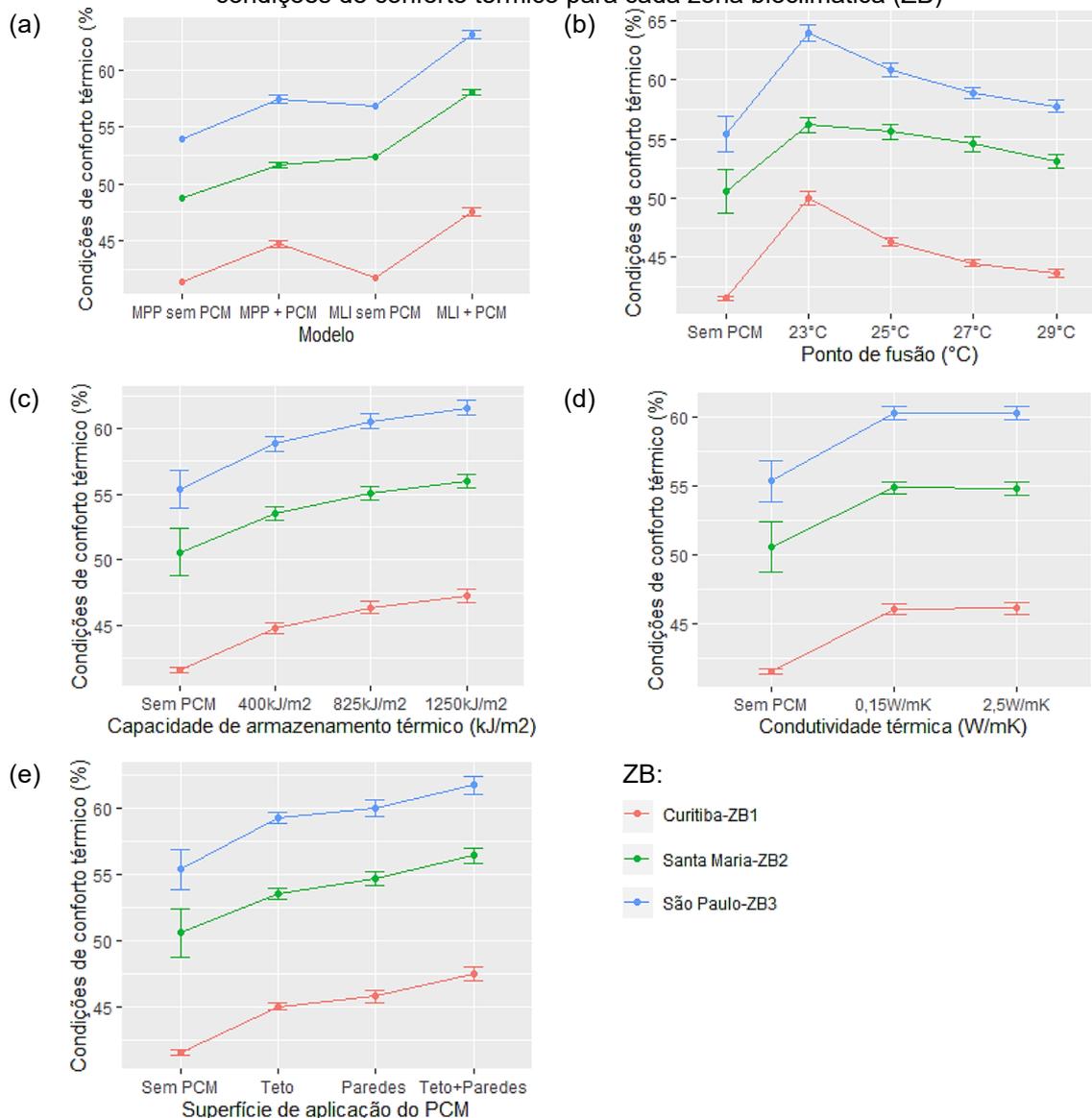
Fonte: elaboração própria

4.2.5 zona bioclimática (ZB)

De maneira geral, os melhores resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes, considerando os cenários de aplicação de PCM testados, foram obtidos em São Paulo (ZB 3), seguido por Santa Maria (ZB 2) e Curitiba (ZB 1). A mudança do MPP para o MLI apresentou um impacto maior nos resultados da ZB 1 do que das demais zonas, conforme observa-se na Figura 48a. Além disso, a mudança do ponto de fusão do PCM (PF) apresentou efeito menos acentuado na ZB 2 (Figura 48b), mas ainda semelhante às demais zonas.

Por outro lado, a variação dos outros fatores de projeto, tais como capacidade de armazenamento térmico (Figura 48c), condutividade térmica e superfície de aplicação do PCM (Figura 48e) apresentaram a mesma tendência de comportamento no potencial de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes das zonas bioclimáticas testadas. Quanto à variação da condutividade térmica do PCM (Figura 48 d), seu efeito não foi significativo em nenhuma das três cidades avaliadas.

Figura 48 – Influência dos fatores (a) “modelo”, (b) “ponto de fusão do PCM”, (c) “capacidade de armazenamento térmico”; (d) “condutividade térmica” e (e) “superfície de aplicação do PCM” nas condições de conforto térmico para cada zona bioclimática (ZB)



Fonte: elaboração própria

Diante disso, conclui-se que as características de incorporação do PCM mais adequadas para propiciar maiores condições de conforto térmico aceitáveis aos usuários foram as mesmas nas três cidades analisadas, sendo elas: PCM com 23 °C de ponto de fusão, 1250 KJ/m², aplicados no teto e paredes externas do modelo leve isolado.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho se limitou à aplicação do método de simulação para a obtenção do nível mínimo (M) de desempenho térmico descrito na NBR 15.575 (ABNT, 2021). Simulações termoenergéticas paramétricas foram realizadas a fim de

comprovar a efeito de Materiais de Mudança de Fase teóricos no desempenho térmico do edifício, baseados na variação de propriedades termofísicas existentes de um PCM de ácidos graxos disponível no mercado. Contudo, os PCMs teóricos resultantes dessas combinações podem não existir. Ademais, não foram encontradas referências quanto ao seu preço de fornecimento e instalação.

Não foram considerados o uso de sistemas que melhoram a eficácia destes materiais, como sistemas de ventilação noturna ou de controle de temperatura ambiente. Além disso, a influência da radiação solar na edificação não foi avaliada neste estudo, de modo que não foi possível analisar quais superfícies externas dos elementos construtivos seriam mais adequadas para a melhoria da eficiência no desempenho térmico do PCM.

Ademais, os dados amostrais de horas diárias em condições de conforto térmico dos modelos simulados não seguiram distribuição normal, conforme verificado previamente pelo teste de normalidade de Shapiro. Portanto, não foi possível validar, por meio de outras ferramentas estatísticas, tal como a Anova, o efeito da interação multinível entre as variáveis de projeto (modelo da construção, zona bioclimática, superfície de aplicação do PCM, ponto de fusão, capacidade de armazenamento de calor e condutividade térmica) consideradas nos cenários simulados.

Os melhores resultados potenciais de atendimento das condições de conforto térmico dos ocupantes foram encontrados pelos PCMs com menores valores de PF (23 °C) e maiores valores de CapT (1250 kJ/m²), aplicados na face interna de toda a envoltória (teto + paredes), principalmente no modelo leve isolado. No entanto, observou-se uma incongruência na prática entre os critérios das normas NBR 15575-1:2021 e ASHARE 55-2017, uma vez que os cenários com maiores reduções na temperatura operativa máxima dos ambientes, obtidos com maiores pontos de fusão do PCM (27 e 29 °C), apresentaram piores condições de conforto térmico aos usuários, e vice-versa. A condutividade térmica (CondT) foi a única propriedade do PCM cuja variação não apresentou efeito significativo nos resultados de conforto térmico. Contudo, o aumento da CondT demonstrou ser uma estratégia adequada apenas para compensar a menor eficácia do desempenho térmico de um PCM com menores valores de CapT. Ademais, a mudança do sistema construtivo típico brasileiro, de paredes pesadas para leve isolado, demonstrou-se a melhor estratégia para potencializar o efeito do PCM.

Diante desses resultados, demonstrou-se a importância de considerar as condições de conforto térmico nos ambientes, além do nível de desempenho térmico da edificação, para a tomada de decisões de projeto. Além disso, a seleção acertada das características termofísicas do PCM mostrou-se essencial para a otimização do seu desempenho térmico, o que pode impactar no custo de sua implementação.

Embora o tema ainda seja recente no Brasil, há um grande número de estudos internacionais que podem orientar o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao uso de PCMs para controle passivo de temperatura em edificações.

Ademais, diante da melhor eficácia do PCM em sistemas construtivos leves, convém comentar sobre o *Wood Frame*, uma tecnologia conhecida por aliar conforto térmico, acústico e sustentabilidade na construção civil (MOLINA; CALIL JR., 2010). Trata-se de um sistema construtivo composto por chapas de madeira reflorestada processada, como painéis compensados e OSB, e isolamento térmico, sendo bastante utilizado na Europa e América do Norte. O uso do *Wood Frame* ainda é baixo, mas tem ganhado força na região sul do Brasil, aonde existem algumas empresas nacionais instaladas interessadas na construção de casas de madeira com implantação definitiva desse sistema (RIBASKI; DUDEK; ROTTA, 2017). Sendo assim, estima-se que esse sistema pode ser uma alternativa promissora para a incorporação de PCM no clima subtropical, carecendo de mais pesquisas quanto à sua influência no desempenho térmico do sistema construtivo,

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se o potencial de Materiais de Mudança de Fase (PCM) na melhoria do desempenho térmico de habitações naturalmente ventiladas e, também, do potencial de atendimento das condições de conforto térmico de seus ocupantes no clima subtropical brasileiro. Para as análises de desempenho, aplicou-se o procedimento de simulação computacional, segundo critérios descritos nas normas NBR 15575-1:2021. Para as análises do potencial de atendimento das condições de conforto, aplicou-se o método de conforto adaptativo da ASHRAE 55-2017, considerando 80% de aceitação dos ocupantes.

Por meio de um estudo aplicado a um modelo típico de moradia unifamiliar, compararam-se os resultados de desempenho e do potencial de atendimento das condições de conforto térmico para as condições climáticas de três cidades representativas do clima subtropical: Curitiba (ZB 1), Santa Maria (ZB 2) e São Paulo (ZB 3). Os resultados mostraram desempenho térmico inadequado da edificação, em seu aspecto original, para as zonas bioclimáticas testadas, bem como a necessidade de adequação da sua envoltória para atender aos critérios mínimos estabelecidos pela norma brasileira.

Na sequência, 438 cenários fictícios de aplicação de PCM biológico à base de ácidos graxos, disponível no mercado, foram avaliados e comparados, variando-se: seu ponto de fusão (PF), sua capacidade de armazenamento térmico (CapT) e condutividade térmica (CondT); o sistema construtivo da edificação (paredes pesadas ou sistema leve isolado); a superfície de aplicação do PCM (teto e/ou paredes externas); e a zona bioclimática (ZB 1, 2 e 3).

Os resultados permitiram verificar que o PCM possui potencial de melhorar o desempenho térmico de edificações no clima subtropical brasileiro, bem como as condições de conforto térmico aos ocupantes. Contudo, nem todos os cenários de aplicação de PCM foram viáveis para este fim. Portanto, demonstrou-se a importância da seleção das propriedades termofísicas e projetuais do PCM de maneira adequada às condições construtivas, projetuais e climáticas de sua implementação.

Este estudo apresentou, portanto, contribuição acadêmica, ao explorar a aplicabilidade de PCMs em habitações no clima subtropical brasileiro, e contribuição prática, ao identificar uma solução inovadora para a melhoria do desempenho térmico de habitações. Espera-se que novas pesquisas sejam realizadas para avaliar o

potencial impacto do uso destes materiais no Brasil e promover a sensibilização do mercado para o assunto no país.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação do uso de PCM em sistemas construtivos do tipo *Wood Frame*, tendo em vista sua proeminência nas regiões sul do Brasil. Além disso, sugere-se a avaliação do comportamento de mais tipos de PCM disponíveis no mercado para os diversos climas brasileiros, com destaque aos climas equatoriais de inverno seco como o de Brasília (ZB 4), conforme indicado na literatura (SAFFARI *et al.*, 2017b; MARIN *et al.*, 2016). Além disso, sugere-se a avaliação da influência da orientação solar no desempenho térmico do PCM, bem como a investigação de uma solução ótima de incorporação destes materiais no contexto das tipologias construtivas brasileiras, visando a maior eficiência na relação custo benefício de sua implementação. Sugere-se, também, a avaliação do efeito de mudanças climáticas em cenários futuros de simulações considerando a inclusão dos PCMs em envoltórias. Uma análise voltada para o custo-benefício também é necessária, tanto de aquisição do PCM como da economia de energia gerada por ele, tendo em vista que é um produto caro ainda não fabricado no Brasil, bem como devido ao melhor desempenho desse sistema quando aliado a estratégias artificiais de ventilação e/ou controle de temperatura.

Vale ressaltar que o Brasil possui grande potencial para a produção dessa tecnologia, principalmente os *Biobased* PCMs, devido à sua fauna e flora. No entanto, isso não exclui a necessidade de analisar sua viabilidade econômica, etapa essencial para a implantação desses materiais no país.

REFERÊNCIAS

- ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. **Solar Energy**, v. 30, n. 4, p. 313-332, jan. 1983. Elsevier BV.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- ABNT. **NBR 15220-2**: 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.
- ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para Habitações de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005b.
- ABNT. **NBR 15575-1:2013/Emenda 1:2021**. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais, 2021.
- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. FapUNIFESP (SciELO).
- AGYENIM, F.; HEWITT, N.; EAMES, P.; SMYTH, M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 615-628, feb. 2010. Elsevier BV.
- AKEIBER, H.; NEJAT, P.; MAJID, M. Z. Abd.; WAHID, M. A.; JOMEHZADEH, F.; FAMILI, I. Z.; CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R.; ZAKI, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1470-1497, July 2016. Elsevier BV.
- AL-SAAD, S. N.; ZHAI, Z. J. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 659-673, May 2013. Elsevier BV.
- ALAM, M.; JAMIL, H.; SANJAYAN, J.; WILSON, J. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. **Energy and Buildings**, v. 78, p. 192-201, Aug. 2014. Elsevier BV.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 Dec. 2013. Schweizerbart.
- AMOATEY, P.; AL-JABRI, K.; AL-SAAD, S. Influence of phase change materials on thermal comfort, greenhouse gas emissions, and potential indoor air quality issues across different climatic regions: a critical review. **International Journal Of Energy Research**, v. 46, n. 15, p. 22386-22420, 14 Sep. 2022. Hindawi Limited.
- ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MASI, R. F. de; DE'ROSSI, F.; VANOLI, G. P. Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. **Energy and Buildings**, v. 95, p. 172-183, May 2015. Elsevier BV.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. GA: ASHRAE, 2012

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, Ga: ASHRAE, 2017. 60 p.

ASHRAE. **2009 ASHRAE Handbook**: Fundamentals. Inch-Pound Edition. Atlanta, GA: ASHRAE, 2009.

AUZEBY, M.; WEI, S.; UNDERWOOD, C.; TINDALL, J.; CHEN, C.; LING, H.; BUSWELL, R. Effectiveness of using phase change materials on reducing summer overheating issues in UK residential buildings with identification of influential factors. **Energies**, v. 9, n. 8, p. 605, 1 aug. 2016. MDPI AG.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361-1368, sept. 2010. Elsevier BV.

BOUSSABA, L.; LEFEBVRE, G.; MAKHLOUF, S.; GRADOS, A.; ROYON, L. Investigation and properties of a novel composite bio-PCM to reduce summer energy consumptions in buildings of hot and dry climates. **Solar Energy**, v. 214, p. 119-130, jan. 2021. Elsevier BV.

BRANDALISE, M. P.; ALMEIDA, F. S.; ORDENES, M. Materiais de mudança de fase implantados em vedações como sistema passivo para habitações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

BRASIL; EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2020**: ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. 292 p.

BRITO, A. C. de; 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. FapUNIFESP (SciELO).

CABEZA, L. F.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; GRACIA, A. de; FERNÁNDEZ, A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 3, p. 1675-1695, apr. 2011. Elsevier BV.

CABEZA, L. F.; CHÂFER, M. Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: a systematic review. **Energy and Buildings**, v. 219, p. 110009, July 2020. Elsevier BV.

CABEZA, L. F. Storage techniques with phase change materials. In: HADORN, Jean-Christophe (ed.). **Thermal energy storage for solar and low energy buildings**: stat of the art. [s.l.]: IEA Solar Heating and Cooling Task 32, 2005. p. 77-105. Disponível em: <https://task32.iea-shc.org/publications>. Acesso em: 6 maio 2021.

CAMPBELL, K. R.; SAILOR, D. J. Phase Change Materials as thermal storage for high performance homes. In: ASME 2011 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2011, Denver, Colorado, USA. **Volume 4: Energy Systems Analysis, Thermodynamics and Sustainability; Combustion Science and Engineering; Nanoengineering for Energy, Parts A and B**. [s.l.]: ASME, 2011. p. 809-818.

CRAWLEY, D. B.; HAND, J. W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. T. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 661-673, apr. 2008. Elsevier BV.

CRAWLEY, D. B.; PEDERSEN, C. O.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, Frederick C. EnergyPlus: Energy simulation program. **Ashrae Journal**, v. 4, n. 42, p. 49-56, apr. 2000.

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, n. 6, p. 1-15, June 2017. SAGE Publications.

DESAI, D.; MILLER, M.; LYNCH, J. P.; LI, V. C. Development of thermally adaptive Engineered Cementitious Composite for passive heat storage. **Construction and Building Materials**, v. 67, part C, p. 366-372, sept. 2014. Elsevier BV

DIACONU, B. M.; VARGA, S.; OLIVEIRA, A. C. Experimental assessment of heat storage properties and heat transfer characteristics of a phase change material slurry for air conditioning applications. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 620-628, feb. 2010. Elsevier BV.

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference**. [s.l.]: EnergyPlus®, 2020. 1758 p.

ELLIS, P. G.; TORCELLINI, P. A.; CRAWLEY, D. B. Simulation of energy management systems in EnergyPlus®. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 10., 2007, Beijing, China. **Proceedings of Building Simulation**. United States: IBPSA, 2007. p. 1346-1353.

EVERS, A. C.; MEDINA, M. A.; FANG, Y. Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator. **Building And Environment**, v. 45, n. 8, p. 1762-1768, ago. 2010. Elsevier BV.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial**. Relatório Técnico, 2019. Disponível em: <https://q.eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 9 nov. 2022. Eletrobras, Procel, 2019.

FARAJ, K.; KHALED, M.; FARAJ, J.; HACHEM, F.; CASTELAIN, C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: heating and hybrid applications. **Journal Of Energy Storage**, v. 33, p. 101913, jan. 2021. Elsevier BV.

FARID, M. M; KHUDHAIR, A. M; RAZACK, S. A. K; AL-HALLAJ, S. A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 9-10, p. 1597-1615, june 2004. Elsevier BV.

FELDMAN, D.; BANU, D. DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard. **Thermochimica Acta**, v. 272, p. 243-251, jan. 1996. Elsevier BV.

FELDMAN, D.; BANU, D.; HAWES, D. Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, v. 36, n. 3, p. 311-322, mar. 1995. Elsevier BV.

FILIPPINI, L. O.; SARTORI, G.; DANILEVICZ, A. de M. F.; TORRES, M. C. A. Análise do impacto de Materiais de Mudança de Fase no conforto térmico de escola pública através de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

GEETHA, N. B.; VELRAJ, R. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review. **Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research**, v. 29 , n. 92, p. 913-946, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

Global ABC – GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. **2019 global status report for buildings and construction**: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. [s.l.]: IEA/UNEP, 2019. 39 p.

GOOGLE TRENDS. **Pesquisar**: Phase Change Material, Todo o mundo, 2004-presente, HVAC e controle de clima, Pesquisa na Web. 2022. Disponível em: <https://trends.google.com.br/trends/explore?cat=828&date=all&q=phase change material>. Acesso em: 9 nov. 2022.

GRACIA, A. de; CABEZA, L. F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 414-419, sept. 2015. Elsevier BV.

HASNAIN, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. **Energy Conversion and Management**, v. 39, n. 11, p. 1127-1138, aug. 1998. Elsevier BV.

HAWES, D. W.; FELDMAN, D.; BANU, D. Latent heat storage in building materials. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 1, p. 77-86, jan. 1993. Elsevier BV.

HOFFMAN, J. D. **Numerical methods for engineers and scientists**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001. 823 p.

HOLLANDER, M.; WOLFE, D. A.; CHICKEN, E. **Nonparametric statistical methods**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

IBÁÑEZ, M.; LÁZARO, A.; ZALBA, B.; CABEZA, L. F. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 11-12, p. 1796-1807, aug. 2005. Elsevier BV.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Building Envelopes**: Traking report, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>. Acesso em: 15 nov. 2022.

IEA. **Technology Roadmap**: energy efficient building envelopes. Paris: IEA, 2013. 64 p.

JEONG, S-G.; CHUNG, O.; YU, S.; KIM, S.; KIM, S. Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 117, p. 87-92, oct. 2013. Elsevier BV.

KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 150-176, may 2015. Elsevier BV.

KAUARK, F. da S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa**: um guia prático. Itabuna, BA: Via Litterarum, 2010, 88 p.

KENISARIN, M.; MAHKAMOV, K. Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 371-398, mar. 2016. Elsevier BV.

KENISARIN, M; MAHKAMOV, K. Solar energy storage using phase change materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 9, p. 1913-1965, dec. 2007. Elsevier BV.

KHUDHAIR, A. M.; FARID, M. M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 2, p. 263-275, jan. 2004. Elsevier BV.

KONG, X.; LU, S.; HUANG, J.; CAI, Z.; WEI, S. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage. **Energy and Buildings**, v. 62, p. 597-604, july 2013. Elsevier BV.

KOSNY, J.; KOSSECKA, E.; BRZEZINSKI, A.; TLEOUBAEV, A.; YARBROUGH, D. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs). **Energy and Buildings**, v. 52, p. 122-131, sept. 2012. Elsevier BV.

KOSNY, J.; FALLAHI, A.; SHUKLA, N.; KOSSECKA, E.; AHBARI, R. Thermal load mitigation and passive cooling in residential attics containing PCM-enhanced insulations. **Solar Energy**, v. 108, p. 164-177, oct. 2014. Elsevier BV.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 10 july 2006. Schweizerbart.

KUZNIK, F.; DAVID, D.; JOHANNES, K.; ROUX, J-J. A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 379-391, jan. 2011. Elsevier BV.

KUZNIK, F.; VIRGONE, J. Experimental investigation of wallboard containing phase change material:

data for validation of numerical modeling. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 5, p. 561-570, may 2009. Elsevier BV.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (Florianópolis). **Arquivos Climáticos**. 2018. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 17 maio 2021.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/PROCEL, 2014. 366 p.

LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X. Development and verification of an EnergyPlus®-based algorithm to predict heat transfer through building walls integrated with phase change materials. **Journal Of Building Physics**, v. 40, n. 1, p. 77-95, 28 June 2015. SAGE Publications.

LI, Z.X.; AL-RASHED, A. A.A.A.; ROSTAMZADEH, M.; KALBASI, R.; SHAHSAVAR, A.; AFRAND, M. Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of pcm. **Energy Conversion And Management**, v. 195, p. 43-56, set. 2019. Elsevier BV.

LING, T-C; POON, C-S. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 55-62, sept. 2013. Elsevier BV.

LIRA, L. F. de L. **Caracterização de bioPCMS para controle de demanda térmica predial**. 2018. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas), Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

LIU, L.; HAMMAMI, N.; TROVALET, L.; BIGOT, D.; HABAS, J.-P.; MALET-DAMOUR, B. Description of phase change materials (PCMs) used in buildings under various climates: a review. **Journal Of Energy Storage**, v. 56, p. 105760, dez. 2022. Elsevier BV

MARCO, I. Seminar on phase change materials and innovation products—**Brianza Plastica**. Beijing, China, v. 20, oct. 2005, Tsinghua University.

MARIN, P.; SAFFARI, M.; GRACIA, A. de; ZHU, X.; FARID, M. M.; CABEZA, L. F.; 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. Elsevier BV.

MATEUS, N. M.; PINTO, A.; GRAÇA, G. C. da. Validation of EnergyPlus® thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. **Energy and Buildings**, v. 75, p. 511-522, June 2014. Elsevier BV.

MAVRIGIANNAKI, A.; AMPATZI, E. Latent heat storage in building elements: a systematic review on properties and contextual performance factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 852-866, July 2016. Elsevier BV.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus®**. Florianópolis: CB3E, UFSC, nov. 2015. 23 p.

MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications**. Berlin: Springer, 2008. 308 p.

MOHAMED, S. A.; AL-SULAIMAN, F. A.; IBRAHIM, N. I.; ZAHIR, M. H.; AL-AHMED, A.; SAIDUR, R.; YdLBAŞ, B.s.; SAHIN, A. Z. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1072-1089, Apr. 2017. Elsevier BV.

MOHSENI, E.; TANG, W. Parametric analysis and optimisation of energy efficiency of a lightweight building integrated with different configurations and types of PCM. **Renewable Energy**, v. 168, p. 865-877, May 2021. Elsevier BV.

MOHSENI, E.; TANG, W.; WANG, S. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 182-195, nov. 2019. Elsevier BV.

MOLINA, J. C. CALIL JR C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Revista Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, jul./dez. 2010

MUKRAM, T. A.; DANIEL, J. A review of novel methods and current developments of phase change materials in the building walls for cooling applications. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, v. 49, p. 101709, fev. 2022. Elsevier BV.

NGHANA, B.; TARIKU, F. Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. **Building and Environment**, v. 99, p. 221-238, apr. 2016. Elsevier BV.

NURLYBEKOVA, G.; MEMON, S. A.; ADILKHANOVA, I. Quantitative evaluation of the thermal and energy performance of the PCM integrated building in the subtropical climate zone for current and future climate scenario. **Energy**, v. 219, p. 119587, mar. 2021. Elsevier BV.

OKOGERI, O.; STATHOPOULOS, V. N. What about greener phase change materials? A review on *Biobased* phase change materials for thermal energy storage applications. **International Journal Of Thermofluids**, v. 10, p. 100081, maio 2021. Elsevier BV.

OLIVEIRA, M. M.; LUCARELLI, C. de C.; CARLO, J. C. Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 3, p. 67-111, set. 2022. FapUNIFESP (SciELO).

OLIVEIRA, R. B. de; GONZALES, T. S.; CARVALHO, M. T. M. Uso de PCM para edificações em região de clima quente. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021001, 18 jan. 2021.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1**. Florianópolis: LabEEE, UFSC, 2003. 19 p.

PARK, J. H.; WI, S.; CHANG, S. J.; KIM, S. Analysis of energy retrofit system using latent heat storage materials applied to residential buildings considering climate impacts. **Applied Thermal Engineering**, v. 169, p. 114904, mar. 2020. Elsevier BV.

PCES – PHASE CHANGE ENERGY SOLUTIONS. **ENRG Blanket™ powered by BioPCM®**, 2018. Disponível em: <https://phasechange.code-20.com/wp-content/uploads/2018/03/ENRG-Blanket-brochure-03262018.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2021.

PCES. **Technical Data Q23**. BioPCM Q23 Tunable Physical and Chemical Properties, 2020a. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2020/08/BioPCM-Data-Sheet-Q23.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2021.

PCES. **Technical Data Q25**. BioPCM Q25 Tunable Physical and Chemical Properties. 2020. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2020/08/BioPCM-Data-Sheet-Q25.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2021.

PCES. **Technical Data Q27**. BioPCM Q27 Tunable Physical and Chemical Properties, 2020c. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2020/08/BioPCM-Data-Sheet-Q27.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2021.

PCES. **Technical Data Q29**. BioPCM Q29 Tunable Physical and Chemical Properties, 2020d. Disponível em: <https://phasechange.com/wp-content/uploads/2020/08/BioPCM-Data-Sheet-Q29.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2021.

PEIPPO, K.; KAURANEN, P.; LUND, P.D. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. **Energy and Buildings**, v. 17, n. 4, p. 259-270, jan. 1991. Elsevier BV.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008. Elsevier BV.

PISELLI, C.; PRABHAKAR, M.; GRACIA, A. de; SAFFARI, M.; PISELLO, A. L.; CABEZA, L. F. Optimal control of natural ventilation as passive cooling strategy for improving the energy performance of building envelope with PCM integration. **Renewable Energy**, v. 162, p. 171-181, dec. 2020. Elsevier BV.

POMIANOWSKI, M.; HEISELBERG, P.; ZHANG, Y. Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 56-69, dec. 2013. Elsevier BV.

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, jun. 2017. Universidade Estadual de Campinas.

RAMAKRISHNAN, S.; WANG, X.; ALAM, M.; SANJAYAN, J.; WILSON, J. Parametric analysis for performance enhancement of phase change materials in naturally ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v. 124, p. 35-45, july 2016. Elsevier BV.

RAMAKRISHNAN, S.; WANG, X.; SANJAYAN, J.; WILSON, J. Thermal performance of buildings integrated with phase change materials to reduce heat stress risks during extreme heatwave events. **Applied Energy**, v. 194, p. 410-421, may 2017. Elsevier BV.

RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 246-258, feb. 2013. Elsevier BV.

RIBASKI, N. G.; DUDEK, L. C.; ROTTA, C. E. O sistema Wood Frame e o setor madeireiro paranaense. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 34-41, jan./jn. 2017.

RUBITHERM (Berlin). **Products**. c2023. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en/>. Acesso em: 5 maio 2021.

SAFFARI, M.; GRACIA, A. de; USHAK, S.; CABEZA, L. F. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1239-1255, dec. 2017a. Elsevier BV.

SAFFARI, M.; GRACIA, A. de; 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, sept. 2017b. Elsevier BV.

SAGE-LAUACK, J.S.; SAILOR, D.J. Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. **Energy and Buildings**, v. 79, p. 32-40, aug. 2014. Elsevier BV.

SCHOSSIG, P.; HENNING, H.; GSCHWANDER, S.; HAUSSMANN, T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 89, n. 2-3, p. 297-306, 15 nov. 2005. Elsevier BV.

SCHRÖDER, J.; GAWRON, K. Latent heat storage. **International Journal Of Energy Research**, v. 5, n. 2, p. 103-109, 1981. Wiley.

SHAFIGH, P.; ASADI, I.; MAHYUDDIN, Norhayati Binti. Concrete as a thermal mass material for building applications – A review. **Journal Of Building Engineering**, v. 19, p. 14-25, sept. 2018. Elsevier BV.

SHARMA, A.; TYAGI, V. V.; CHEN, C. R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 318-345, feb. 2009. Elsevier BV.

SHRESTHA, S.; MILLER, W.; STOVALL, T.; DESJARLAIS, A.; CHILDS, K.; PORTER, W.; BHANDARI,

M.; COLEY, S. M. PCM-enhanced insulation system and benchmarking EnergyPlus® against controlled field data. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 12., 2011, Sydney. **Proceedings of Building Simulation**. United States: IBPSA, 2011. p. 800-807.

SILVA, T.; VICENTE, R.; SOARES, N.; FERREIRA, V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 235-245, june 2012. Elsevier BV.

SOARES, N.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P.; COSTA, J. J. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 411-421, feb. 2014. Elsevier BV.

SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 82-103, apr. 2013. Elsevier BV.

SOUAYFANE, F.; FARDOUN, F.; BIWOLE, P-H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 396-431, 1 oct. 2016. Elsevier BV.

STASZCZUK, A.; KUCZYŃSKI, T. The impact of wall and roof material on the summer thermal performance of building in a temperate climate. **Energy**, v. 228, p. 120482, ago. 2021. Elsevier BV

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, ago. 2022. Elsevier BV.

TABARES-VELASCO, P. C.; BIANCHI, C. C. M.; BOOTEN, C. **Verification and validation of EnergyPlus® conduction finite difference and phase change material mod.** Golden, CO (United States): National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012.

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, aug. 2012. Elsevier BV.

TATE. **EcoCore™**. Phase change technology for energy efficiency. Jessup, MD, 2012. Disponível em: http://sweets.construction.com/swts_content_files/2559/582151.pdf. Acesso em: 28 out. 2022.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, p. 524-541, dec. 2015. Elsevier BV.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K.; AKIYAMA, T. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, p. 1373-1391, feb. 2011. Elsevier BV.

VIEIRA, J. C.; OLIVEIRA, R. D. Uso de PCMs para melhoria do desempenho térmico de edificações residenciais no clima temperado úmido: uma revisão sistemática. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 12., 2021, Palmas. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1173-1182.

WAQAS, A.; DIN, Z. U. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 607-625, fev. 2013. Elsevier BV.

WEBER, F. da S. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus®**. 2018. 101 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

YUAN, Y.; ZHANG, N.; TAO, W.; CAO, X.; HE, Y. Fatty acids as phase change materials: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 482-498, jan. 2014. Elsevier BV.

ZHANG, Y. P.; LIN, K. P.; YANG, R.; DI, H.F.; JIANG, Y. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1262-1269, oct. 2006. Elsevier BV.

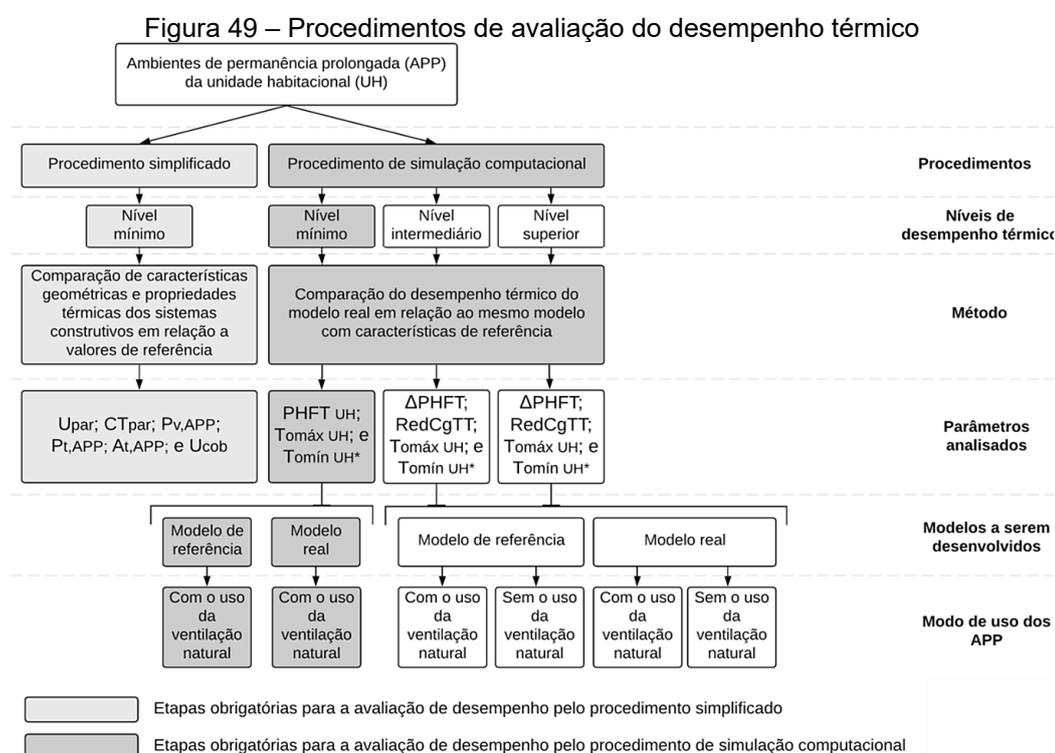
ZHANG, Y.; CUI, H.; TANG, W.; SANG, G.; WU, H. Effect of Summer Ventilation on the Thermal Performance and Energy Efficiency of Buildings Utilizing Phase Change Materials. **Energies**, v. 10, n. 8, p. 1214, 16 aug. 2017. MDPI AG.

ZHANG, Y.; ZHOU, G.; LIN, K.; ZHANG, Q.; DI, H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook. **Building and Environment**, v. 42, n. 6, p. 2197-2209, june 2007. Elsevier BV.

ZHOU, D.; ZHAO, C.Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, v. 92, p. 593-605, apr. 2012. Elsevier BV.

ANEXO A – PROCEDIMENTOS PARA ATENDIMENTO À NBR 15575-1:2021

A avaliação do desempenho térmico de unidades habitacionais (UHs) conforme o novo texto da NBR 15575-1:2021 pode ser realizada por meio dois métodos: simplificado ou de simulação. O método simplificado permite a análise do desempenho térmico da unidade habitacional (UH) para atendimento ao nível Mínimo (M) de desempenho, enquanto o método de simulação possibilita esta análise para os níveis Mínimo (M), Intermediário (I) e Superior (S) (ABNT, 2021). Um fluxograma com dos dois procedimentos pode ser visto na Figura 49.



Fonte: ABNT (2021a).

Segundo a Norma da ABNT (2021a), o método de simulação deve ser usado quando a UH não atende ao desempenho Mínimo pelo método simplificado. No entanto, a modelagem numérica é o método mais popular para a avaliação teórica do comportamento de Materiais de Mudança de Fase, devido às características térmicas variáveis destes materiais (AKEIBER *et al.*, 2016). Deste modo, optou-se por adotar apenas o método de simulação neste trabalho.

O método de simulação consiste na comparação do desempenho térmico anual da envoltória da edificação proposta em relação a esta envoltória com características de referência estabelecidas na NBR 15575-1 (ABNT, 2021). Para isso, deve-se elaborar dois modelos:

- modelo real: representa a edificação a ser analisada, preservando suas características geométricas, propriedades térmicas e composições de elementos transparentes, paredes e cobertura da UH proposta;
- modelo de referência: apresenta as mesmas características de volume, área, divisão de ambientes, contato com o solo, orientação solar e o entorno que o modelo real. Contudo, deve sofrer alterações, em relação ao modelo real, das características térmicas dos sistemas construtivos e dos percentuais de elementos transparentes e aberturas.

Os modelos devem incluir os ambientes de permanência prolongada (APP) e transitória (APT) e as simulações devem considerar as cargas internas horárias provenientes da ocupação e do uso de iluminação artificial e equipamentos nos APP. Para realizar as simulações, é necessário utilizar um *software* de simulação e arquivos climáticos do local a ser avaliado que forneçam informações representativas do clima da cidade na qual a UH está implantada (ABNT, 2021).

Para o atendimento do nível M, as simulações do desempenho térmico da UH devem ser realizados considerando somente o uso de ventilação natural nos APPs. Quanto aos níveis I ou S, é necessário que os modelos real e de referência sejam simulados com e sem o uso de ventilação natural (ABNT, 2021). No presente trabalho, objetivou-se avaliar o potencial de melhoria do desempenho térmico de habitações pelo emprego de PCMs de maneira passiva. Ou seja, sem uso de climatização artificial. Portanto, apenas os critérios voltados para edificações naturalmente ventiladas, para o atendimento do nível M, são abordados a seguir.

No modelo com o uso de ventilação natural, é preciso solicitar, como variável de saída das simulações, a temperatura operativa horária de cada APP (T_{OAPP}) da edificação. Cada modelo simulado deve fornecer 8.760 valores para a variável de saída, correspondentes ao total de dados horários durante um ano. A partir disso, deve-se calcular, para cada APP dos modelos real e de referência, os seguintes parâmetros (ABNT, 2021):

- percentual de horas de ocupação dos APPs dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$);
- temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{APP}$) de cada APP;
- temperatura operativa anual mínima ($Tomín_{APP}$) de cada APP, caso a edificação esteja localizada nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4.

A partir dos valores de $PHFT_{APP}$, $Tomáx_{APP}$ e $Tomín_{APP}$ de cada APP, deve-se determinar os parâmetros $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ de toda a UH para os modelos real e de referência (ABNT, 2021).

O $PHFT_{UH}$ é resultado da avaliação individual de cada APP ($PHFT_{APP}$) durante os períodos de ocupação e deve ser avaliado com base em intervalos de temperaturas externas. Estes intervalos (Tabela 20) devem ser inicialmente determinados por meio da temperatura média anual de bulbo seco (TBS_m), fornecida pelo arquivo climático utilizado (ABNT, 2021). Para cada intervalo da Tabela 20, existe uma faixa de To_{APP} a ser considerada para a determinação do $PHFT_{APP}$ de todos os APP da UH.

Tabela 20 – Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco (TBS_m) e faixas de temperatura operativa (To_{APP}) para a determinação do $PHFT_{APP}$

Intervalos	TBS_m [°C]	To_{APP} [°C] a ser considerada
1	$< 25,0$	$18,0 < To_{APP} < 26,0$
2	$25,0 \leq TBS_m < 27,0$	$< 28,0$
3	$\geq 27,0$	$< 30,0$

Fonte: adaptado de ABNT (2021a).

A Figura 50 exemplifica o procedimento de análise horária dos dados de saída dos modelos com ventilação natural, a ser desenvolvida para o cálculo do $PHFT_{APP}$, considerando o Intervalo 1 (ABNT, 2021).

Figura 50 – Ilustração esquemática da análise horária dos dados de saída (com ventilação natural)

Modelo com o uso da ventilação natural				
Hora do ano	Horário	Ocupação do APP	To_{APP}	$PHFT_{APP}$
1	00:00 – 00:59	Sim	$18^{\circ}\text{C} < To < 26^{\circ}\text{C}$	Sim
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	05:00 – 05:59	Sim	$To \geq 26^{\circ}\text{C}$	Não
7	06:00 – 06:59	Sim	$To \geq 26^{\circ}\text{C}$	Não
8	07:00 – 07:59	Não	$To \geq 26^{\circ}\text{C}$	Não
9	08:00 – 08:59	Não	$To \geq 26^{\circ}\text{C}$	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4345	00:00 – 00:59	Sim	$To \leq 18^{\circ}\text{C}$	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8760	23:00 – 23:59	Sim	$18^{\circ}\text{C} < To < 26^{\circ}\text{C}$	Sim

Fonte: adaptado de ABNT (2021a).

Os demais procedimentos para cálculo do $PHFT_{APP}$ e do $PHFT_{UH}$ estão detalhados nos itens 11.4.7.5 e 11.4.7.6 da NBR 15575-1:2021. Para atender ao nível Mínimo, é

necessário que o modelo real apresente, ao longo do ano e durante os períodos de ocupação dos ambientes de permanência prolongada, $PHFT_{UH,real}$ superior a 90% do obtido no modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$), conforme a Equação 1 (ABNT, 2021).

$$PHFT_{UH,real} > 0,90 \cdot PHFT_{UH,ref} \quad (5)$$

Para a determinação da $Tomáx_{UH}$, deve-se comparar as temperaturas operativas anuais máximas ($Tomáx_{APP}$) de cada APP durante os respectivos períodos de ocupação e, em seguida, adotar o maior valor dentre elas. O mesmo procedimento é necessário para a determinação do $Tomín_{UH}$ (ABNT, 2021).

Para atender ao nível Mínimo, é preciso que a temperatura máxima do modelo real seja menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somada a um valor de tolerância (Equação 6). O mesmo procedimento acontece para a temperatura mínima, de acordo com a Equação 7 (ABNT, 2021).

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx \quad (6)$$

$$Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín \quad (7)$$

Onde:

$Tomáx_{UH,real}$ = temperatura operativa anual máxima da UH no modelo real (°C);

$Tomáx_{UH,ref}$ = temperatura operativa anual máxima da UH no modelo de referência (°C);

$\Delta Tomáx$ = valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima (°C);

$Tomín_{UH,ref}$ = temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência (°C);

$\Delta Tomín$ = valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima (°C).

O valor de $\Delta Tomáx$ deve ser de 2 °C (para UH unifamiliares e para o pavimento de cobertura de UH multifamiliares) ou 1 °C (para os demais pavimentos de UH multifamiliares). Quanto ao valor de $\Delta Tomín$, deve ser 1 °C para todas as UH avaliadas (ABNT, 2021).

As propriedades térmicas do modelo de referência para os elementos de vedação podem ser verificadas no item 11.4.7.2 da NBR 15575-1:2021. Ademais, as condições de abertura e fechamento das esquadrias devem seguir as especificações do item 11.4.7.4 da Norma (ABNT, 2021).

Na modelagem da edificação, as cargas internas decorrentes da ocupação dos usuários e do uso de sistemas de iluminação e equipamentos nos APP devem ser consideradas conforme as rotinas e padrões de uso estabelecidas no item 11.4.7.3 da NBR 15575-1:2021. Todas as cargas internas de uso e ocupação nos APP devem ser modeladas igualmente para o modelo real e para o modelo de referência e devem ser as mesmas para todos os dias do ano, inclusive nos finais de semana (ABNT, 2021).

APÊNDICE A – Requisitos de desempenho térmico da envoltória

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nas simulações da UH proposta para os modelos avaliados com e sem aplicação de PCM na envoltória, conforme os 438 cenários fictícios de análise definidos e apresentados no Quadro 2 da página 47 deste trabalho. Todos os cenários apresentaram Temperatura Externa do Bulbo Seco (T_{BSm}) inferior a 25,0 °C, como observa-se na Tabela 21. Portanto, a faixa de temperatura operativa (T_{OAPP}) a ser considerada para o cálculo do percentual de horas de ocupação dos APPs dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$) dos modelos foi avaliado com base no Intervalo 1 ($18,0 < T_{OAPP} < 26,0$ °C), conforme apresentado anteriormente na Tabela 20 deste trabalho.

Tabela 21 – Médias anuais das temperaturas externa e interna -- modelos sem PCM

UF	Cidade	Zona bioclimática (ZB)	Média anual da temperatura externa do bulbo seco (T_{BSm}) (°C)	Média da temperatura operativa da UH sem PCM (°C)	
				Modelo de paredes pesadas (MPP)	Modelo leve e isolado (MLI)
PR	Curitiba	ZB 1	17,4	20,1	20,4
RS	Santa Maria	ZB 2	19,0	21,6	21,9
SP	São Paulo	ZB 3	19,6	21,6	21,8

Fonte: elaboração própria.

Diante dos resultados das temperaturas operativas dos modelos sem PCM, pode-se traçar um panorama para a formulação de estratégias de melhoria pelo uso de PCM. Conforme apresentado na revisão de literatura, Peippo, Kauranen e Lund (1991) sugerem que o ponto de fusão ideal do PCM seja um valor de 1 °C a 3 °C superior à temperatura média do ambiente sem esses materiais. Segundo Ramakrishnan *et al.* (2016), o ponto de fusão do PCM deve ser 3 °C a 5 °C mais alta do que a temperatura média do ar externo. Para Brito *et al.* (2017), é importante que a capacidade de armazenamento térmico latente do PCM seja maior que 315 kJ/m² nas zonas bioclimáticas avaliadas. Sendo assim, na Tabela 22, sintetizam-se as características térmicas ideais do PCM recomendadas pelos referidos autores nas ZBs avaliadas.

Tabela 22 – Propriedades térmicas ideais para a escolha dos PCMs

Cidade	zona bioclimática (ZB)	Valor do ponto de fusão “ideal” (°C)		Capacidade de armazenamento térmico latente (kJ/m ²)
		Ramakrishnan <i>et al.</i> (2016)	Peippo, Kauranen e Lund (1991)	Brito <i>et al.</i> (2017)
Curitiba	ZB 1	20,4 a 22,4	21,1 a 23,4	> 315
Santa Maria	ZB 2	22 a 24	22,6 a 24,9	
São Paulo	ZB 3	22,6 a 24,6	22,6 a 24,8	

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE B – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 1

Na Tabela 23, os valores obtidos para os critérios de desempenho térmico de referência, calculados segundo os procedimentos descritos no Anexo A, são indicados para cada APP (PHFT_{APP,ref}, Tomáx_{APP,ref} e Tomín_{APP,ref}) e para a UH (PHFT_{UH,ref}, Tomáx_{UH,ref} e Tomín_{UH,ref}) na cidade de Curitiba – PR (zona bioclimática 1), bem como os valores limites de referência de cada critério para que a UH em análise apresente nível Mínimo (M) de desempenho térmico.

Tabela 23 – Parâmetros de desempenho térmico – Curitiba (ZB 1) – modelo de referência

Modelo	Critérios	APP			UH _{ref}	Valores limites segundo o MRef
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha		
Referência (MRef)	PHFT (%)	69,2	69,8	85,2	74,7	> 67,2
	Tomáx (°C)	24,9	24,9	27,8	27,8	≤ 29,8
	Tomín (°C)	13,9	13,7	14,3	13,7	≥ 12,7

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 24, apresentam-se os resultados do desempenho térmico para cada APP e para a UH na ZB 1 nos modelos de paredes pesadas (MPP) e leve isolado (MLI), sem PCM. No MPP, verifica-se que os critérios do PHFT_{UH,real-MPP} e do Tomín_{UH,real-MPP} atendem aos limites mínimos calculados na Tabela 23. Porém, o critério da Tomáx_{UH,real-MPP} não atendeu ao limite máximo calculado no modelo de referência. Portanto, conclui-se que a edificação no MPP não apresenta desempenho térmico de nível Mínimo (M) na cidade de Curitiba (ZB 1). Quanto ao MLI, todos os parâmetros limites de desempenho térmico de referência foram atendidos, alcançando nível Mínimo (M) de desempenho pela edificação.

Tabela 24 – Diagnóstico de desempenho térmico – Curitiba (ZB 1) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Critérios	APP			UH _{real}	Atendimento do nível Mínimo de desempenho	
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha			
Paredes pesadas (MPP)	PHFT (%)	67,4	67,4	80,3	71,7	Sim	Não
	Tomáx (°C)	25,6	25,6	30,5	30,5	Não	
	Tomín (°C)	13,4	13,3	14,1	13,3	Sim	
Leve isolado (MLI)	PHFT (%)	79,3	78,5	90,2	82,7	Sim	Sim
	Tomáx (°C)	24,5	24,5	29,1	29,1	Sim	
	Tomín (°C)	15,2	15,2	15,8	15,2	Sim	

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE C – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 2

Na Tabela 25, são indicados os valores obtidos para os critérios de desempenho térmico de referência calculados para cada APP ($PHFT_{APP,ref}$, $Tomáx_{APP,ref}$ e $Tomín_{APP,ref}$) e para a UH ($PHFT_{UH,ref}$, $Tomáx_{UH,ref}$ e $Tomín_{UH,ref}$) na cidade de Santa Maria – RS (ZB 2), bem como os valores limites calculados no modelo de referência (MRef).

Tabela 25 – Parâmetros de desempenho térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelo de referência

Modelo	Critérios	APP			UH _{,ref}	Valores limites segundo o MRef
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha		
Referência (MRef)	PHFT (%)	62,2	63,3	58,1	61,2	> 55,1
	Tomáx (°C)	30,4	30,3	32,6	32,6	≤ 34,6
	Tomín (°C)	12,3	12,1	14,2	12,1	≥ 11,1

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 26, são apresentados os valores obtidos dos parâmetros de desempenho térmico para cada APP e para a UH na ZB 2 nos modelos sem PCM. Verifica-se que a edificação no modelo de paredes pesadas (MPP) em Santa Maria (ZB 2) também não apresenta desempenho térmico de nível Mínimo (M), tendo em vista que não atendeu aos critérios de $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$, conforme os limites de referência apresentados na Tabela 25. Por outro lado, novamente, no modelo leve isolado (MLI), todos os critérios de desempenho atenderam aos limites calculados no modelo de referência, atingindo nível Mínimo (M) de desempenho térmico.

Tabela 26 – Diagnóstico de desempenho térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Critérios	APP			UH _{,real}	Atendimento do nível Mínimo de desempenho	
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha			
Paredes pesadas (MPP)	PHFT (%)	62,5	63,4	55,4	60,4	Sim	Não
	Tomáx (°C)	31,1	30,9	35,1	35,1	Não	
	Tomín (°C)	10,8	10,7	14,1	10,7	Não	
Leve isolado (MLI)	PHFT (%)	76,3	76,6	65,8	72,9	Sim	Sim
	Tomáx (°C)	29,4	29,3	33,4	33,4	Sim	
	Tomín (°C)	13,4	13,3	16,0	13,3	Sim	

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE D – Desempenho térmico dos modelos sem PCM – ZB 3

Na Tabela 27, indicam-se os valores obtidos para os critérios de desempenho térmico de referência calculados para cada APP ($PHFT_{APP,ref}$, $Tomáx_{APP,ref}$ e $Tomín_{APP,ref}$) e para a UH ($PHFT_{UH,ref}$, $Tomáx_{UH,ref}$ e $Tomín_{UH,ref}$) na cidade de São Paulo – SP (ZB 3), além dos valores limites de referência para atendimento ao nível Mínimo (M) de desempenho térmico pela edificação.

Tabela 27 – Parâmetros de desempenho térmico – São Paulo (ZB 3) – modelo de referência

Modelo	Critérios	APP			UH _{ref}	Valores limites segundo o MRef
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha		
Referência (MRef)	PHFT (%)	90,5	90,3	89,4	90,1	> 81,1
	Tomáx (°C)	27,2	27,3	28,6	28,6	≤ 30,6
	Tomín (°C)	15,5	15,4	16,2	15,4	≥ 14,4

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 28, apresentam-se os valores obtidos para o PHFT, Tomáx e Tomín para cada APP e para a UH na cidade de São Paulo (ZB 3), durante os respectivos períodos de ocupação, nos modelos sem PCM.

Novamente, verifica-se que a edificação no modelo de paredes pesadas (MPP) na ZB 3 também não apresentou desempenho térmico de nível Mínimo (M) por não ter atendido ao critério da $Tomáx_{UH}$ calculado pelo modelo de referência (Tabela 27). O modelo leve isolado (MLI), por sua vez, atendeu a todos limites dos parâmetros de referência, atingindo assim nível Mínimo (M) de desempenho térmico.

Tabela 28 – Diagnóstico de desempenho térmico – São Paulo (ZB 3) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Critérios	APP			UH _{real}	Atendimento do nível Mínimo de desempenho	
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/ Cozinha			
Paredes Pesadas (MPP)	PHFT (%)	86,4	86,2	77,2	83,3	Sim	Não
	Tomáx (°C)	27,8	27,8	31,5	31,5	Não	
	Tomín (°C)	14,6	14,4	16,0	14,4	Sim	
Leve isolado (MLI)	PHFT (%)	98,5	98,2	83,8	93,5	Sim	Sim
	Tomáx (°C)	26,3	26,3	29,9	29,9	Sim	
	Tomín (°C)	17,0	17,0	17,8	17,0	Sim	

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE E – Conforto térmico dos modelos sem PCM – ZB 1

As horas em condições de conforto térmico aceitáveis aos ocupantes foram avaliadas para os modelos conforme o método adaptativo da norma ASHRAE 55-2017, com 80% de aceitabilidade em relação à temperatura neutra. Na Tabela 29, são mostradas as médias das temperaturas neutras de conforto, bem como dos limites de temperaturas de conforto térmico superior (+3,5 °C) e inferior (-3,5 °C) encontradas para cada zona bioclimática (ZB).

Tabela 29 – Valores médios das temperaturas de conforto térmico em cada zona bioclimática

zona bioclimática (ZB)	Temperaturas de conforto térmico com 80% de aceitabilidade (°C)		
	Limite inferior (-3,5)	Neutra (0)	Limite superior (+3,5)
ZB 1	19,7	23,2	26,7
ZB 2	20,2	23,7	27,2
ZB 3	20,4	23,9	27,4

Fonte: elaboração própria.

Entre as Tabelas 30 a 32, são apresentados os valores obtidos do percentual de horas em condições de conforto térmico calculados para cada APP (quarto 1, quarto 2 e sala/cozinha) e para a UH (média ponderada em relação às horas ocupadas de cada APP) na cidade de Curitiba-PR (ZB 1), Santa Maria-RS (ZB 2) e São Paulo-SP (ZB 3).

Tabela 30 – Condições de conforto térmico – Curitiba (ZB 1) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Descrição	Horas de conforto térmico			
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/Cozinha	UH
Paredes pesadas (MPP)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	41,4%
	Horas em conforto	1152	1016	2062	
	Condições de conforto (%)	31,6%	27,8%	70,6%	
Leve isolado (MLI)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	41,7%
	Horas em conforto	1086	875	2305	
	Condições de conforto (%)	29,8%	24,0%	78,9%	

Fonte: elaboração própria.

Tabela 31 – Condições de conforto térmico – Santa Maria (ZB 2) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Descrição	Horas de conforto térmico			
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/Cozinha	UH
Paredes pesadas (MPP)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	48,7%
	Horas em conforto	1719	1633	1629	
	Condições de conforto (%)	47,1%	44,7%	55,8%	
Leve isolado (MLI)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	52,4%
	Horas em conforto	1778	1655	1926	
	Condições de conforto (%)	48,7%	45,3%	66,0%	

Fonte: elaboração própria.

Tabela 32 – Condições de conforto térmico – São Paulo (ZB 3) – modelos sem PCM

Modelo sem PCM	Descrição	Horas de conforto térmico			
		Quarto 1	Quarto 2	Sala/Cozinha	UH
Paredes pesadas (MPP)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	53,9%
	Horas em conforto	1753	1597	2159	
	Condições de conforto (%)	48,0%	43,8%	73,9%	
Leve isolado (MLI)	Horas ocupadas	3650	3650	2920	56,9%
	Horas em conforto	1827	1632	2352	
	Condições de conforto (%)	50,1%	44,7%	80,5%	

Fonte: elaboração própria.



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado