



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Bruno Aied Passos

O impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em Habitação Unifamiliar de Pequeno Porte em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras

Florianópolis

2023

Bruno Aied Passos

O impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em Habitação Unifamiliar de Pequeno Porte em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras

Defesa de Tese submetida ao Programa de Arquitetura e urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor em Arquitetura e urbanismo

Orientador: Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.

Florianópolis

2023

Passos, Bruno Aied

O impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em Habitação Unifamiliar de Pequeno Porte em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras / Bruno Aied Passos ; orientador, Fernando Simon Westphal, 2023.
199 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Phase Change Material. 3. Habitação unifamiliar de pequeno porte. 4. Simulação computacional. 5. zonas bioclimáticas brasileiras. I. Westphal, Fernando Simon. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Bruno Aied Passos

O impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em Habitação unifamiliar de pequeno porte em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 24 de outubro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Martin Ordenes Mizgier, Dr.(a)

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Saulo Güths, Dr.(a)

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Antônio César Silveira Baptista da Silva, Dr.(a)

Instituição Universidade Federal de Pelotas

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.

Orientador(a)

Florianópolis, 2023.

RESUMO

Diversos estudos ao redor do mundo vêm avaliando os impactos da utilização de materiais de mudança de fase, ou também chamados *Phase Change Material* (PCM) nas vedações de edificações. No Brasil, esse tipo de material ainda é pouco utilizado e não se sabe o real efeito de sua implementação na construção civil para as condições climáticas do país, sobretudo em climas com maior amplitude térmica diária e em edificações com sistemas leves de construções. A presente tese busca identificar o impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em habitação unifamiliar de pequeno porte (HUPP's) em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras que requerem maior inércia térmica. Por meio da revisão bibliográfica, foi possível estabelecer condicionantes climáticas, construtivas, e de uso nas quais o PCM se mostra benéfico às condições térmicas internas de edificações. O material se mostrou mais promissor quando aplicado em edificações sob condições climáticas de grande amplitude térmica, junto à face interna da envoltória e sob o regime de ventilação noturno. O estudo comparativo, feito por meio de um modelo computacional elaborado e simulado no software *EnergyPlus 9.2*, apresenta resultados que indicam que a utilização do PCM pode ser benéfica, contribuindo para o aumento das condições de conforto térmico ao usuário, gerando a menor amplitude térmica diária no interior do modelo em condições climáticas dotadas de amplitude térmica diária suficiente para fazer o material passar pelo seu ciclo de troca de fase mais vezes ao longo do ano. Desta forma, a associação do PCM ao *drywall* demonstrou melhorias significativas no desempenho térmico de HUPP's em regiões do Brasil que compreendem mais de 60% da população do país. Em comparação com envoltórias tradicionais de alvenaria e mesmo com o *drywall* sem PCM, a implementação desse material proporcionou um ambiente interno mais confortável, aumentando as horas na faixa de temperatura desejada em uma área que abrange a mais de um terço da população nacional. O aprimoramento do desempenho térmico de HUPP's com sistema leve de construção no Brasil pode ter um grande impacto na construção civil, melhorando a produtividade, velocidade de execução e reduzindo resíduos, e assim, podendo contribuir para a redução do déficit habitacional de forma sustentável.

Palavras-chave: *Phase Change Material*. Habitação unifamiliar de pequeno porte. Simulação computacional. zonas bioclimáticas brasileiras.

ABSTRACT

Several studies around the world have been evaluating the impacts of using phase change materials, or also called Phase Change Material (PCM) in building seals. In Brazil, this type of material is still little used and the real effect of its implementation in civil construction for the country's climatic conditions is unknown, especially in climates with a greater daily temperature range and in buildings with lightweight construction systems. This thesis seeks to identify the impact of the use of PCM's on internal thermal conditions in small single-family housing (HUPP's) in a lightweight construction system in Brazilian climatic conditions that require greater thermal inertia. Through the literature review, it was possible to establish climatic, constructive and use conditions in which PCM is beneficial to the internal thermal conditions of buildings. The material proved to be more promising when applied to buildings under climatic conditions with a wide range of temperatures, close to the internal surface of the envelope and under night-time ventilation. The comparative study, carried out using a computational model prepared and simulated in the EnergyPlus 9.2 software, presents results that indicate that the use of PCM can be beneficial, contributing to increasing thermal comfort conditions for the user, generating the lowest daily thermal amplitude inside the model in climatic conditions with sufficient daily temperature range to make the material go through its phase change cycle more times throughout the year. Thus, the use of PCM associated with drywall demonstrated significant improvements in the thermal performance of HUPPs in regions of Brazil with more than 60% of the population. Compared to traditional masonry envelopes and even PCM-free drywall, the implementation of this material provided a more comfortable indoor environment, increasing hours in the desired temperature range in an area covering more than a third of the national population. Improving the thermal performance of HUPPs with a lightweight construction system in Brazil can have a great impact on civil construction, improving productivity, speed of execution and reducing waste, and thus, can contribute to reducing the housing deficit.

Palavras-chave: *Phase Change Material*. Small single-family housing. Computer simulation. 8 Brazilian bioclimatic zones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimentos metodológicos.....	19
Figura 2- Configuração padrão de paredes em sistema leve de construção.....	20
Figura 3 – Diferença de produtividade do setor de construção civil tendo como base o setor nos EUA.....	21
Figura 4- Comparativo de massa aproximada entre sistemas construtivos tradicionalmente utilizados no Brasil e do sistema leve de construção (<i>Drywall</i>).....	22
Figura 5- Ilustração do ciclo de trocas de fase e ganho/ perda de calor latente de um PCM.....	23
Figura 6- Ilustração da curva de entalpia de um PCM.....	24
Figura 7- Categorização geral dos PCM's	24
Figura 8- Temperatura de fusão x entalpia de fusão, com destaque para os PCM's aplicáveis na construção civil para aumento de inércia térmica devido sua temperatura de fusão.	26
Figura 9- Climas analisados, tipologias de construção, posicionamento, temperaturas de fusão e espessura do PCM instalada.....	29
Figura 10- a) Impacto de diferentes configurações do PCM na demanda de energia de refrigeração em julho em Ancara, Turquia. b) Efeito de diferentes espessuras de PCM na demanda de energia de refrigeração em julho em Marselha, França.....	30
Figura 11- Perfil de temperatura do modelo naturalmente ventilado durante dois dias típicos de verão na cidade de Ancara, Turquia. Comparativo de temperaturas operativas internas e da superfícies internas das opções com placa de 3cm de espessura de PCM com temperatura de fusão de 27°C, e de modelo sem PCM.....	30
Figura 12- a) Desempenho do PCM variando a localização na envoltória; b) variação da localização do PCM na envoltória em ordem crescente do meio externo para o interno....	33
Figura 13- Variação de temperatura em uma parede convencional com e sem PCM.	34
Figura 14- Configurações de paredes com PCM estudadas na segunda etapa da pesquisa	35
Figura 15- Variação de temperatura das configurações da parede somada ao com o PCM de temperatura de fusão em 23°C e de uma parede de mesma composição sem a utilização do material.....	35

Figura 16- Configurações dos elementos de envoltória	36
Figura 17- Porcentagem de horas de conforto térmico adaptativo para cada cidade e proporção de PCM estudado (LE0 igual a 0% de PCM, LE2 igual a 2% de PCM, LE5 igual a 5% de PCM, LE10 igual a 10% de PCM, LE20 igual a 20% de PCM).....	36
Figura 18- Consumo de energia para aquecimento e resfriamento [kWh/ano] e economia de energia [%] de acordo com a temperatura de fusão do PCM em Caen e Nice (TA0 igual a 0% de PCM, TA2 igual a 2% de PCM, TA5 igual a 5% de PCM, TA10 igual a 10% de PCM, TA20 igual a 20% de PCM).....	37
Figura 19- Redução no consumo anual de energia para refrigeração e aquecimento para paredes externas leves em terra com as diversas temperaturas de fusão do PCM em Caen e Nice.	38
Figura 20- Configuração da envoltória com PCM aplicado na cobertura e parede (configuração sem PCM foi considerada idêntica, porém sem a inserção do material).....	38
Figura 21- Perfil de temperatura operativa no interior do protótipo sob a envoltória com e sem PCM e temperatura do ar para o período de 24h.....	39
Figura 22- Ganho de calor e Redução máxima do ganho de calor (RMGC) em cada um dos elementos de envoltória (paredes e cobertura).....	40
Figura 23 – Composição dos dois tipos de janela.	41
Figura 24 – Fluxo de calor que entra no ambiente por meio dos dois diferentes tipos de janelas	42
Figura 25 – a) Corte da parede de bloco de concreto com a localização dos tubos e do PCM; b) Representação esquemática adotada para execução do experimento, com a localização de cada um dos sensores de calor.	43
Figura 26 – a) Variação de temperatura no PCM entre a face aquecida e o tubo; b) variação de temperatura no PCM entre o tubo e o lado em contato com o ar ambiente; c) evolução da temperatura na face lateral do bloco.....	44
Figura 27 – Composição dos dois tipos de parede adotados.....	45
Figura 28- Diagrama isométrico da célula de teste com os 12 refletores - localizações das paredes modificadas.	45
Figura 29 - Temperaturas na sala para o caso de verão com ventilação - T1 na altura 0,85m e T2 na altura 1,70 m.....	46
Figura 30 – Representação esquemática das camadas das paredes sem e com PCM	46
Figura 31 – Perfil de temperatura no modelo com e sem PCM.	47

Figura 32 – a) planta do ambiente avaliado; b) configuração da parede com PCM. .	48
Figura 33 – Perfil do fluxo térmico através da parede	48
Figura 34 – Perfil de temperatura do ar interno	48
Figura 35- Configuração do ambiente com a placa de revestimento sem e com PCM.	49
Figura 36- Comparação de temperaturas acima de 720 min em uma sala usando (acima) placa de parede comum e (abaixo) placa de parede contendo material de mudança de fase microencapsulado.....	50
Figura 37- Temperatura média superficial da parede, temperatura média de globo e temperatura média do ar interno no ambiente com revestimento com e sem PCM.....	51
Figura 38- Consumo de energia elétrica no ambiente com revestimento com e sem PCM.....	51
Figura 39- Configurações de paredes avaliadas	52
Figura 40- Variação da temperatura da superfície interna da parede em diferentes direções com o tempo sob diferentes temperaturas de troca de fase e localizações do PCM. .	53
Figura 41- Fluxo de calor da parede para diferentes orientações de parede e localizações de PCM.	54
Figura 42- Fluxo de calor da parede para diferentes espessuras e localizações de PCM.	54
Figura 43 - Configuração da construção para o caso de referência e o caso com o PCM a) Parede de referência, b) Parede com PCM, c) teto de referência, d) telhado com PCM.....	55
Figura 44 - Comparação entre a temperatura do ar interna nos modelos de referência e com PCM e temperatura do ar externa, na cidade de Guayaquil	56
Figura 45 - Comparação do balanço energético do envelope durante um dia entre paredes de referência e paredes com PCM, telhado de referência e telhado com PCM, na cidade de Guayaquil.....	56
Figura 46- Materiais utilizados para o modelo numérico e as espessuras de cada componente.....	57
Figura 47-Temperatura máxima diária (esquerda) e mensal (direita) do ar interno (T_i) para os PCMs com diferentes temperaturas de fusão usando uma camada PCM (a), duas camadas PCM (b) e três camadas PCM (c).	58

Figura 48 - Gráfico da temperatura do ar exterior e no interior de modelo com sistema pesado, sem PCMs e com PCMs (espessuras de 5, 10, 15 e 20mm) com ponto de fusão de 30°C na cidade de São Paulo (zona bioclimática 3)	59
Figura 49 - Intervalos de temperatura do ar interior com sistema leve, sem PCMs e com PCMs nas Zonas bioclimáticas 1, 3, 5 e 7, respectivamente.	60
Figura 50 - Planta do modelo físico	61
Figura 51 - Comparativo de redução do consumo no cenário somente com ar condicionado, ar condicionado somado à ventilação forçada e ar condicionado somado à ventilação forçada otimizada, respectivamente.	62
Figura 52- Modelo 3D da edificação estudada.....	63
Figura 53- Resultados de Intensidade do uso de energia elétrica para os modelos com menor transmitância na ZB3.	64
Figura 54 - Temperatura dentro do modelo com e sem PCM, respectivamente, durante o período de 04 a 20 de março.....	68
Figura 55 - Gráficos da temperatura do ar interior nas simulações de Brito et. al (2017) (à esquerda) e nas medições de Kuznik e Virgone (2009) (à direita).....	69
Figura 56 – Zoneamento bioclimático brasileiro segundo a NBR15220	70
Figura 57 - Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Brasília, DF. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.	75
Figura 58 - Temperaturas médias mensais (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Brasília, DF.	76
Figura 59 - Taxa de radiação solar incidente em plano horizontal [W/m ²] h, em Brasília/DF.	76
Figura 60 - Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Brasília, DF.	77
Figura 61 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Brasília, DF.....	77
Figura 62 - Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Brasília, DF.....	77
Figura 63 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Brasília, DF.	78

Figura 64- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Goiânia, GO. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.	78
Figura 65- Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Goiânia, GO.....	79
Figura 66- Taxa de radiação solar incidente em plano horizontal [W/m^2] h, em Goiânia, GO.	80
Figura 67- Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Goiânia, GO.	80
Figura 68 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Goiânia, GO.	81
Figura 69- Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Goiânia, GO.	81
Figura 70- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Goiânia, GO.	81
Figura 71- Síntese comparativa das condições climáticas das duas zonas bioclimáticas analisadas.....	82
Figura 72 – Perspectiva do modelo simulado	83
Figura 73- Padrões de ocupação diários e taxa metabólica dos usuários dos ambientes de permanência prolongada	85
Figura 74 – Padrão de uso de iluminação artificial [%].	86
Figura 75- Regime de ventilação [%].....	87
Figura 76 – Configurações de paredes externas simuladas: a) parede em alvenaria; b) parede em sistema de construção leve; e c) parede em sistema de construção leve com PCM89	
Figura 77 - Configurações de paredes internas simuladas: a) parede em alvenaria; b) parede em sistema de construção leve; e c) parede em sistema de construção leve com PCM89	
Figura 78 - Configurações de forro simuladas: a) laje de concreto; b) forro de gesso sem isolante térmico; e c) forro de gesso com isolante térmico com PCM.....	90
Figura 79 – Configuração do telhado simulado	90
Figura 80 – Configurações da laje de piso no modelo	91
Figura 81- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 25°C	94
Figura 82- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 28°C	94

Figura 83-Objeto <i>MaterialProperty:PhaseChange</i> utilizado nas simulações	95
Figura 84 - Objeto <i>Material</i> utilizado nas simulações	96
Figura 85- Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados.....	98
Figura 86- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o dia mais frio para Brasília/DF.....	100
Figura 87- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o pico de calor para Brasília/DF.....	100
Figura 88 – Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no período de um ano para Brasília/DF	101
Figura 89- Extremos de temperaturas registradas no ar exterior e nos três casos simulados para Brasília/DF.....	101
Figura 90- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 21 de junho para o clima de Brasília/DF.....	103
Figura 91- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 12 de setembro para o clima de Brasília/DF.....	103
Figura 92- Taxas de troca de ar por hora dos três casos estudados no dia 12 de setembro para o clima de Brasília/DF	104
Figura 93- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no período de um ano para o clima de Brasília.....	105
Figura 94- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos simulados para o clima de Brasília.....	106
Figura 95- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o dia mais frio em Goiânia, GO	107
Figura 96- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o pico de calor em Goiânia, GO.....	107
Figura 97- Extremos de temperaturas registradas no ar exterior e nos três casos simulados para Goiânia/GO.....	108
Figura 98- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos	108
Figura 99- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos	109
Figura 100- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no período de um ano	109
Figura 101 – Balanço térmico dos três casos estudados no dia 25 de maio.....	110

Figura 102- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 9 de setembro.....	110
Figura 103 – Frequência de amplitude térmica em cidades representantes das 8 zonas Bioclimáticas. Em destaque as que apresentam os maiores valores e que foram selecionadas para a segunda fase de simulações.	113
Figura 104- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Santa Maria, RS. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.	114
Figura 105 - Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Santa Maria, RS.....	115
Figura 106– Taxa de radiação solar incidente [W/m ²] h, em Santa Maria/RS.....	115
Figura 107- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Santa Maria/RS.	116
Figura 108- Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Santa Maria, RS.	116
Figura 109 - Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Santa Maria, RS.	116
Figura 110 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Santa Maria, RS.	117
Figura 111- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Teresina, PI. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.	118
Figura 112-Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Teresina, PI.....	119
Figura 113- Taxa de radiação solar incidente [W/m ²] h, em Teresina/PI.	119
Figura 114- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Teresina, PI.	120
Figura 115 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Teresina, PI.	120
Figura 116- Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Teresina, PI. .	121
Figura 117 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Teresina, PI.	121

Figura 118- Planta baixa da edificação simulada.	123
Figura 119 - Zoneamento térmico da edificação simulada.	124
Figura 120- Perspectiva sudoeste da edificação simulada.	125
Figura 121 - Perspectiva nordeste da edificação simulada.....	125
Figura 122 -Detalhe da cobertura, em destaque o vão entre a telha de fibrocimento e a terça que a sustenta.....	126
Figura 123- Modelo de esquadria considerado no modelo do estudo de caso	127
Figura 124 - Configurações de paredes em <i>drywall</i> associado a placas de concreto: à esquerda, paredes externas, à direita paredes internas).	128
Figura 125 – Configuração de laje em concreto com isolante térmico.	129
Figura 126- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 24°C.	131
Figura 127- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo de caso com temperatura de fusão em 26°C.	132
Figura 128- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 31°C.	133
Figura 129- Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima em Brasília/DF.....	135
Figura 130- Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima em Brasília/DF	136
Figura 131 - Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 25°C, com destaque ao período de maior acúmulo de energia latente.	137
Figura 132- Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em <i>drywall</i> somado ao PCM na semana com temperatura máxima para Brasília/DF. Linha pontilhada em preto: limite superior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.....	137
Figura 133 - Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Brasília/DF	138
Figura 134 - Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Brasília/DF	139
Figura 135– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul	139

Figura 136-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima em Goiânia/GO. Em tracejado a divisão entre os dois períodos de condições climáticas distintas dentro do período.....	140
Figura 137- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 28°C, com destaque ao período de maior acúmulo de energia latente.	141
Figura 138 - Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em <i>drywall</i> somado ao PCM na semana com temperatura máxima para Goiânia/GO. Linha pontilhada em preto: limite superior e inferior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.	142
Figura 139-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima em Goiânia/GO	143
Figura 140- Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em <i>drywall</i> somado ao PCM na semana com temperatura mínima para Goiânia/GO. Linha pontilhada em preto: limite inferior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.....	143
Figura 141- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Goiânia/GO	144
Figura 142- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Goiânia/GO	145
Figura 143 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul dos modelos simulados com arquivo climático de Goiânia.....	146
Figura 144-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima para Santa Maria/RS.....	147
Figura 145-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima para Santa Maria/RS.....	148
Figura 146 - Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Santa Maria/RS	148
Figura 147- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Santa Maria/RS	149
Figura 148– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul	150

Figura 149-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima para Teresina/PI.....	151
Figura 150-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima para Teresina/PI.....	151
Figura 151- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI.....	152
Figura 152- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul	153
Figura 153- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul	154
Figura 154 - Frequência de temperaturas no ambiente interno (considerando apenas as horas com ocupação) de cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI.....	154
Figura 155- Frequência de temperaturas no ambiente interno (considerando todas as horas do ano) de cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI.....	155
Figura 156- Ilustração do comportamento da temperatura do ar externo (linha preta contínua), do ar interno na edificação com o PCM associado ao <i>drywall</i> (linha preta tracejada), relacionando com a zona de conforto térmico (área pontilhada) e a temperatura de fusão do PCM adotado (linha cinza contínua).	156
Figura 157- Ilustração do comportamento da temperatura do ar externo (linha preta contínua), do ar interno na edificação com o PCM associado ao <i>drywall</i> (linha preta tracejada), relacionando com a zona de conforto térmico (área pontilhada) e a temperatura de fusão do PCM adotado (linha cinza contínua).	157
Figura 158- Mapa do Brasil e suas respectivas zonas bioclimáticas, tendo em destaque a localidade, e qual o modelo de envoltória proporcionou maior conforto térmico aos usuários nos períodos nos quais a edificação estudada estava ocupada.	158
Figura 159- Tabela relacionando as zonas bioclimáticas estudadas e a porcentagem de horas de conforto térmico atingidas pelo modelo sob cada uma das configurações de envoltória.	159
Figura 160- Mapa do Brasil com destaque para a localização de cada um dos 411 arquivos climáticos considerados.	160
Figura 161- Relação dos arquivos climáticos analisados pela faixa de temperatura média do ar local.....	161

Figura 162 – Quantidade de dias com variação de temperatura de externa (Text) passando por 20 e 26°C.	162
Figura 163- Valores de temperatura operacional recomendados no ambiente interno no inverno e no verão para edifícios com sistemas de condicionamento térmico artificial com destaque a categoria ao qual a HUPP se qualifica.	163
Figura 164 - Categorias recomendadas para projeto de edifícios aquecidos e resfriados artificialmente com destaque a categoria ao qual a HUPP se qualifica.	164
Figura 165 – Correlação entre a porcentagem prevista de insatisfeitos com o ambiente térmico (PPD) e o voto médio estimado (PMV).	164
Figura 166– Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.	166
Figura 167– Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.	167
Figura 168– Diferença da quantidade de horas abaixo de 20°C entre a envoltória em <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.	167
Figura 169 - Quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C para as envoltórias em alvenaria (Caso 1), <i>drywall</i> (Caso 2) <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e <i>drywall</i> + concreto, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.	168
Figura 170- Curvas polinomiais que correlacionam a quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C com a temperatura média do ar externo para as envoltórias em alvenaria (Caso 1), <i>drywall</i> (Caso 2) <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e <i>drywall</i> + concreto.	169
Figura 171 – Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em <i>drywall</i> + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.	171

Figura 172– Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo..... 171

Figura 173 - Diferença da quantidade de horas abaixo de 20°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo..... 172

Figura 174– Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a quantidade de dias do ano em que a temperatura atravessa a faixa de 20 a 26°C de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo..... 174

Figura 175– Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a quantidade de dias do ano em que a temperatura atravessa a faixa de 20 a 26°C de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo. 174

Figura 176- Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e a envoltória em *drywall* (Caso 2). 176

Figura 177- Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e a envoltória em alvenaria (Caso 1)..... 177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vantagens e desvantagens dos PCM's orgânicos e inorgânicos.	26
Tabela 2 - Consumo de energia elétrica para resfriamento e ventilação do modelo sob diferentes condições de troca de ar.	31
Tabela 3 - Transmitância das opções de envoltórias do edifício sem PCM (W/m ² K).	31
Tabela 4 – Porcentagem e números absolutos da redução de consumo de energia elétrica com a implementação do PCM junto à envoltória para todas as cidades e tipos de edificação.	32
Tabela 5- Pico de fluxo de calor por meio da superfície com PCM [W/m ²], diferença para a superfície sem PCM [W/m ²] e percentual de redução de fluxo de calor por superfície.	33
Tabela 6 – Estudos apresentados no estado da arte e o encapsulamento do PCM.	66
Tabela 7– Estudos apresentados no estado da arte, método de estudo e de simulação do PCM.	67
Tabela 8- Desvio médio das simulações para o período de 04 a 20 de março.	68
Tabela 9 - Tipos de vedações externas para cada zona bioclimática brasileira segundo a NBR 15220.	71
Tabela 10– Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa segundo a NBR 15220.	71
Tabela 11-Limites de capacidade térmica segundo a NBR15575.	72
Tabela 12 – Padrões de ocupação diários dos ambientes de permanência prolongada	84
Tabela 13 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos ambientes de permanência prolongada.	84
Tabela 14 – Taxas metabólicas e fração radiante para os usuários.	85
Tabela 15 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível.	86
Tabela 16 – Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos ambientes de permanência prolongada.	86
Tabela 17 – Casos simulados.	88
Tabela 18- Propriedades físicas dos materiais empregados no modelo.	91

Tabela 19- Propriedades físicas das paredes empregadas no modelo.	92
Tabela 20- Propriedades físicas das coberturas empregadas no modelo.....	92
Tabela 21– Composição das paredes.....	92
Tabela 22– Composição das paredes (continuação).....	92
Tabela 23– Composição das coberturas.	93
Tabela 24 – Composição do Caso 4.	128
Tabela 25 - Propriedades físicas dos materiais empregados no modelo no Caso 4.	129
Tabela 26- Propriedades físicas das paredes empregada no modelo no Caso 4.....	129
Tabela 27- Propriedades físicas da cobertura empregada no modelo no Caso 4.	129
Tabela 28– Composição das paredes empregadas no modelo no Caso 4.	129
Tabela 29– Composição da cobertura empregadas no modelo no Caso 4.	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

HUPP Habitação unifamiliar de pequeno porte

HIS Habitação de Interesse Social

PCM *Phase Change Material*

NBR Norma Brasileira

ASHRAE *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

EPE Empresa de Pesquisa Energética

SEAD *Super-efficient Equipament and Appliance Deployment*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	SISTEMAS LEVES DE CONSTRUÇÃO	20
2.2	PCM'S: DEFINIÇÃO, TIPOS E APLICAÇÕES	23
2.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM O USO DE PHASE CHANGE MATERIAL (PCM).....	28
2.4	SIMULAÇÃO DE PCM'S NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	67
2.5	ATRASSO TÉRMICO, CAPACIDADE TÉRMICA E AS NORMAS VIGENTES NO BRASIL	69
2.6	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	72
3	MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO PILOTO	74
3.1	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA.....	74
3.1.1	Brasília	74
3.1.2	Goiânia.....	78
3.1.3	Síntese da caracterização climática.....	82
3.2	DEFINIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	82
3.2.1	Geometria do modelo	83
3.2.2	Cargas térmicas internas	83
3.2.3	Regime de ventilação	86
3.2.4	Casos estudados	87
3.2.5	Configurações de envoltória do estudo piloto	88

3.2.6	Transferência de calor com o solo	90
3.2.7	Materiais construtivos	91
3.2.7.1	<i>PCM utilizado</i>	93
3.2.8	Simulação computacional do PCM no <i>EnergyPlus</i>	95
3.3	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO RESULTADO	96
3.3.1	Perfil de temperatura nas semanas de pico de frio e de calor	96
3.3.2	Frequência de amplitudes térmicas diárias	97
3.3.3	Balanco térmico	97
3.3.4	Horas de desconforto por frio e calor	97
3.3.5	Frequência de ocorrência de temperaturas	98
4	RESULTADOS DO ESTUDO PILOTO	99
4.1	RESULTADOS PARA BRASÍLIA	99
4.2	RESULTADOS PARA GOIÂNIA	106
4.3	SÍNTESE DOS RESULTADOS	111
5	MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	113
5.1	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA COMPLEMENTAR.....	113
5.1.1	Santa Maria	114
5.1.2	Teresina	117
5.2	DEFINIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	122
5.2.1	Geometria do modelo	123
5.2.2	Cargas Térmicas internas	126
5.2.3	Regime de ventilação	126
5.2.4	Regime de proteção solar em esquadrias	126
5.2.5	Casos estudados	127
5.2.6	Configurações de envoltória do estudo de caso	128
5.2.7	Materiais construtivos	129
5.2.7.1	<i>PCM's utilizados nos Estudos de Caso</i>	130

5.3	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	133
6	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO	134
6.1	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM BRASÍLIA	134
6.2	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA.....	140
6.3	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM SANTA MARIA	146
6.4	RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM TERESINA	150
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ESTUDO DE CASO.....	155
7	PCM NO CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO	160
7.1	PANORAMA GERAL DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS CONSIDERADAS 160	
7.2	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS NO CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO.....	163
7.3	RESULTADOS PARA O CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO	165
7.3.1	Características térmicas: explorando a temperatura de mudança de fase dos PCM's	165
7.3.2	Integração do drywall com PCM: explorando o potencial para aplicações termorreguladoras.....	168
7.3.3	Considerações finais	178
8	CONCLUSÕES.....	181
8.1	POTENCIALIDADES DO TRABALHO	182
8.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	183
8.3	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	183
	APÊNDICE A	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A rápida e crescente urbanização, impulsionada pela industrialização ocorrida, principalmente, nos últimos cem anos no Brasil, tem gerado, nesse mesmo período, uma grande demanda por espaços edificados, e com isso vem-se aumentando o impacto destes no meio ambiente, seja de forma direta ou indireta.

Hoje as edificações são responsáveis por cerca de 43% do consumo de energia elétrica total no Brasil, sendo o setor residencial responsável por praticamente metade desta parcela (EPE, 2019), cujo percentual vem crescendo nos últimos anos, em parte por causa da utilização de aparelhos de ar-condicionado.

No ano de 2005, tal tipo de aparelho era responsável por 20% do consumo médio de energia em residências no Brasil (ELETROBRÁS, 2009). No ano de 2010 estimava-se que 20% das residências possuíam o equipamento e que esse número chegaria a 24% das residências até 2019 (EPE, 2010).

Segundo a SEAD (2013), o Brasil é um dos maiores consumidores mundiais de aparelhos de ar condicionado, ocupando a 5ª colocação no ranking de maiores compradores do equipamento. Fenômenos como as ondas de calor, observadas em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil nos últimos anos, assim como a formação de ilhas de calor em áreas densamente urbanizadas, provocam uma demanda ainda maior do uso do aparelho (SANTAMOURIS et al., 2007).

Apesar de, no Brasil, ser predominante o uso de fontes “limpas” de energia para a obtenção de eletricidade, tal como a hidráulica, segundo EPE (2019), na última década houve aumento no uso de fontes com maior emissão de gases de efeito estufa, como derivados do petróleo e outros combustíveis fósseis, para a obtenção de eletricidade.

A crescente demanda por energia, somada ao impacto ambiental provocado para a obtenção da mesma, revela a necessidade de ampliar as pesquisas quanto à promoção de estratégias passivas de condicionamento térmico na construção civil.

Tal necessidade se apresenta ainda mais urgente quando se trata de habitação unifamiliar de pequeno porte (HUPP), uma vez que esta tipologia arquitetônica geralmente atende à população com menor poder aquisitivo, podendo, o consumo de energia elétrica, comprometer grande parte da renda dessas pessoas (GELLER, 2003). Estes estudos se fazem

ainda mais fundamentais, uma vez que os valores do déficit habitacional brasileiro ainda são bastante elevados, apresentando, no ano de 2015, saldo negativo de 6.185.503 unidades (IBGE, 2016).

Sistemas leves de construção são uma possibilidade para diminuir esta demanda de forma mais ágil, uma vez que exige menor tempo de execução se comparada com a alvenaria, tradicionalmente utilizada no Brasil, cujo processo de execução é artesanal e que representa aproximadamente 95% das vedações verticais em residências (IBGE, 2016). Cabe ressaltar também, que essa tecnologia construtiva é responsável por menor geração de resíduos e maior viabilidade técnica para destinação após o uso, além de promover maior segurança no canteiro de obras e no custo de execução.

Apesar de nas últimas décadas a adoção de sistemas leves e industrializados de construção civil ter se intensificado, tais sistemas ainda não são utilizados em larga escala, tendo como uma das principais razões, o fato de os materiais utilizados em suas composições não possuírem as propriedades térmicas recomendadas por normas como a NBR 15220 (ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT, 2021).

A pouca inércia térmica de sistemas leves de construção contribui para uma maior amplitude térmica diária no ambiente interno, podendo, este, apresentar temperaturas extremas. Uma solução para ampliar a inércia térmica nesses sistemas pode ser a utilização de Materiais de Mudança de fase, ou também chamados *Phase Change Material* (PCM), incorporados às vedações de edificações.

PCM's atuam como armazenadores de calor (estocagem de calor latente), com uma capacidade de armazenamento térmico por unidade de volume significativamente maior do que ocorre nos materiais convencionais (KALNÆS; JELLE, 2015). Tal característica do material, contribui para uma redução das flutuações de temperatura, quando aplicado junto a vedação, atuando, assim, como elemento passivo para condicionamento ambiental. (BRITO et.al, 2017).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é identificar o impacto do uso de PCM's nas condições térmicas internas em HUPP em sistema de construção leve nas condições climáticas brasileiras que requerem maior inércia térmica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que seja atingido o objetivo geral, é necessário que os objetivos específicos, listados abaixo, sejam alcançados:

1. Identificar, por meio de revisão bibliográfica, condicionantes climáticas, construtivas, ou de uso, nas quais o PCM é benéfico às condições térmicas internas de edificações;
2. Avaliar quais materiais são mais recomendados a serem adotados no território brasileiro, levando em conta seu desempenho térmico junto com sistema de construção leve;
3. Avaliar as características do PCM mais adequadas para o clima brasileiro;
4. Estabelecer indicadores de desempenho e quantificar a melhoria no desempenho proporcionada pelo PCM.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos a serem adotados nesta pesquisa se configuram em etapas que são executadas em sequência (Figura 1).

Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica tendo como finalidade expor as vantagens na adoção de sistemas leves de construção, apresentar um breve histórico da utilização de PCM's, explorar o estado da arte no que se refere ao estudo do material, abordar a simulação computacional do material e analisar criticamente as normativas nacionais quanto à potencialidade de sua utilização. A partir disso, são apresentadas condicionantes climáticas, construtivas, e de uso nas quais o PCM pode ser benéfico às condições térmicas internas de edificações.

Em seguida foi elaborado o estudo piloto, com o intuito de testar a ferramenta de simulação, extrair indicadores de desempenho e definir estratégias de ventilação natural e que consistiu na simulação computacional de um modelo simplificado no *EnergyPlus 9.2* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019) nas zonas bioclimáticas brasileiras cujas condições fossem favoráveis a adoção de vedações com maior capacidade térmica.

Uma vez obtidos os resultados do estudo piloto, foram feitas as análises destes, estabelecendo assim os parâmetros e novas condições climáticas a serem abordados nas simulações do estudo de caso.

Na etapa seguinte, os estudos de casos foram definidos com o intuito de gerar um modelo virtual detalhado a ser simulado, sendo configurado de forma a buscar a maior fidelidade possível com a formatação de uma HUPP. Nesta etapa também foram apresentadas novas condições climáticas nas quais o material apresentaria benefícios de acordo com os resultados do estudo piloto.

Logo após, foram feitas as simulações computacionais, que consistiram no estudo sobre um modelo de edificação, dentro das mesmas condições climáticas abordadas no estudo piloto somadas à novas condições climáticas. O modelo de edificação adotado no estudo de caso foi considerado naturalmente ventilado, com envoltória em alvenaria, cujas propriedades térmicas atendem as normas nacionais, em sistema de construção leve com e sem PCM. Variou-se a temperatura de fusão do material de acordo com as condições climáticas às quais o modelo estava exposto. Como modelo de referência, simulou-se um sistema leve com vedações em concreto com espessura igual à da placa de gesso somado ao PCM, presente no caso anterior.

A partir dos dados obtidos na etapa anterior, foi realizada a análise dos resultados com o intuito de identificar o impacto de PCM no desempenho térmico da HUPP's.

Em seguida são feitas simulações do mesmo modelo da etapa anterior, desta vez considerando 411 municípios brasileiros representando cada uma das regiões brasileiras, que são analisados na sequência.

Por fim são feitas as conclusões, objetivando apresentar, de forma sucinta, o impacto no uso do PCM em HUPP's. nas condições climáticas brasileiras consideradas potenciais à sua implementação, as potencialidades e as limitações do trabalho, assim como as recomendações para futuros trabalhos.

Figura 1 – Procedimentos metodológicos.

INTRODUÇÃO				
Problematização e justificativa				
Objetivos				
Procedimentos metodológicos				
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA				
Sistemas leves de construção				
PCM's: definição, tipos e aplicações				
Comportamento térmico de edificações com o uso de phase change material (PCM)				
Simulação de PCM's na construção civil				
Atraso térmico, capacidade térmica e as normas vigentes no Brasil				
MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDO PILOTO				
Caracterização climática				
Brasília		Goiânia		Síntese da caracterização climática
Definição do modelo computacional				
Geometria do modelo	Cargas térmicas internas	Regime de ventilação	Casos estudados	Configurações de envoltória do estudo piloto
Transferência de calor com o solo		Materiais construtivos		
Método de avaliação dos resultados				
Perfil de temperatura nas semanas de pico de frio e de calor		Frequência de amplitudes térmicas diárias		Balanço térmico
Horas de desconforto por frio e calor		Frequência de ocorrência de temperaturas		
RESULTADOS DO ESTUDO PILOTO				
Resultados para Brasília				
Resultados para Goiânia				
Síntese dos resultados				
MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE CASO				
Caracterização climática (cidades incluídas após o estudo piloto)				
Santa Maria			Teresina	
Definição do modelo computacional				
Geometria do modelo	Cargas térmicas internas	Regime de ventilação	Regime de proteção solar em esquadrias	Configurações de envoltória do estudo de Caso
Casos estudados	Transferência de calor com o solo	Materiais construtivos		
Método de avaliação dos resultados				
RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO				
Resultados do estudo de caso em Brasília				
Resultados do estudo de caso em Goiânia				
Resultados do estudo de caso em Santa Maria				
Resultados do estudo de caso em Teresina				
Considerações finais				
PCM NO CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO				
Panorama geral das condições climáticas consideradas				
Método de avaliação dos estudos no contexto climático brasileiro				
Resultados para o contexto climático brasileiro				
Características térmicas - explorando a temperatura de mudança de fase dos PCM's				
Integração do drywall com PCM: explorando o potencial para aplicações termorreguladoras				
Considerações finais				
CONCLUSÕES				
Potencialidades do trabalho				
Limitações do trabalho				
Recomendações para futuros trabalhos				

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS LEVES DE CONSTRUÇÃO

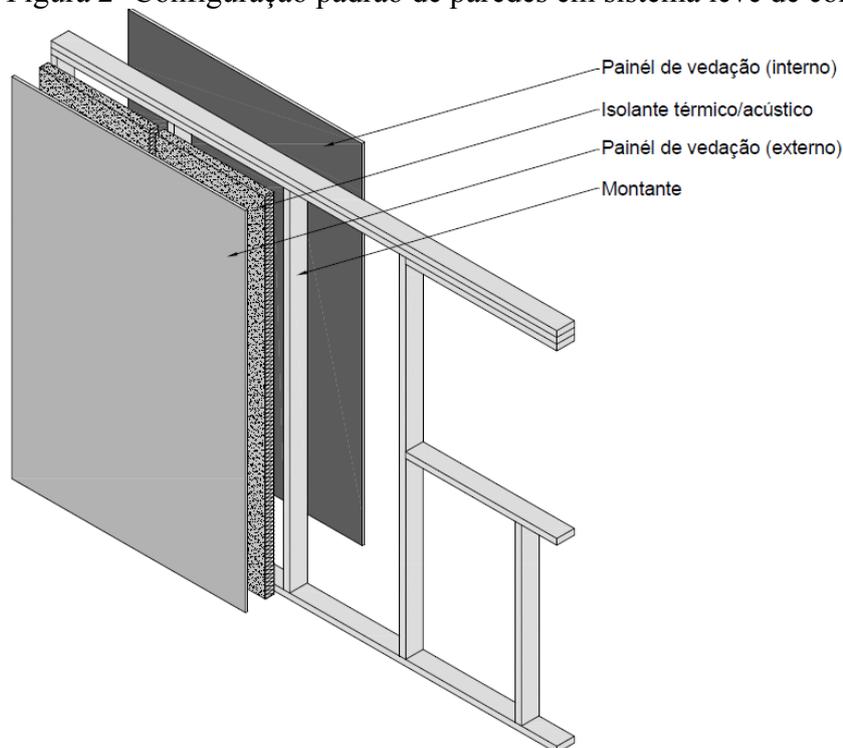
Sistemas leves de construção, também chamados de *drywall*, podem ser definidos como sistemas construtivos a seco, que dispensam o uso da água no processo de montagem em canteiro de obra, cuja execução se dá a partir de componentes pré-fabricados, e feito sob uma determinada modulação.

Os perfis estruturais, geralmente em metal (*light steel frame-LSF*) ou madeira (*light wood frame-LWF*), compõem uma trama intertravada de montantes que fazem a sustentação da vedação, assim como da edificação como um todo (CHING, 2015).

Os elementos de vedação usualmente adotados são painéis leves tais como placas de fibrocimento, madeira (OSB, madeira compensada ou madeira tratada) e gesso, acompanhados ou não de outros agregados.

Além desses elementos são introduzidos, frequentemente, isolantes térmicos e acústicos para gerar um aumento de resistência térmica e na atenuação acústica das paredes (Figura 2).

Figura 2- Configuração padrão de paredes em sistema leve de construção.



Fonte: do autor

A reunião de todos esses elementos na composição dos Sistemas Leves de Construção, que por serem industrializados e modulares, e uma vez que haja uma correta transmissão de informações, desde a concepção a execução do projeto, resultam em uma edificação com menor desperdício de materiais, maior produtividade e mais rápida execução se comparada aos sistemas construtivos artesanais, tradicionalmente utilizados no Brasil (RIBEIRO e MICHALKA, 2003).

Quando se compara a produtividade do setor da construção civil do Brasil com o mesmo setor nos Estados Unidos (Figura 3), no qual a adoção de sistemas leves de construção é amplamente adotada, as vantagens da adoção deste modelo construtivo se mostram de forma bastante clara, visto que o ramo da construção civil em nosso país só apresentava até o ano de 2013, pouco mais de 20% da produtividade do país usado como referência (GONÇALVES, 2015).

Figura 3 – Diferença de produtividade do setor de construção civil tendo como base o setor nos EUA.

	2003	2013
Espanha	68,3	105,6
França	100,2	104,7
Estados Unidos	100,0	100,0
Holanda	96,2	98,3
Reino Unido	97,5	96,7
Suécia	87,2	94,7
Canadá	80,9	78,9
Alemanha	72,3	78,7
Austrália	76,4	75,2
Itália	80,7	74,5
Coreia do Sul	61,8	67,7
Japão	57,7	57,8
Índia	27,9	42,1
Portugal	36,8	37,2
Rússia	26,2	26,3
México	25,4	22,9
Brasil	18,1	20,3
China	7,8	15,1

Fonte: GONÇALVES, 2015

Além da vantagem em produtividade, os sistemas leves de construção apresentam (como sua denominação sugere) baixa massa aparente se comparada com sistemas tradicionalmente utilizados no Brasil. Como pode-se verificar na Figura 4, os sistemas leves representam, se comparado aos sistemas construtivos tradicionais, valores muito inferiores, variando de cerca de 7% a 39% do peso dos sistemas tradicionais em alvenaria (SINDUSCON, 2015), o que reduz os gastos com o sistema estrutural da edificação.

Figura 4- Comparativo de massa aproximada entre sistemas construtivos tradicionalmente utilizados no Brasil e do sistema leve de construção (*Drywall*).

Tipo de parede	Espessura da vedação/especificação da parede	Massa aproximada
Blocos vazados de concreto com argamassa	12 cm	180 kg/m ²
	14,5 cm	210 kg/m ²
	17 cm	230 kg/m ²
Blocos vazados de cerâmica com argamassa	12 cm	120 kg/m ²
	14,5 cm	150 kg/m ²
	17 cm	180 kg/m ²
Tijolos maciços de barro cozido com argamassa sem revestimento	15 cm	260 kg/m ²
	19 cm	320 kg/m ²
<i>Drywall</i> sem revestimento	2 chapas + lã de vidro	22 kg/m ²
	4 chapas	44 kg/m ²
	4 chapas + lã de vidro	46 kg/m ²

Fonte: do autor, adaptado de SINDUSCON, 2015

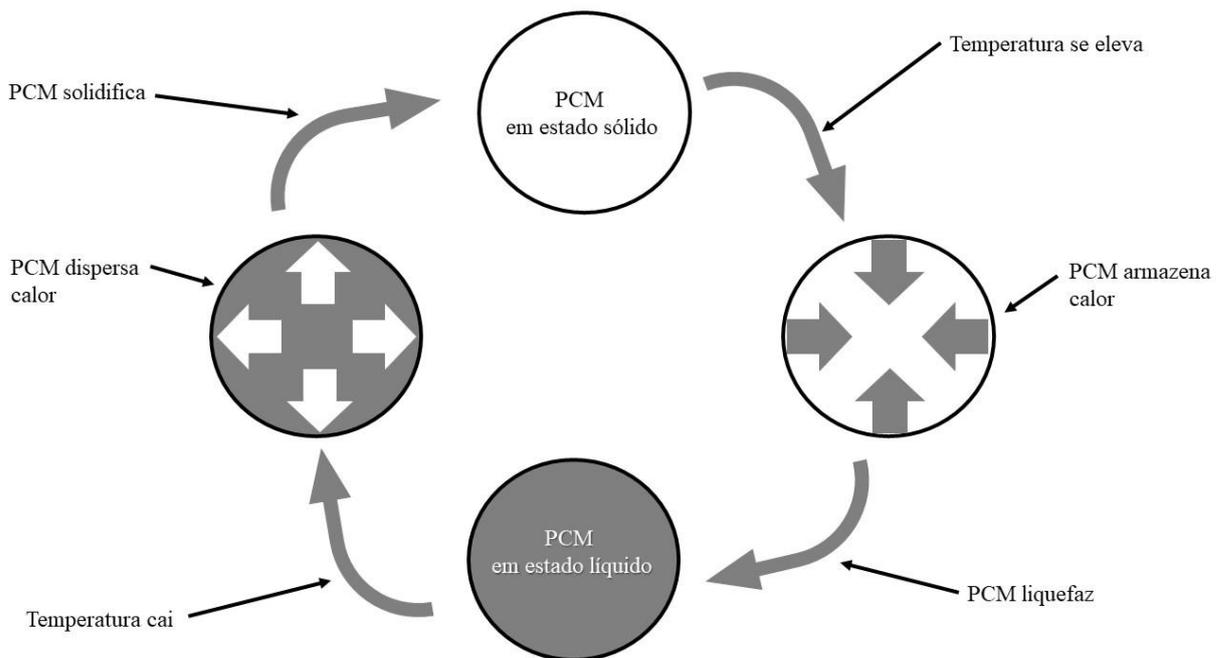
Apesar de todos os aspectos positivos apresentados anteriormente, quanto à adoção de sistemas leves de construção, o sistema construtivo ainda é pouco utilizado no Brasil, correspondendo à valores inferiores à 5% das edificações habitacionais (IBGE, 2016).

Estes sistemas construtivos têm como um dos maiores entraves quanto à sua adoção no Brasil, a sua baixa inércia térmica, o que lhes confere, quando associada à ambientes naturalmente ventilados, a ocorrência de uma maior amplitude térmica diária interna, podendo, em condições climáticas com maior variação de temperaturas, apresentar maior ocorrência de condições de desconforto térmico.

2.2 PCM'S: DEFINIÇÃO, TIPOS E APLICAÇÕES

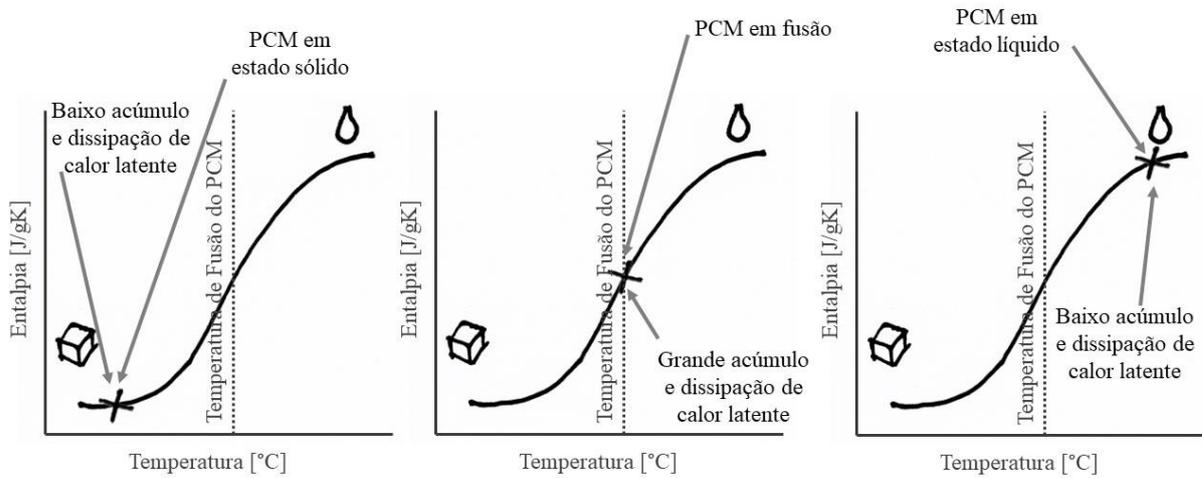
PCM's atuam como armazenadores de calor (estocagem de calor latente), sofrendo mudanças cíclicas de estado quando expostos a determinadas condições ambientais, absorvendo ou dissipando grande quantidade de calor (Figura 5 e Figura 6). Isso lhes garante uma capacidade de armazenamento térmico por unidade de volume significativamente maior do que ocorre nos materiais convencionais (KALNÆS; JELLE, 2015). Nos intervalos entre suas mudanças de fase, estes materiais têm comportamento similar ao de materiais convencionais, entretanto, nos momentos em que ocorrem as mudanças de fase, estes absorvem ou dissipam quantidades mais significativas de calor latente, mantendo sua temperatura constante, atuando, assim, como elemento passivo para condicionamento ambiental. (BRITO et.al, 2017).

Figura 5- Ilustração do ciclo de trocas de fase e ganho/ perda de calor latente de um PCM.



Fonte: do autor

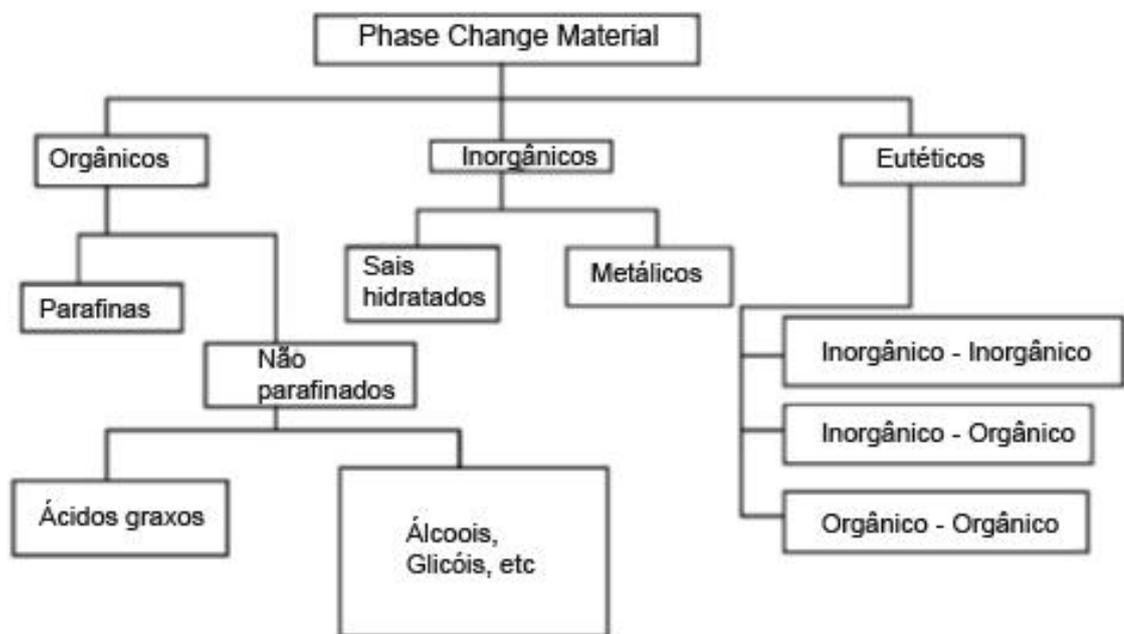
Figura 6- Ilustração da curva de entalpia de um PCM.



Fonte: do autor

De acordo com KALNÆS e JELLE (2015), há uma grande diversidade de PCM's disponíveis no mercado, podendo assim, ser divididos em categorias conforme a Figura 7.

Figura 7- Categorização geral dos PCM's



Fonte: Kalnæs e Jelle (2015).

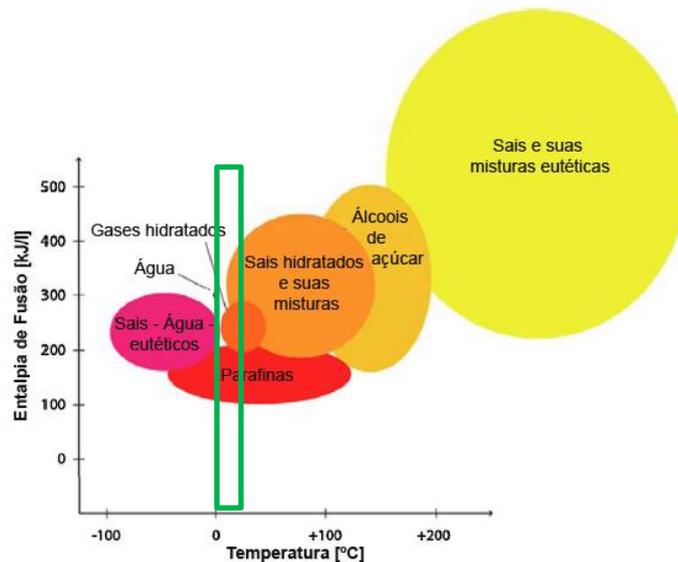
Para um bom desempenho térmico, a escolha de um PCM deve apresentar propriedades tais como (SCHÖDER E GAWRON apud KALNÆS; JELLE, 2015):

- a) Alta capacidade de estocagem de calor no período de fusão em pouco volume e peso;
- b) Alto calor específico;
- c) Adequada temperatura de fusão para a aplicação (para que sejam mais eficientes, os PCMs devem ser escolhidos de acordo com o clima no qual é aplicado em uma dada edificação);
- d) Estabilidade química e baixa taxa de corrosão;
- e) Não serem perigosos ou venenosos;
- f) Baixa pressão de vapor na temperatura de operação;
- g) Baixa inflamabilidade;
- h) Baixo grau de super-resfriamento e de cristalização;
- i) Baixa mudança de volume na solidificação;
- j) Alta condutividade térmica, o que contribui na dispersão ou absorção de calor;
- k) Disponibilidade e baixo custo;

Difícilmente, um PCM vai responder de forma satisfatória a todas estas propriedades. Sendo assim, o requisito primordial para a escolha do material é a temperatura de fusão adequada ao clima ao qual será submetido. Kauranen, Peippo e Lund (1991) apresentam que a temperatura de fusão ideal do PCM é de 1 a 3 °C acima da temperatura média do ambiente sem esse material, para que este venha a desempenhar de forma satisfatória o seu ciclo completo e atuar de forma eficaz na melhoria do desempenho térmico da edificação.

Apesar da grande variedade de PCM's, somente uma parte deles é aplicável à construção civil com o intuito de se aumentar a inércia térmica devido à sua temperatura de fusão. Dentre os materiais orgânicos, as parafinas são as que apresentam maior aplicabilidade, enquanto dentre os materiais inorgânicos, são os sais hidratados e hidratos de gás (Figura 8) (KALNÆS; JELLE, 2015). Cada um destes tem suas vantagens e desvantagens, conforme a Tabela 1.

Figura 8- Temperatura de fusão x entalpia de fusão, com destaque para os PCM's aplicáveis na construção civil para aumento de inércia térmica devido sua temperatura de fusão.



Fonte: Kalnæs e Jelle (2015).

Tabela 1- Vantagens e desvantagens dos PCM's orgânicos e inorgânicos.

Orgânicos		Inorgânicos	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Anti-super-resfriamento - Anti-segregação de fase - Baixa pressão de vapor - Grande variedade de temperaturas - Auto-nucleação - Compatível com materiais de construção convencionais - Quimicamente estável - Reciclável - Alto calor de fusão 	<ul style="list-style-type: none"> - Inflamável - Baixa condutividade térmica - Baixa capacidade de estocagem de calor latente 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande capacidade de estocagem de calor latente - Maior condutividade térmica do que PCM's orgânicos - Baixo custo - Não inflamável - Mudança de fase acentuada 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosivo à metais - Super-resfriamento - Segregação de fase - Fusão congruente - grande mudança de volume

Fonte: Kalnæs e Jelle (2015).

Como pode-se verificar na Tabela 1, dentre as duas categorias de PCM que não consideram a mistura de diferentes materiais (que podem gerar maior segregação em seu ciclo), os orgânicos são aqueles que apresentam mais vantagens. Dentre as vantagens, cabe ressaltar a não segregação do material, que permite um bom desempenho após cada ciclo de troca de fase, a baixa pressão de vapor, que inibe o risco de rompimento das cápsulas, assim como a compatibilidade com materiais de construção convencionais. Como desvantagens, pode-se destacar principalmente a baixa condutividade térmica e a baixa capacidade de estocagem de calor latente (KALNÆS; JELLE, 2015).

Já os materiais inorgânicos apresentam como principais vantagens a alta condutividade térmica, que permite que o calor armazenado nestes se dissipe mais rapidamente pelo ambiente quando há um retorno ao seu estado físico original, assim como seu baixo custo. A principal desvantagem dessa categoria de PCM é a grande mudança de volume devido a mudança de fase, o que pode vir a causar patologias na construção e a segregação do PCM (KALNÆS; JELLE, 2015).

Na construção civil, os PCM's podem ser aplicados de diversas formas, seja para estocar calor latente, auxiliando na eficiência energética de sistemas de ar condicionado; ou para estocar calor latente em envoltórias (paredes) assim como em esquadrias, agindo como um sistema passivo de condicionamento térmico, aumentando a inércia térmica, podendo assim, contribuir com a redução de amplitude térmica de ambientes internos, o que, por sua vez pode proporcionar maior conforto térmico ao usuário. Neste caso, o material se liquefaz durante o período mais quente do dia, armazenando calor latente, e se solidifica no período mais frio, liberando o calor armazenado. (KALNÆS; JELLE, 2015).

Em envoltórias de edificações, os PCM's podem ser aplicados em paredes, coberturas, pisos e janelas, sendo estes incorporados a elementos construtivos, tais como painéis de gesso ou concreto, quando microencapsulados, ou aplicado de forma autônoma, quando macroencapsulados.

PCM's macroencapsulados, que geralmente aparecem sob a forma de painéis, tijolos, lajes, lâminas, bolsas, esferas e tubos, correspondem a materiais encapsulados em uma espessura entre 1mm e 10mm. Os microencapsulados correspondem aos materiais encapsulados em espessuras inferiores à 1mm (LIU et. al, 2018).

Dentre as vantagens do macroencapsulamento de PCM é a possibilidade de utilização de cápsulas pré-fabricadas com PCM's orgânicos e inorgânicos, além da flexibilidade em tamanhos e formas, maior estabilidade mecânica, e produção mais simples, o que reduz os custos. Dentre as desvantagens estão a redução da transferência de calor, a solidificação e fusão heterogênia do PCM, sendo mais propenso a patologias em obras e reformas (LIU et. al, 2018).

Para amenizar essas desvantagens do macroencapsulamento, pode-se proporcionar uma maior homogeneização da fusão por meio da adição de materiais de alta condutividade térmica dentro da cápsula, tais como: partículas de grafite, grafite composto, flocos de grafite, anéis metálicos, espuma de cobre, malha de metal, malha de cobre, fibra de carbono, lascas de fibra de carbono. Há, no entanto, uma desvantagem ao se adotar tal estratégia: reduzir a capacidade de estocar calor do componente (LIU et. al, 2018).

O microencapsulamento, por sua vez, apresenta como vantagens, uma maior transferência de calor e solidificação mais homogênea do PCM. Como desvantagens, há impossibilidade da adoção deste junto a um PCM inorgânico, além do custo mais elevado, devido à sua produção mais elaborada (LIU et. al, 2018).

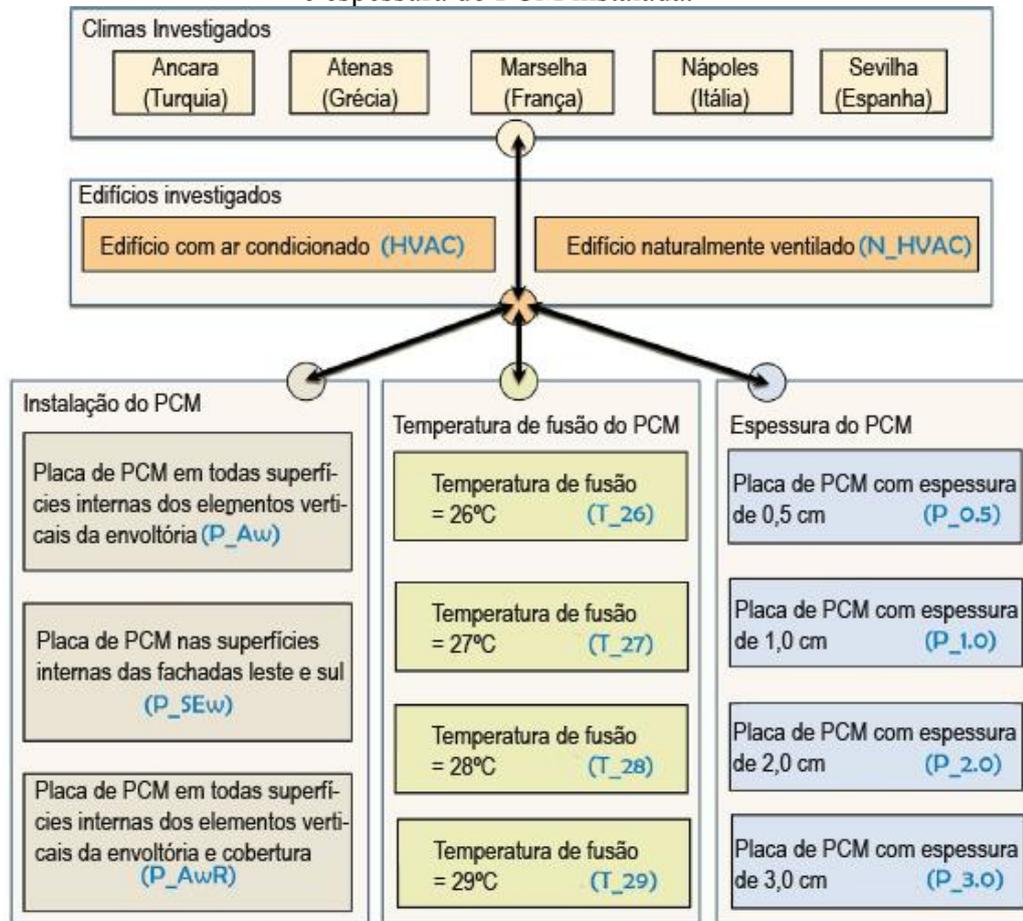
2.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM O USO DE PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)

Em diversos países do mundo, e sob diversas condições climáticas, vêm se estudando os efeitos da utilização de PCM's aplicados na envoltória de edificações. Em grande parte destes estudos, comprova-se que o uso deste tipo de material é benéfico às condições térmicas de edificações.

Ascione et. al (2014) investigaram, por meio de simulações computacionais no software *EnergyPlus*, como o uso de PCM's poderia contribuir na redução da demanda de resfriamento, assim como no aumento de conforto térmico de edifícios de escritórios em climas mediterrâneos (Sevilha, na Espanha; Marselha, na França; Atenas, na Grécia; Nápoles, na Itália; e Ankara, na Turquia) durante o período mais quente do ano.

No estudo, também foram testadas diferentes espessuras, temperaturas de fusão e posicionamentos do PCM, conforme a Figura 9.

Figura 9- Climas analisados, tipologias de construção, posicionamento, temperaturas de fusão e espessura do PCM instalada.

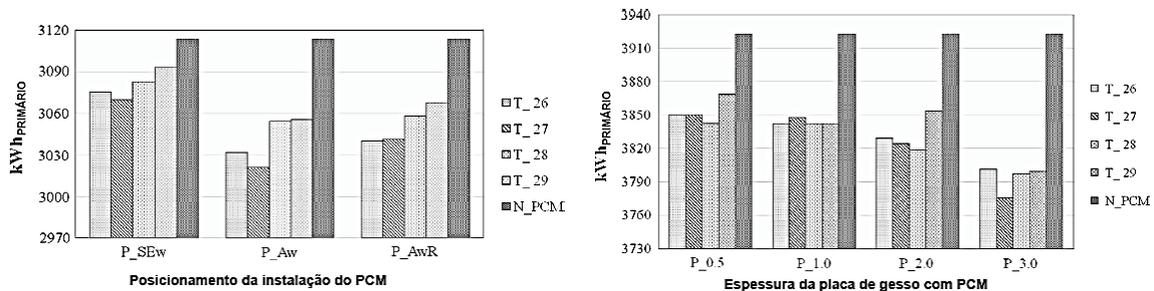


Fonte: Ascione et. al (2014).

Os resultados apontaram uma redução na demanda por resfriamento com a utilização do PCM da envoltória, sobretudo quando o material foi aplicado em maiores espessuras, com ponto de fusão adequado e na face interna das vedações da edificação. As condições climáticas nas quais foram constatados os resultados mais relevantes quanto aos benefícios trazidos pela adoção do material, foram as da cidade de Ankara, na Turquia, cujo clima apresenta maiores amplitudes térmicas diárias dentre as localidades estudadas.

Também foi possível verificar que o PCM adotado em todas as paredes e com espessura de 3 cm, sendo esta a maior estudada, a com maior redução de consumo energético (Figura 4). A adoção do material no forro não se mostrou interessante, uma vez que este está na maior parte do tempo em estado líquido, não contribuindo assim para o armazenamento de calor.

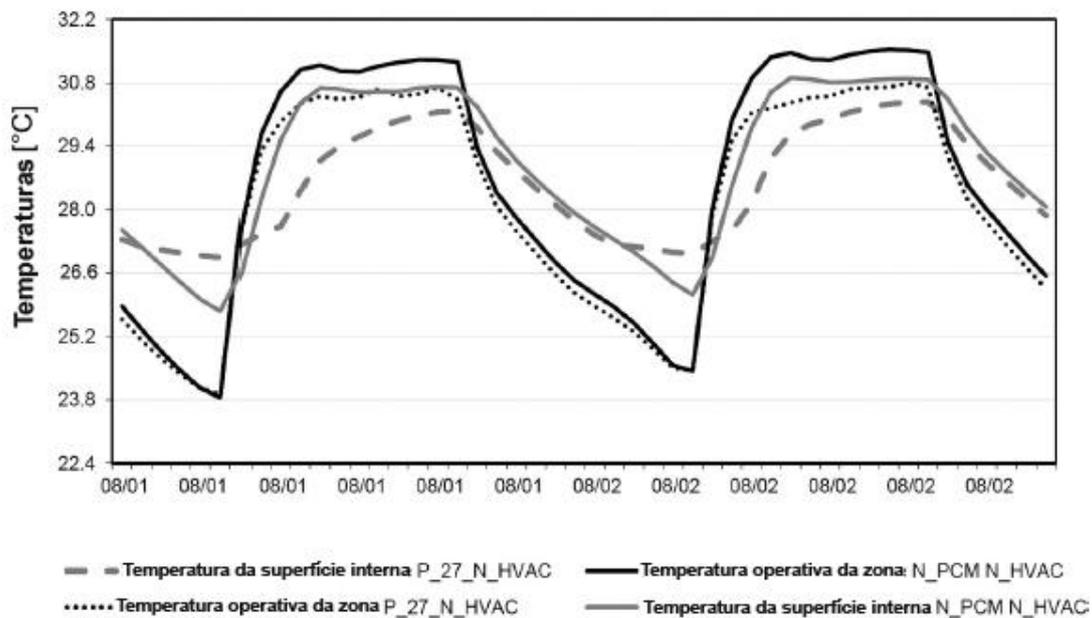
Figura 10- a) Impacto de diferentes configurações do PCM na demanda de energia de refrigeração em julho em Ancara, Turquia. b) Efeito de diferentes espessuras de PCM na demanda de energia de refrigeração em julho em Marselha, França.



Fonte: Ascione et. al (2014).

As temperaturas de fusão ideais variaram de acordo com o clima, e em todos eles o PCM contribuiu para a redução de amplitude térmica em modelos naturalmente ventilados, resultando em temperaturas dentro da faixa de conforto térmico (24-28°C) (Figura 11).

Figura 11- Perfil de temperatura do modelo naturalmente ventilado durante dois dias típicos de verão na cidade de Ancara, Turquia. Comparativo de temperaturas operativas internas e da superfícies internas das opções com placa de 3cm de espessura de PCM com temperatura de fusão de 27°C, e de modelo sem PCM.



Fonte: Ascione et. al (2014).

Solgi, Fayaz e Kari (2016) calcularam, no software *EnergyPlus 8.1*, o consumo energético para resfriamento em conjunto com a ventilação mecânica noturna de um edifício

típico de escritórios com vedações em sistema de construção leve, com e sem PCM (parafina orgânica) no clima quente e árido de Yazd, no Irã.

Foram estudadas duas temperaturas diferentes de fusão do PCM (27°C e 29°C), assim como diversas rotinas de troca de ar por hora (ach) por meio de um ventilador, variando de 0 a 30 ach.

Comprovou-se que a utilização do PCM, com ponto de fusão a 27°C, em conjunto da ventilação noturna de 15 ach possibilita redução de quase 47% na energia de refrigeração do sistema de ar condicionado (Tabela 2). Cabe ressaltar que uma maior troca de ar por meio da ventilação acarretou em um menor consumo de energia para o sistema de ar condicionado, no entanto um maior consumo energético se somados este sistema com o de ventilação mecânica, o que fez com que o sistema perdesse eficácia em reduzir o consumo energético.

Tabela 2 - Consumo de energia elétrica para resfriamento e ventilação do modelo sob diferentes condições de troca de ar.

Temperatura de set-point 28°C			
Trocas de ar por hora	Consumo de energia elétrica para resfriamento (kW)	Consumo de energia elétrica para ventilação (kW)	Consumo Total de energia elétrica (kW)
0 ach	257.26	–	257.26
5 ach	216.09	4.36	220.45
10 ach	201.62	8.49	210.11
15 ach	195.44	12.54	207.98
20 ach	192.94	16.55	209.49
25 ach	192.47	20.53	213.00
30 ach	193.18	24.5	217.68

Fonte: Solgi, Fayaz e Kari (2016).

Karaoulis (2017) investigou e comparou o consumo energético de um edifício de escritórios, com sistemas construtivos convencionais, com e sem isolamento térmico, e leve isolado com e sem PCM com temperatura de fusão a 29°C (Tabela 3), nas condições climáticas de Thessaloniki, Atenas e Heraklion, na Grécia.

Tabela 3 - Transmitância das opções de envoltórias do edifício sem PCM (W/m²K).

Componente do edifício	Tipo de edifício		
	Convencional sem isolamento térmico	Convencional com isolamento térmico	Leve com isolamento térmico
Parede externa	1,440	0,471	0,311
Parede interna	1,992	1,992	0,305
Cobertura	1,457	0,372	0,372
Piso	1,526	0,484	0,484
Vidros	2,725	2,725	2,725

Fonte: Karaoulis (2017)

Foi comprovado que as maiores economias de energia para resfriamento foram atingidas quando o PCM foi adotado no forro e não nas paredes internas ou externas e que a ventilação natural noturna, combinada ao uso de PCM, apresentam os melhores resultados. O sistema convencional em conjunto com 5 cm de isolante foi o sistema construtivo que apresentou maior melhora com a adoção do PCM (Tabela 4).

Tabela 4 – Porcentagem e números absolutos da redução de consumo de energia elétrica com a implementação do PCM junto à envoltória para todas as cidades e tipos de edificação.

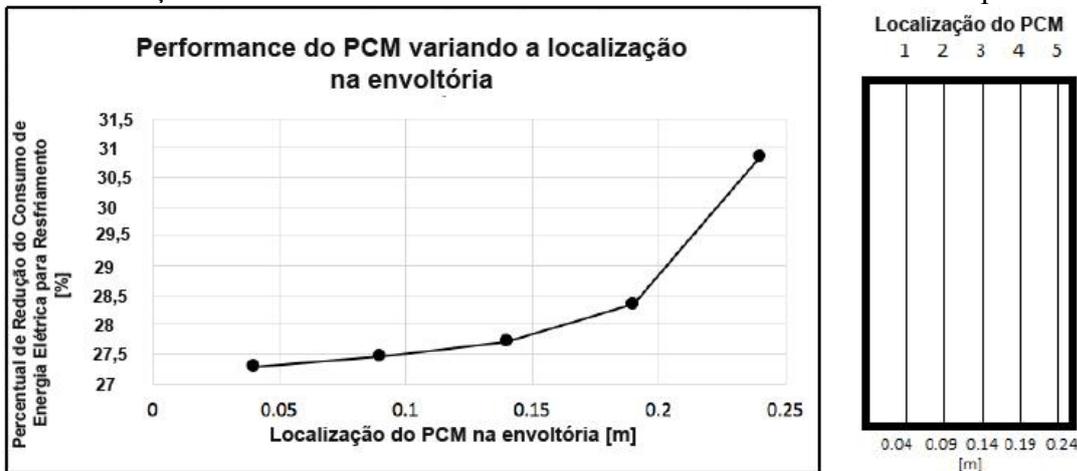
Cidade / $\Delta \zeta \% - \Delta \zeta $ (KWh/m ²)	Tipo de edificação		
	Convencional sem isolamento térmico	Convencional com isolamento térmico	Leve com isolamento térmico
Thessaloniki			
Redução do consumo de energia para resfriamento em %	4,74	5,07	4,73
Redução absoluta do consumo de energia para resfriamento	2,80	3,15	2,89
Atenas			
Redução do consumo de energia para resfriamento em %	4,70	5,05	4,64
Redução absoluta do consumo de energia para resfriamento	3,65	4,17	3,75
Heraklion			
Redução do consumo de energia para resfriamento em %	4,34	4,55	4,17
Redução absoluta do consumo de energia para resfriamento	3,79	4,18	3,77

Fonte: Karaoulis (2017)

Ferster et. al (2017) demonstraram que o menor consumo para resfriamento, nas condições climáticas de Kingsville, Texas (quente e seco), ocorre quando o PCM adotado tem temperatura de fusão em 25°C, assim como quando este é posicionado na parte interna da parede, gerando uma redução de 31% no consumo de energia para resfriamento (Figura 12). Os autores comprovaram também que o PCM é bastante eficaz na redução de pico de fluxo de calor quando utilizado junto ao forro, alcançando 87% de redução (Tabela 5).

O estudo visou apresentar como o PCM pode ser utilizado de forma mais otimizada quanto à redução de consumo de energia para resfriamento e do fluxo de calor em uma edificação residencial, usando como ferramenta de Simulação o EnergyPlus, variando a localização do PCM na parede ou orientação, assim como as temperaturas de fusão.

Figura 12- a) Desempenho do PCM variando a localização na envoltória; b) variação da localização do PCM na envoltória em ordem crescente do meio externo para o interno.



Fonte: Ferster et. al (2017)

Tabela 5- Pico de fluxo de calor por meio da superfície com PCM [W/m^2], diferença para a superfície sem PCM [W/m^2] e percentual de redução de fluxo de calor por superfície.

	Norte	Sul	Leste	Oeste	Forro
Pico de Fluxo de calor por meio da superfície com PCM [W/m^2]	30.21	29.80	43.88	52.15	0.72
Diferença para superfície sem PCM [W/m^2]	2.88	1.92	3.90	6.90	4.88
Percentual de redução por superfície [%]	8.7	6.1	8.2	11.7	87.2

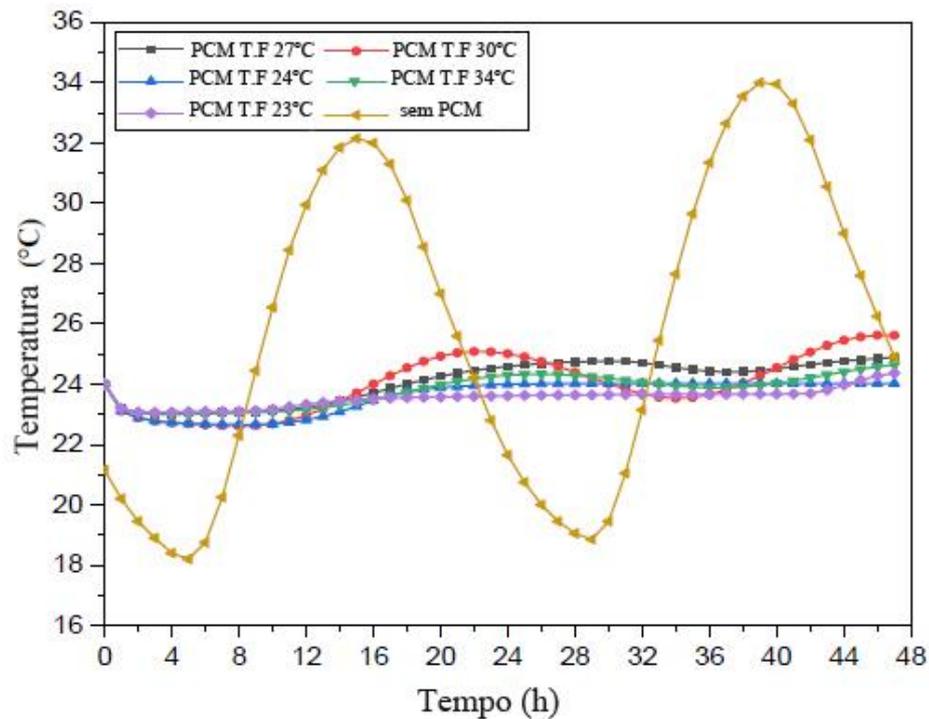
Fonte: Ferster et. al (2017)

Imghoure et. al (2021) definiram, por meio de cálculos matemáticos, o posicionamento e a temperatura de fusão ideal de PCM as condições climáticas de Marrakech no Marrocos em seu período mais quente. No estudo, primeiramente foi considerado um modelo convencional de parede para que se estabelecesse a temperatura de fusão ideal, e posteriormente diversos modelos de paredes para se estabelecer seu melhor posicionamento.

Os primeiros resultados apontaram que o PCM com temperatura de fusão em 23°C foi aquele que apresentou os melhores resultados. Ao passar por seu processo completo de troca

de fase e armazenando o calor latente de forma mais eficiente que os demais materiais estudados, reduziu a amplitude térmica diária no sistema de parede e no interior do ambiente de forma mais incisiva (Figura 13).

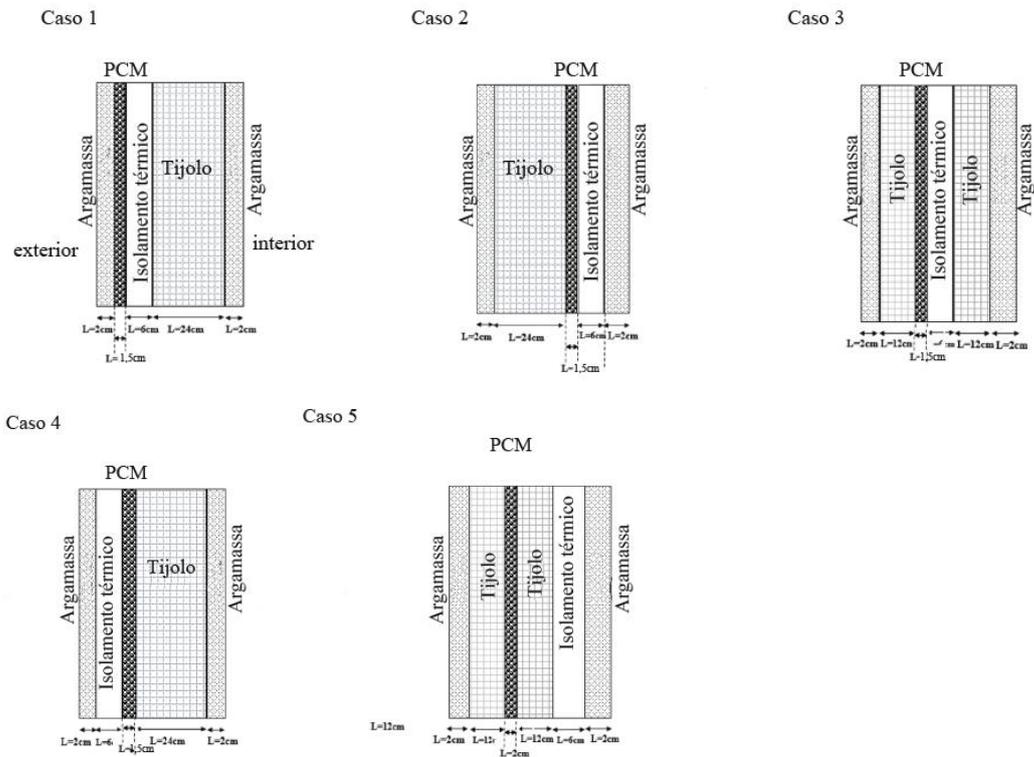
Figura 13- Variação de temperatura em uma parede convencional com e sem PCM.



Fonte: Imghoure et. al (2021)

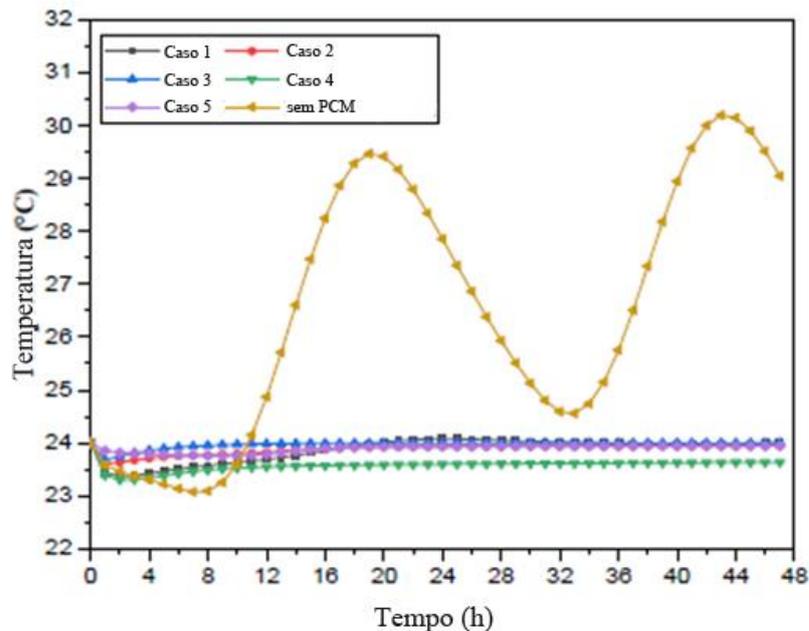
Quanto ao posicionamento, dentre todas as configurações de envoltória (Figura 14), o PCM tornou-se mais eficiente em reduzir a perda e ganho de calor quando protegido externamente, sobretudo pelo isolante térmico, e sob uma espessura de 1,5 cm, que possibilita uma troca de fase de forma mais uniforme. Desta forma, é possível verificar que os Casos 3 e 4 foram aqueles que proporcionaram a menor variação de temperatura na envoltória analisada (Figura 15).

Figura 14- Configurações de paredes com PCM estudadas na segunda etapa da pesquisa



Fonte: Imghoure et. al (2021)

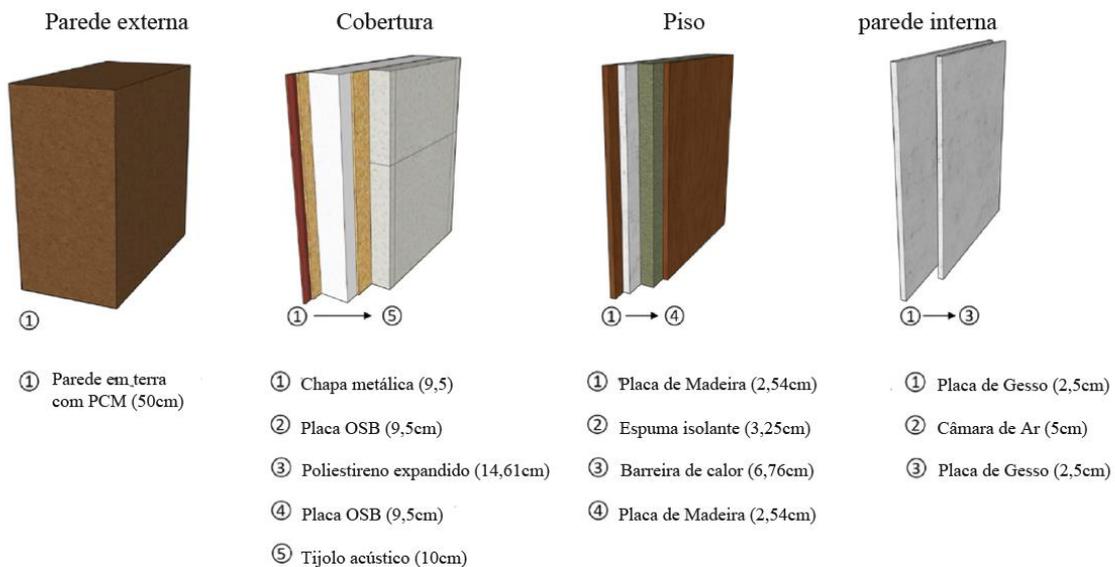
Figura 15- Variação de temperatura das configurações da parede somada ao com o PCM de temperatura de fusão em 23°C e de uma parede de mesma composição sem a utilização do material.



Fonte: Imghoure et. al (2021)

Alassaad et. al. (2023) avaliou, por meio de simulação numérica, o impacto do PCM no conforto térmico dos ocupantes e a economia de energia em uma típica residência unifamiliar térrea com misturas leves à base de terra em suas vedações verticais externas (Figura 16). Também foi investigada a existência de uma temperatura ideal de mudança de fase para as cidades de Caen e Nice, na França.

Figura 16- Configurações dos elementos de envoltória



Fonte: Alassaad et. al. (2023)

Os resultados apontaram que quando não considerados os sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento, o conforto adaptativo aumentou com a adição de PCM, sobretudo quando adotada uma maior proporção de PCM junto à envoltória, e na cidade de Nice cujo clima é mais suscetível a grandes amplitudes térmicas e maiores temperaturas (Figura 17).

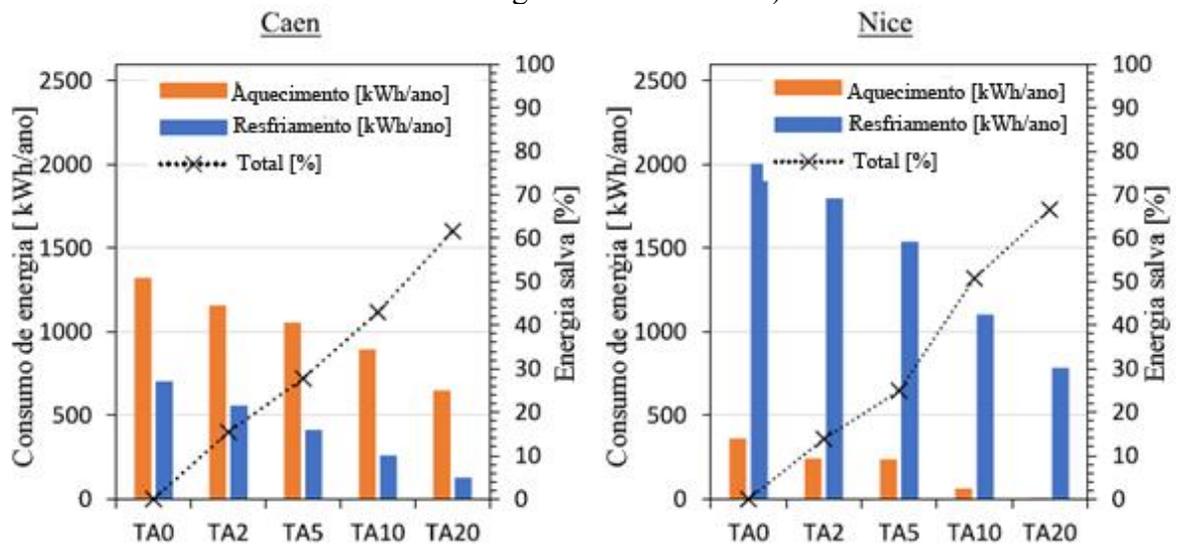
Figura 17- Porcentagem de horas de conforto térmico adaptativo para cada cidade e proporção de PCM estudado (LE0 igual a 0% de PCM, LE2 igual a 2% de PCM, LE5 igual a 5% de PCM, LE10 igual a 10% de PCM, LE20 igual a 20% de PCM).

Cidade	Conforto térmico adaptativo [%]				
	LE0	LE2	LE5	LE10	LE20
Caen	56	63	66	69	74
Nice	77	84	89	96	99

Fonte: Alassaad et. al. (2023)

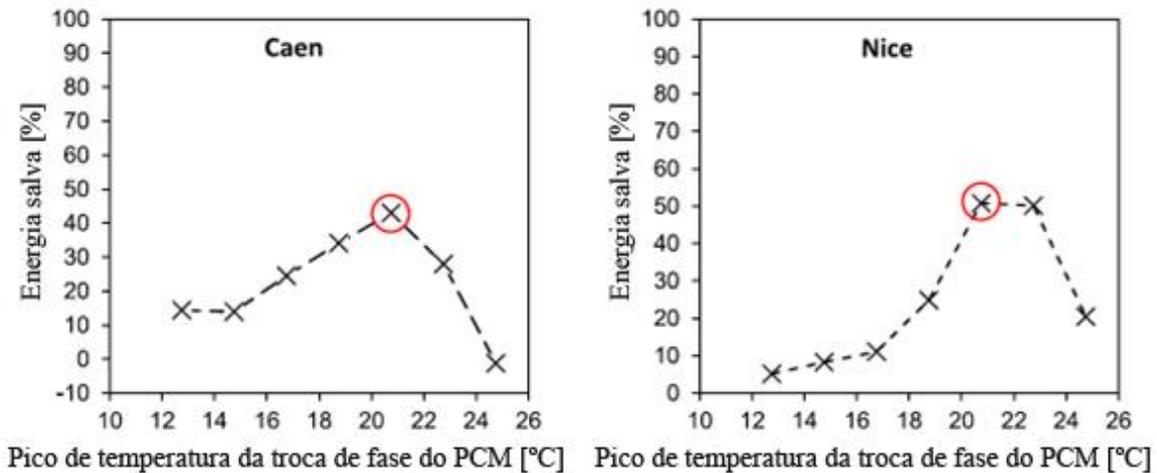
Quando considerado sistemas artificiais de condicionamento térmico, a economia de energia atingiu 62% quando considerados aquecimento/arrefecimento na cidade de Caen e 67% em Nice, quando o material leve à base de terra contém 20% de sua composição em PCM (Figura 18). Ademais, verificou-se que na cidade de Caen as temperaturas de fusão ideal do PCM devem ser mais baixas se comparadas a cidade de Nice, acompanhando assim a diferença climática entre as localidades (Figura 19).

Figura 18- Consumo de energia para aquecimento e resfriamento [kWh/ano] e economia de energia [%] de acordo com a temperatura de fusão do PCM em Caen e Nice (TA0 igual a 0% de PCM, TA2 igual a 2% de PCM, TA5 igual a 5% de PCM, TA10 igual a 10% de PCM, TA20 igual a 20% de PCM).



Fonte: Alassaad et. al. (2023)

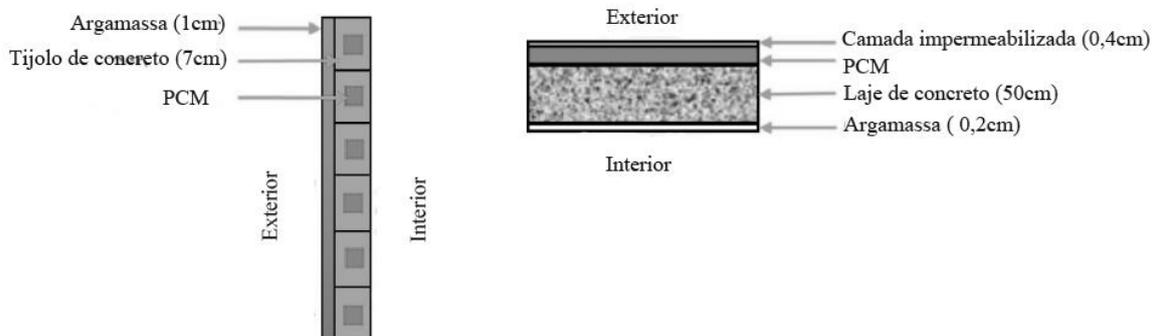
Figura 19- Redução no consumo anual de energia para refrigeração e aquecimento para paredes externas leves em terra com as diversas temperaturas de fusão do PCM em Caen e Nice.



Fonte: Alassaad et. al. (2023)

Al-Yasiri e Szabó (2022) avaliaram, por meio de experimentos em protótipos, o comportamento térmico da envoltória de edifício considerando a introdução do PCM sob o clima quente da cidade de Al Amarah, no sul do Iraque. Para o experimento, foram consideradas duas salas de formato cúbico (1m x 1m x 1m), uma com PCM (Figura 20 e outra para referência sem a utilização do material durante um dia quente típico de verão. Buscou-se estabelecer o impacto do material no fluxo de calor, no perfil de temperatura, além de definir a orientação com maior impacto da camada de PCM.

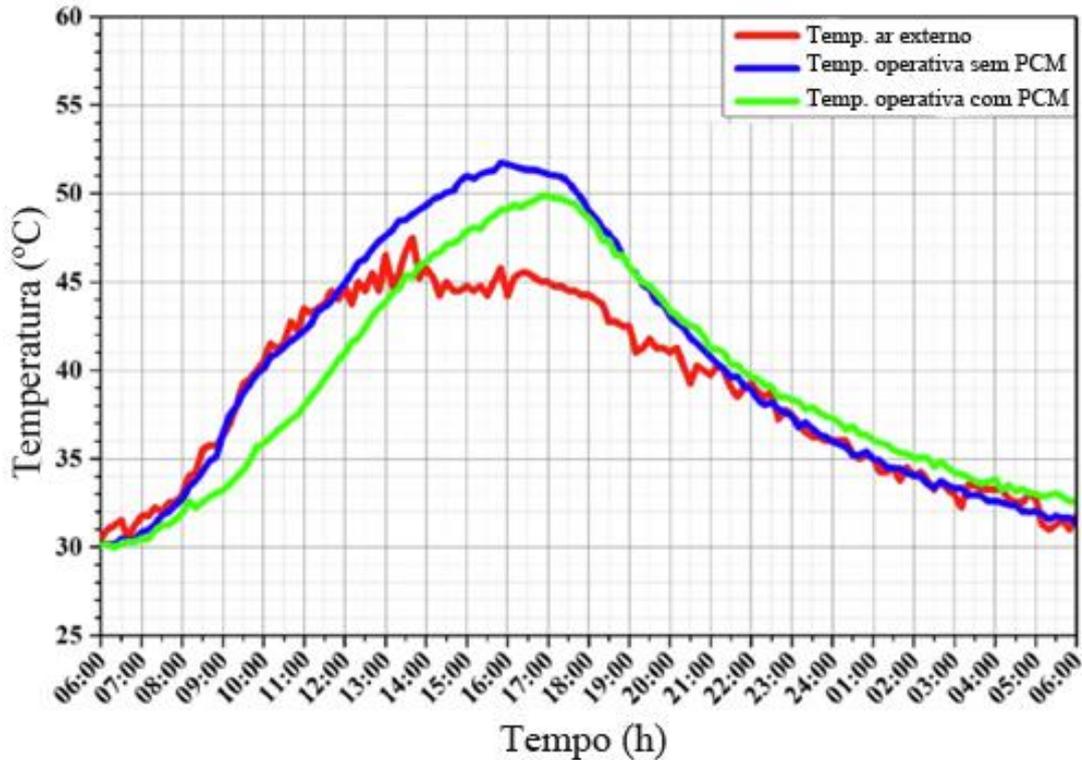
Figura 20- Configuração da envoltória com PCM aplicado na cobertura e parede (configuração sem PCM foi considerada idêntica, porém sem a inserção do material).



Fonte: Al-Yasiri e Szabó (2022)

Os resultados apontaram que o PCM melhorou o desempenho térmico da sala em comparação com o ambiente de referência, tornando o meio interno menos suscetível às variações de temperatura, o que fez com que este, durante as horas mais quentes do dia, apresentasse temperaturas operativas menos elevadas que o modelo de referência (Figura 21).

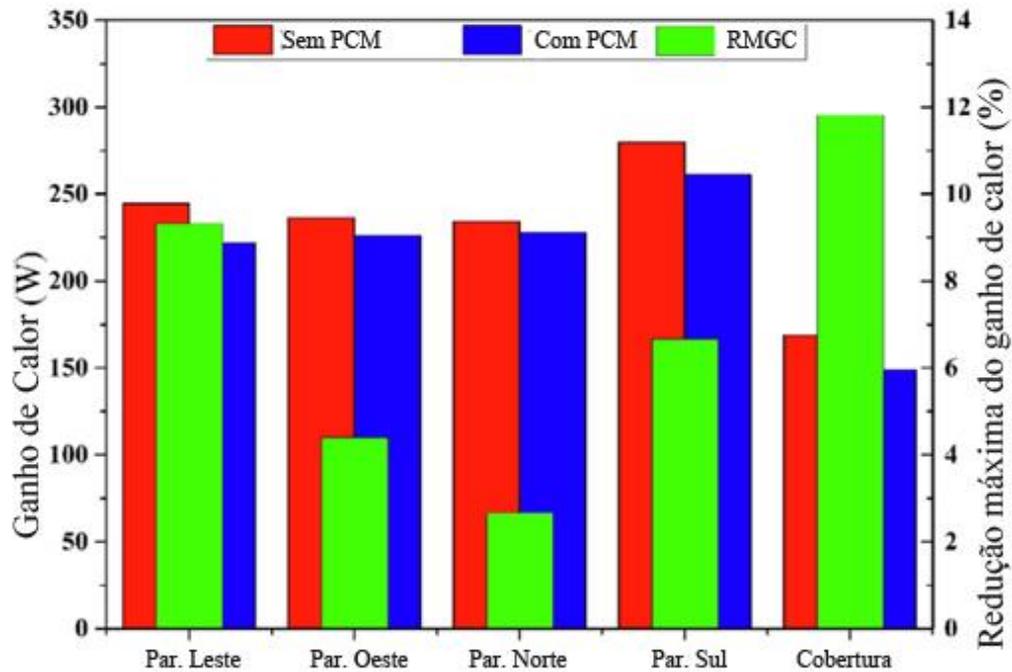
Figura 21- Perfil de temperatura operativa no interior do protótipo sob a envoltória com e sem PCM e temperatura do ar para o período de 24h.



Fonte: Al-Yasiri e Szabó (2022)

Ao analisar cada uma das superfícies que compõem o ambiente, dentre os elementos de envoltória, a cobertura foi a que trouxe maior benefício com a introdução do PCM, reduzindo em quase 12% o ganho de calor. As demais superfícies também apresentaram redução no ganho de calor, demonstrando assim a eficácia do material neste aspecto.

Figura 22- Ganho de calor e Redução máxima do ganho de calor (RMGC) em cada um dos elementos de envoltória (paredes e cobertura).

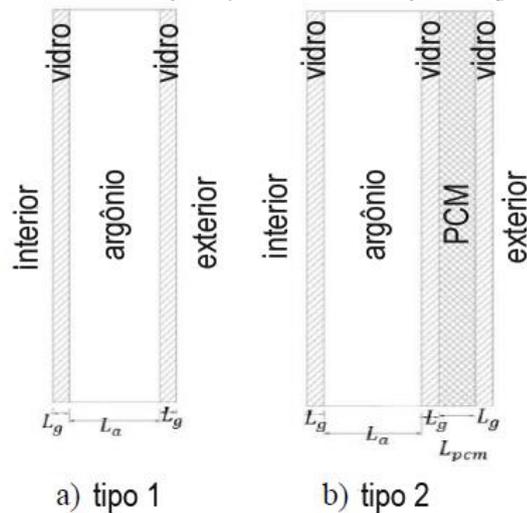


Fonte: Al-Yasiri e Szabó (2022)

Cabe ressaltar, no entanto, que segundo os autores, devido às condições climáticas exteriores extremamente quentes, a incorporação do PCM nos elementos da envoltória do edifício foi insuficiente para tornar a temperatura do ar aceitável no interior dos ambientes, o que proporcionaria um índice elevado de desconforto térmico.

Ahmadi e Shahcheraghian (2015) investigaram o efeito do uso de PCM na redução de fluxo de calor do ambiente externo para o interno por meio da absorção do ganho de calor em uma janela durante o período diurno de Teerã, no Irã (clima seco e com alta amplitude térmica diária). O estudo foi realizado por meio de simulação numérica do fluxo de calor de dois tipos de janelas em um ambiente no mês mais quente do ano. A primeira composta por vidro duplo somada a uma câmara de argônio de 20mm, e a segunda de vidro triplo somada a uma câmara de argônio de 20mm e 10mm de PCM com temperatura de fusão em 27,85°C (Figura 23).

Figura 23 – Composição dos dois tipos de janela.

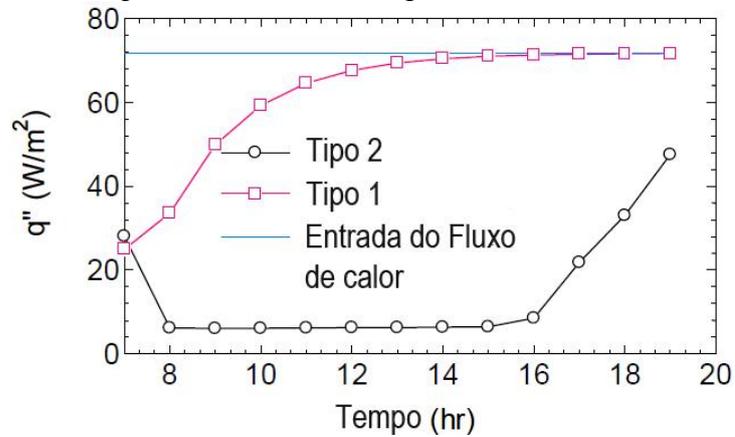


Fonte: Ahmadi e Shahcheraghian (2015)

Revelou-se que quando adotada a opção do vidro triplo com a presença de PCM, reduz-se o ganho de calor para o meio interno por meio da janela. Este fenômeno ocorre porque o PCM tem a capacidade de estocar calor por um período que se estende das primeiras horas do dia até as 16 horas (Figura 24), retendo assim 86% do fluxo de calor do meio externo. Uma vez que o PCM chega ao seu limite de armazenamento, o fluxo de calor aumenta. No entanto, isso ocorre em um período do dia no qual há uma menor incidência de ganho de calor pela janela. Já no período noturno, o PCM troca de fase do líquido para o sólido, dissipando o calor armazenado para o meio externo.

Quanto ao vidro duplo sem PCM, a difusão de fluxo de calor aumenta uniformemente durante todo o período diurno, chegando depois de 6 horas a 97% do fluxo de calor aplicado, o que vem a comprovar a eficácia do vidro triplo com PCM quanto a redução de fluxo de calor. O estudo de Ahmadi e Shahcheraghian (2015) evidencia, desta forma, os benefícios do material em condições climáticas dotadas de altas temperaturas e baixa umidade.

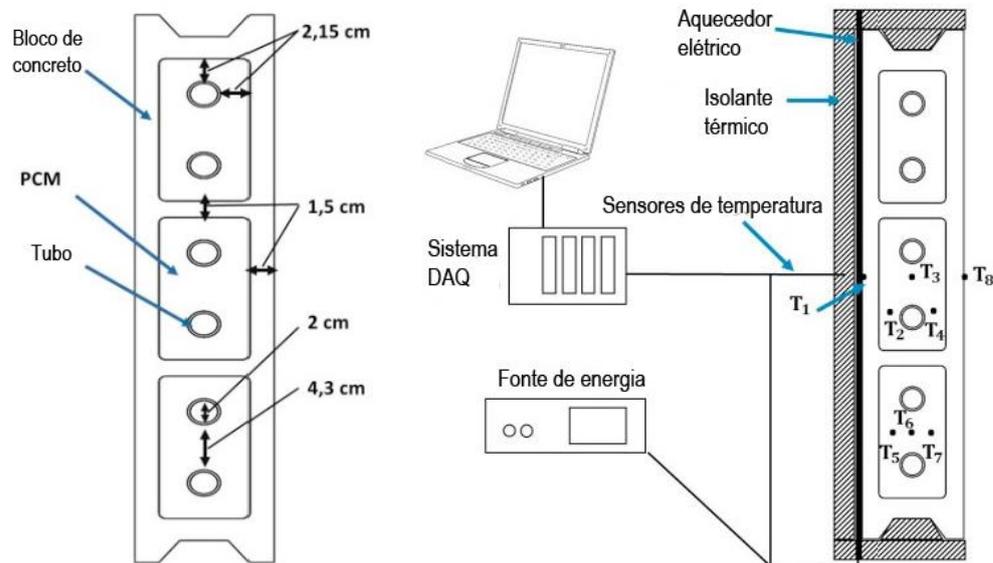
Figura 24 – Fluxo de calor que entra no ambiente por meio dos dois diferentes tipos de janelas



Fonte: Ahmadi e Shahcheraghian (2015)

Uma vez comprovado o benefício na utilização de PCM's no desempenho térmico de edificações em climas secos por meio dos casos já apresentados anteriormente, cabe ressaltar o estudo de Laaouatni et. al (2016). Este apresenta estratégias para aumentar a eficácia do material em ampliar a inércia térmica em edificações nestas mesmas condições climáticas. O estudo conduzido in loco avaliou um sistema construtivo constituído de bloco de concreto preenchido por PCM com 28°C de temperatura de fusão no qual conta com um sistema de ventilação por meio de dutos no interior do bloco (Figura 25). O protótipo de vedação foi submetido a uma fonte de calor (aquecedor elétrico), no qual foi medido o atraso térmico do mesmo.

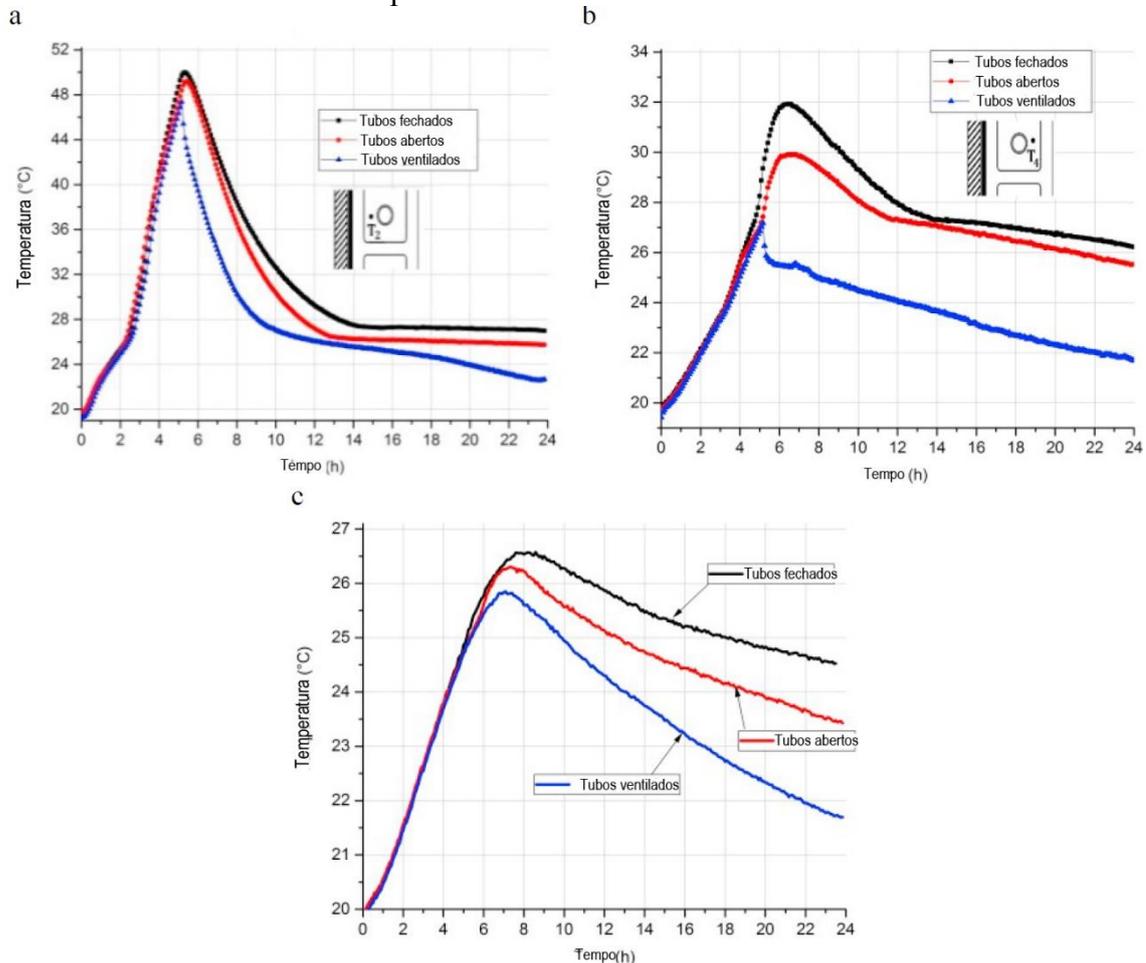
Figura 25 – a) Corte da parede de bloco de concreto com a localização dos tubos e do PCM; b) Representação esquemática adotada para execução do experimento, com a localização de cada um dos sensores de calor.



Fonte: Laaouatni et. al (2016)

Os resultados apontaram o bom funcionamento do sistema, prevenindo o rápido ganho de calor no período mais quente do dia. Durante a noite o calor é dissipado por meio da injeção de ar externo (mais fresco), garantindo assim, que o PCM em conjunto com os tubos de ventilação permita que o sistema mantenha a temperatura por volta da temperatura de troca de fase do PCM e conseqüentemente, amortecia com êxito o estresse térmico aplicado (Figura 26).

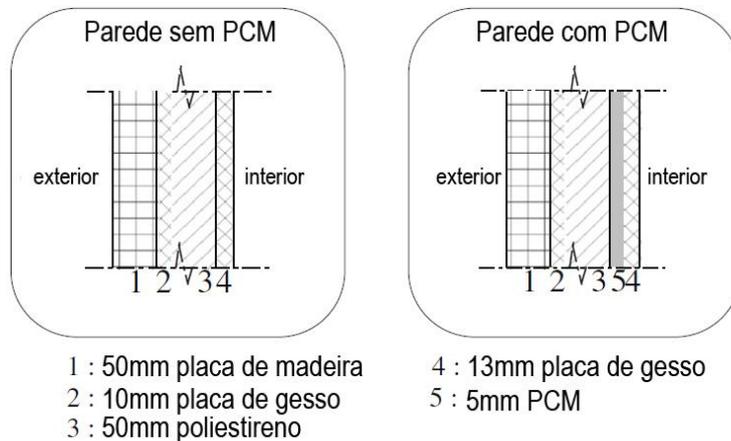
Figura 26 – a) Variação de temperatura no PCM entre a face aquecida e o tubo; b) variação de temperatura no PCM entre o tubo e o lado em contato com o ar ambiente; c) evolução da temperatura na face lateral do bloco



Fonte: Laouatni et. al (2016)

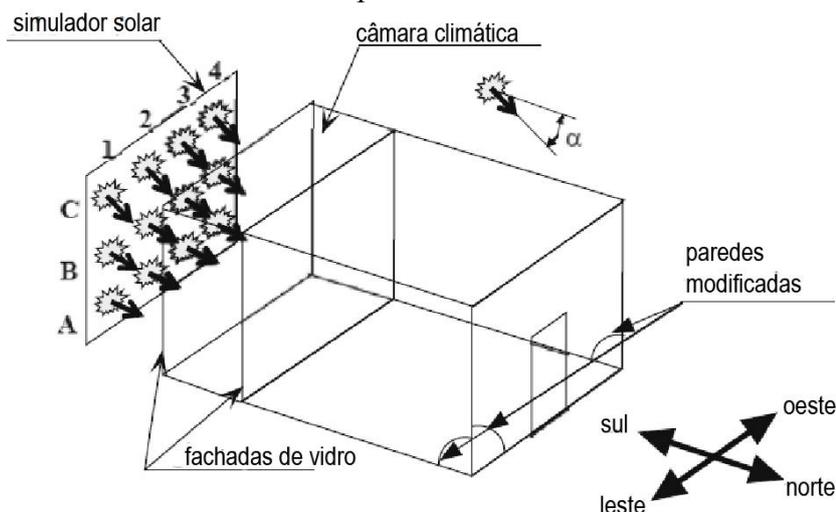
Em locais cujas condições climáticas são mais frias, o PCM também se mostra benéfico, sobretudo no período mais quente do ano. Kuznik e Virgone (2009) avaliaram a adoção de um PCM composto (parafina microencapsulada em conjunto com copolímero) com temperatura de fusão de 23,5°C, usando um estudo comparativo entre a temperatura interna de dois modelos: com e sem PCM (Figura 27). O ambiente estudado foi submetido a uma célula de teste (Figura 28), no qual foi adotado um conjunto de lâmpadas para simular a radiação solar, e ventiladores para gerar uma homogeneidade de temperaturas. O ambiente ainda foi submetido a três diferentes condições climáticas hipotéticas: verão (15-30°C com ventilação noturna), meia estação (10 a 18°C) e inverno (5 a 15°C com aquecimento artificial).

Figura 27 – Composição dos dois tipos de parede adotados



Fonte: Kuznik e Virgone (2009)

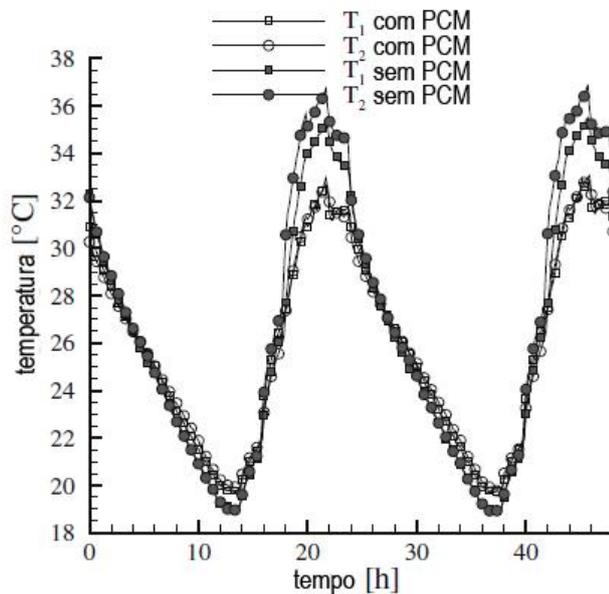
Figura 28- Diagrama isométrico da célula de teste com os 12 refletores - localizações das paredes modificadas.



Fonte: Kuznik e Virgone (2009)

Os autores demonstraram, por meio de medições, que a incorporação do material em paredes reduziu a amplitude térmica diária e o sobreaquecimento do ambiente interno nas três condições climáticas. Cabe ressaltar que nas condições de verão a temperatura máxima registrada no ambiente cuja envoltória apresentava PCM foi 3,9°C mais baixa do que o protótipo sem o material (Figura 29). Além do mais, o PCM também contribuiu para a redução da temperatura superficial das paredes e, conseqüentemente, para a diminuição das flutuações de temperatura das mesmas, atenuando gradientes de temperatura no ambiente interno, e assim, proporcionando melhores condições de conforto térmico dentro do protótipo.

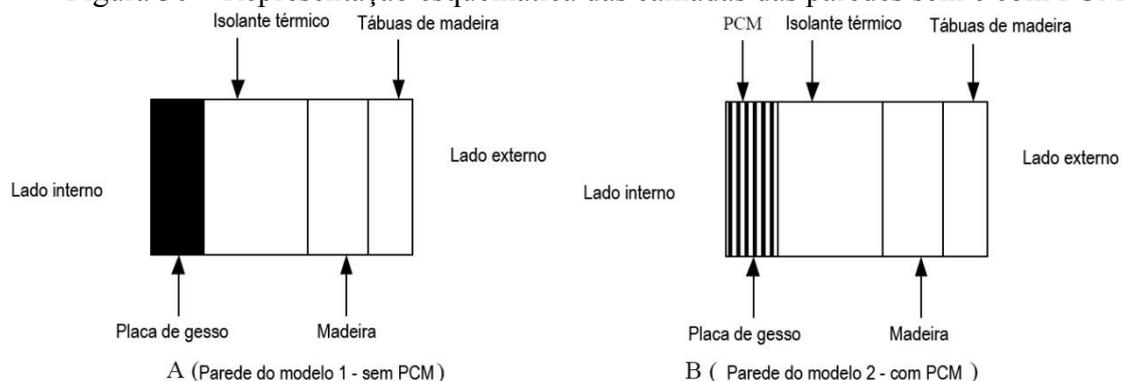
Figura 29 - Temperaturas na sala para o caso de verão com ventilação - T1 na altura 0,85m e T2 na altura 1,70 m.



Fonte: Kuznik e Virgone (2009)

Tardieu et. al (2011) demonstraram como o PCM adotado em paredes de uma edificação pode trazer benefícios quanto à eficiência energética em condições climáticas de verão na cidade de Auckland, na Nova Zelândia. Para o estudo foram utilizadas simulações computacionais no software EnergyPlus de dois modelos: um com PCM e outro sem (Figura 30). Ambos os modelos avaliados constituem um ambiente cúbico com 2,6 metros de aresta e posicionado a 40cm do solo, com janela voltada para o norte e porta para leste.

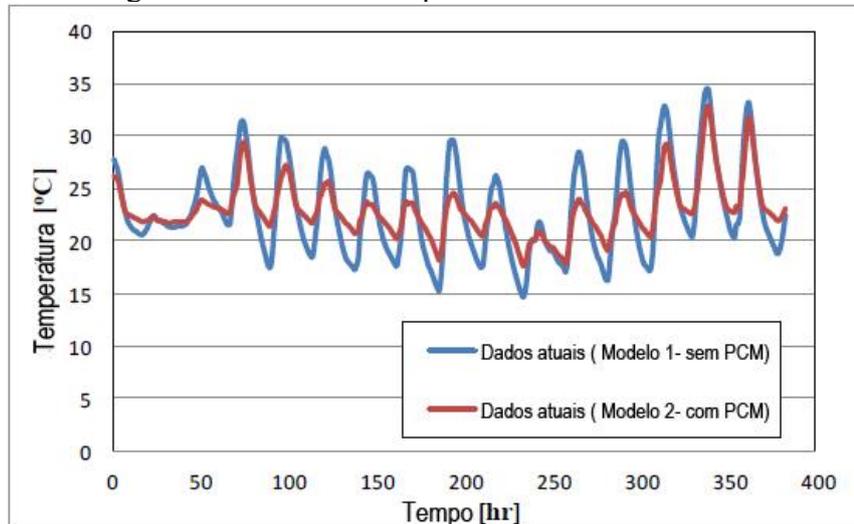
Figura 30 – Representação esquemática das camadas das paredes sem e com PCM



Fonte: Tardieu et. al (2011)

Os resultados apontaram que a utilização do PCM proporcionou uma menor flutuação na temperatura, e que durante o dia, a temperatura do ar no modelo com PCM ficou até 4°C mais baixa do que no modelo sem PCM (Figura 31).

Figura 31 – Perfil de temperatura no modelo com e sem PCM.

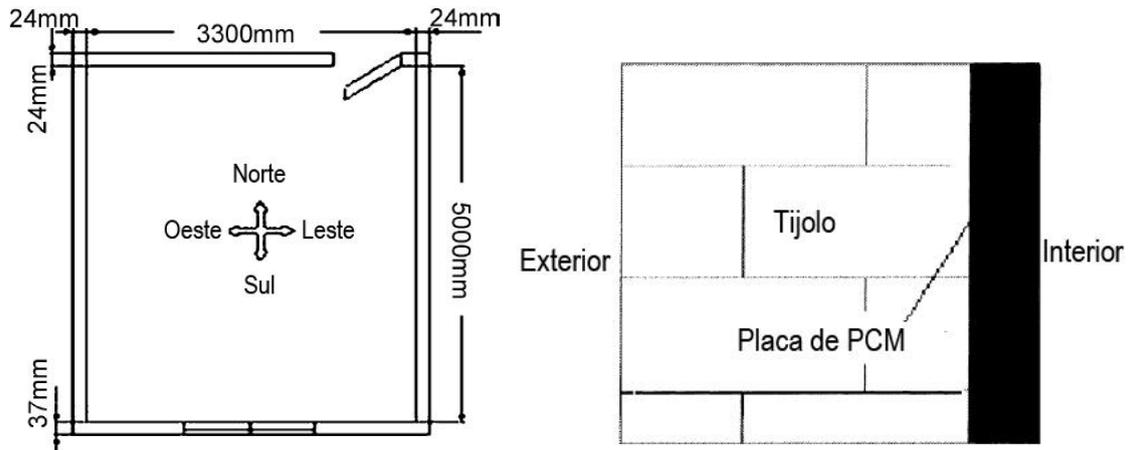


Fonte: Tardieu et. al (2011)

Shilei, Neng e Guohui (2006) também constataram que a utilização desse tipo de material pode ser vantajosa, mesmo nas condições de inverno. Em estudo feito in loco no inverno da cidade de clima temperado de Shenyang, no nordeste da China, foram avaliadas as temperaturas do ar em um ambiente experimental (Figura 32a).

O ambiente foi avaliado por meio de sensores, cuja formatação de envoltória variou entre com e sem PCM (Figura 32b), em três dias de condições climáticas similares. Foi aplicado aquecimento artificial junto ao teto por meio de membrana com potência de 2040W (123,6W/m²).

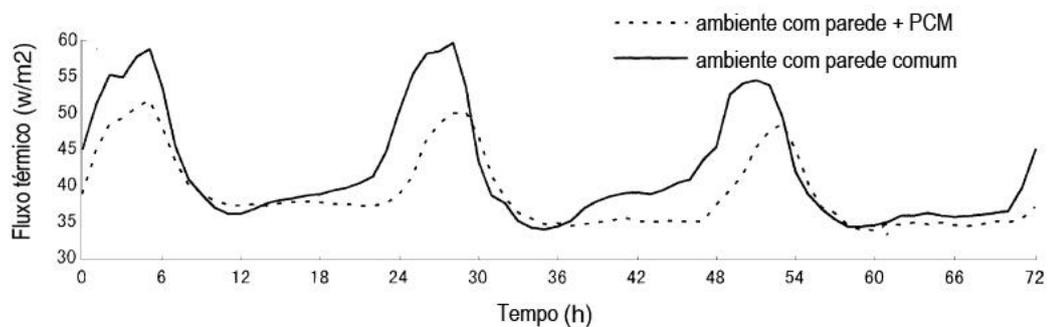
Figura 32 – a) planta do ambiente avaliado; b) configuração da parede com PCM.



Fonte: Shilei, Neng e Guohui (2006)

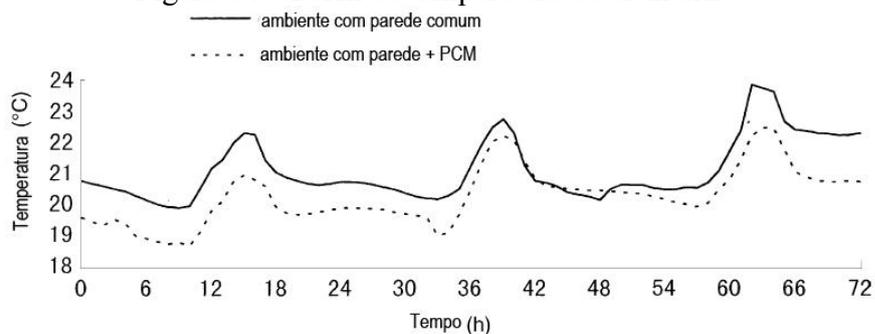
O estudo apontou que a adoção do PCM em paredes contribuiu para a redução de $7,2\text{W/m}^2$ de transferência de calor do meio interno para o externo (Figura 33), assim como para a redução da amplitude térmica interna, apresentando no dia de maior diferença de temperatura, uma variação de $1,15^\circ\text{C}$ menor que no modelo sem PCM (Figura 34).

Figura 33 – Perfil do fluxo térmico através da parede



Fonte: Shilei, Neng e Guohui (2006)

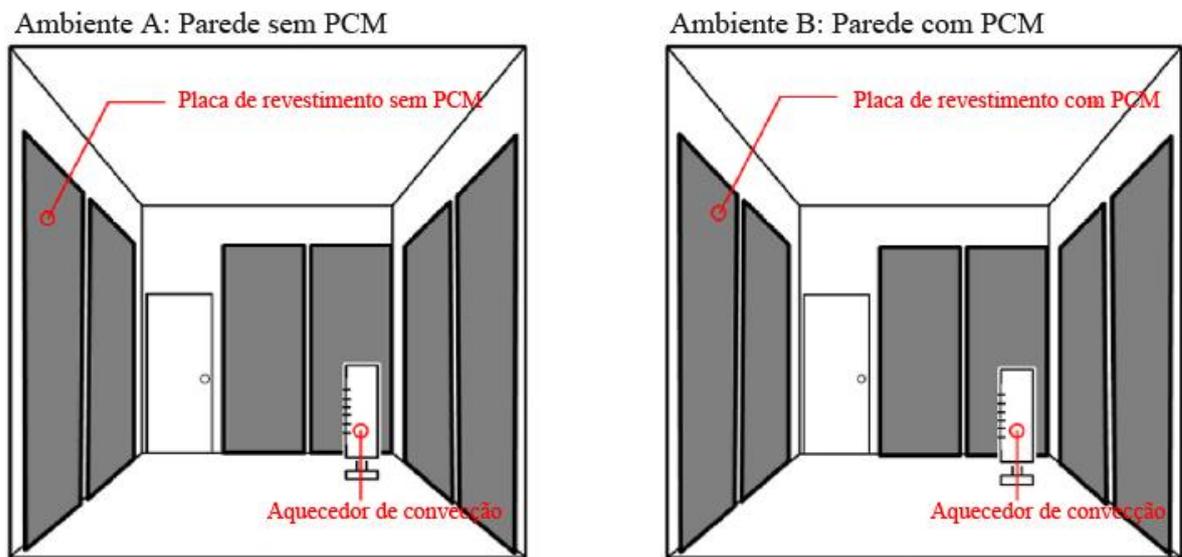
Figura 34 – Perfil de temperatura do ar interno



Fonte: Shilei, Neng e Guohui (2006)

Park et. al (2023) verificaram, por meio de medição in loco, os efeitos de amortecimento térmico, consumo energético e índices de conforto térmico com a adoção de PCM microencapsulado incorporado à uma placa de revestimento aplicado na face interna de paredes em um ambiente de apartamento em sistema leve de construção (Figura 35) com sistema de ar condicionado, na cidade de Jincheon-gun, Coreia do Sul no período mais quente do ano.

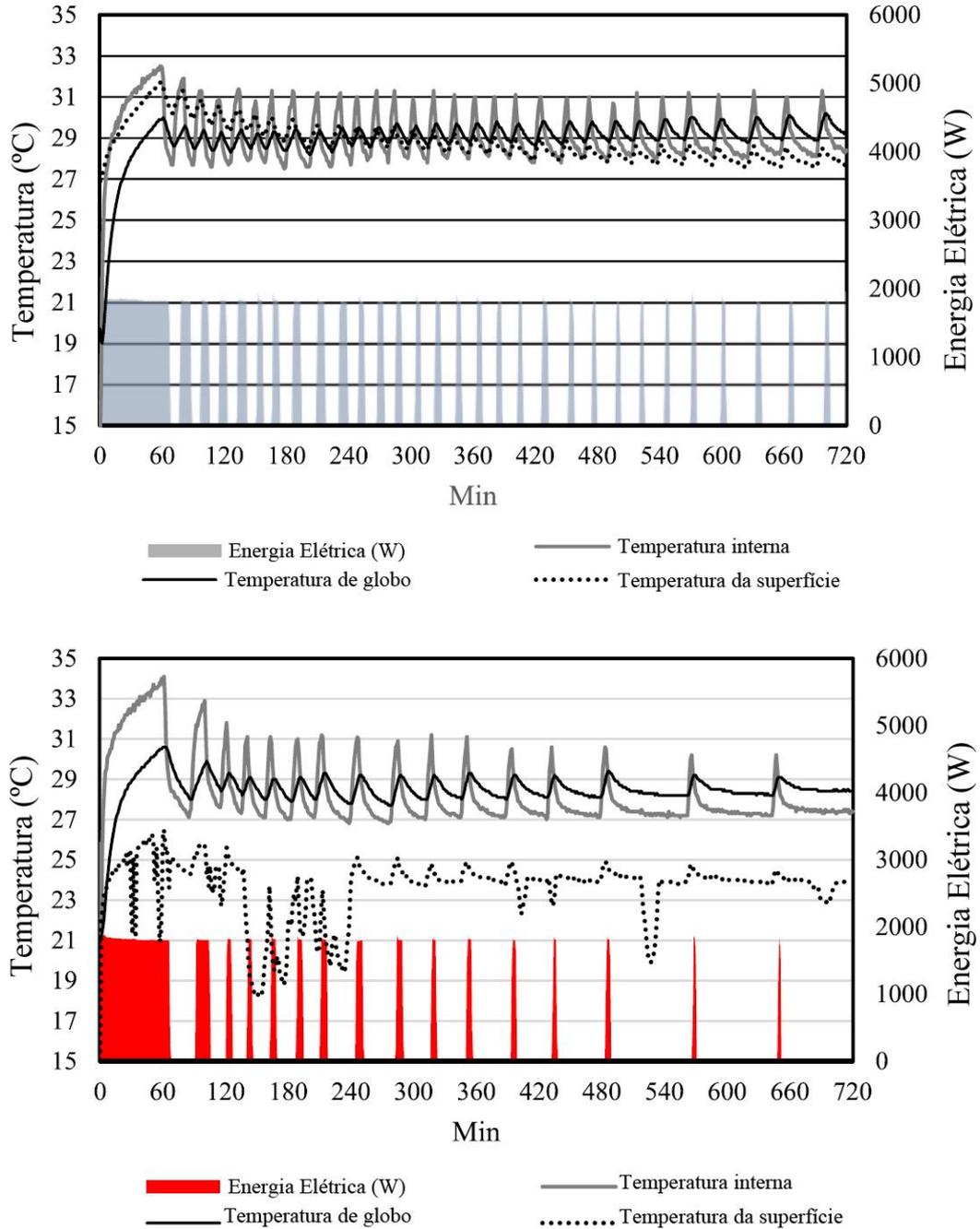
Figura 35- Configuração do ambiente com a placa de revestimento sem e com PCM.



Fonte: Park et. al (2023)

Os resultados indicaram que quando o PCM foi aplicado no revestimento da parede, as temperaturas do ar interno do ambiente apresentaram maior amortecimento térmico, trazendo uma menor frequência de picos de calor no ambiente interno (Figura 36). Tal fenômeno ocorreu devido ao fato de o PCM proporcionar o armazenamento de calor no período mais quente do dia, e dispersar este no período mais frio, tornando a temperatura interior mais estável.

Figura 36- Comparação de temperaturas acima de 720 min em uma sala usando (acima) placa de parede comum e (abaixo) placa de parede contendo material de mudança de fase microencapsulado.

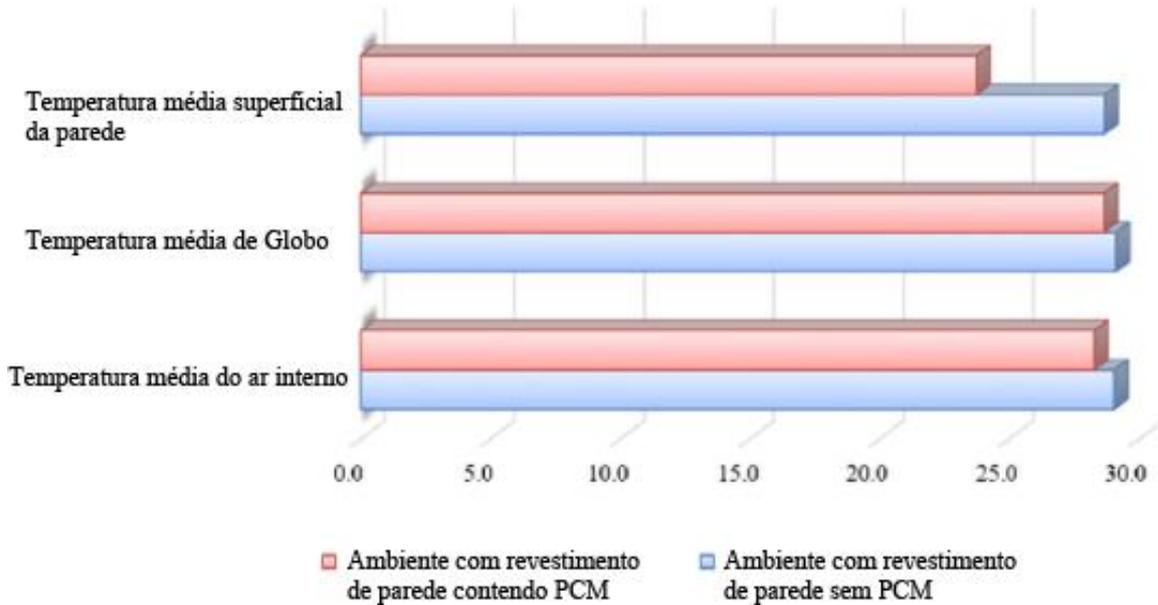


Fonte: Park et. al (2023)

A adoção do revestimento junto ao PCM resultou também em temperaturas superficiais das paredes, temperaturas de globo e a temperatura média interna mais baixas se comparado com ambiente sem a utilização deste (Figura 37). Ainda segundo os autores, a

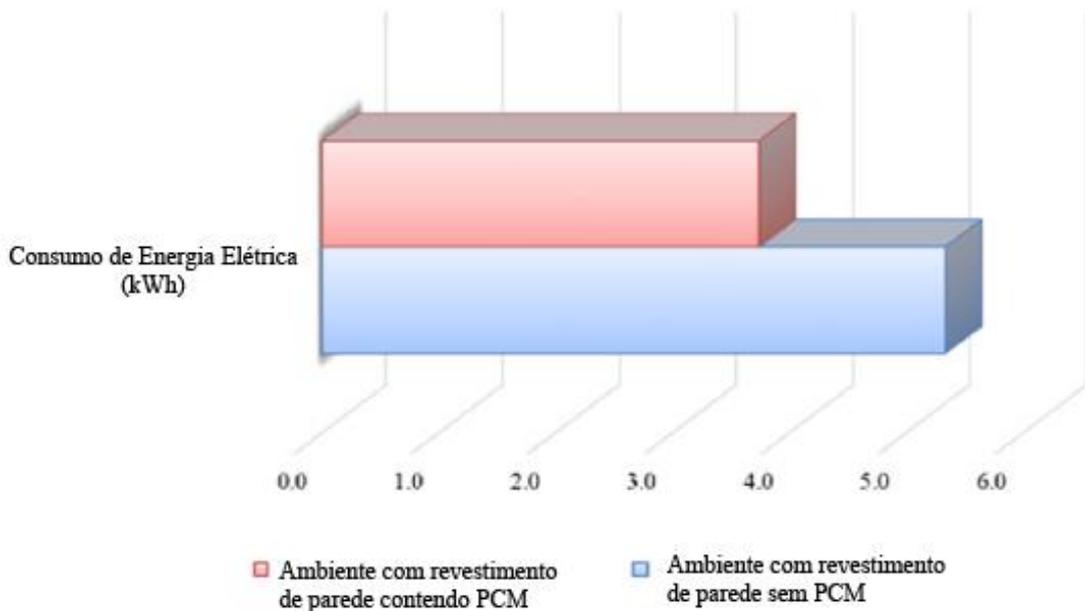
adoção do PCM trouxe pouco efeito no conforto térmico nos ocupantes, considerando o índice PMV -voto médio predito (ASHRAE 55, 2021), no entanto trouxe grande redução de consumo energético de 27,7%. para o condicionamento térmico artificial (Figura 38).

Figura 37- Temperatura média superficial da parede, temperatura média de globo e temperatura média do ar interno no ambiente com revestimento com e sem PCM.



Fonte: Park et. al (2023)

Figura 38- Consumo de energia elétrica no ambiente com revestimento com e sem PCM.

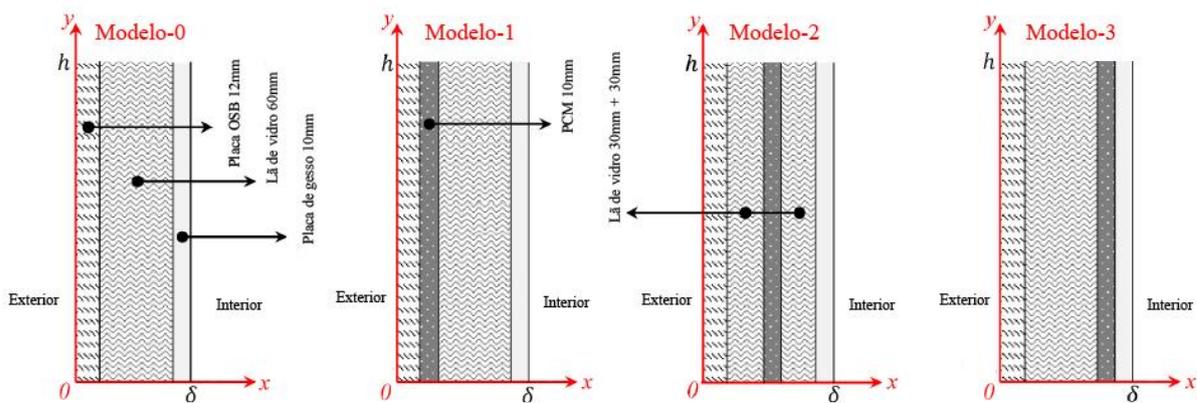


Fonte: Park et. al (2023)

Liu et. al (2022) utilizaram um protótipo em escala reduzida (1,2m x 1,0m x 1,0m) para determinar a temperatura de fusão, o posicionamento e a espessura do PCM ideal para a cidade de Qingdao na China, no período mais quente do ano.

O estudo foi conduzido considerando o sistema leve de construção (Figura 39) e fica clara a possibilidade de o PCM melhorar o desempenho térmico do sistema leve, desde que adotado o material com temperatura de fusão, posicionamento e espessura adequada.

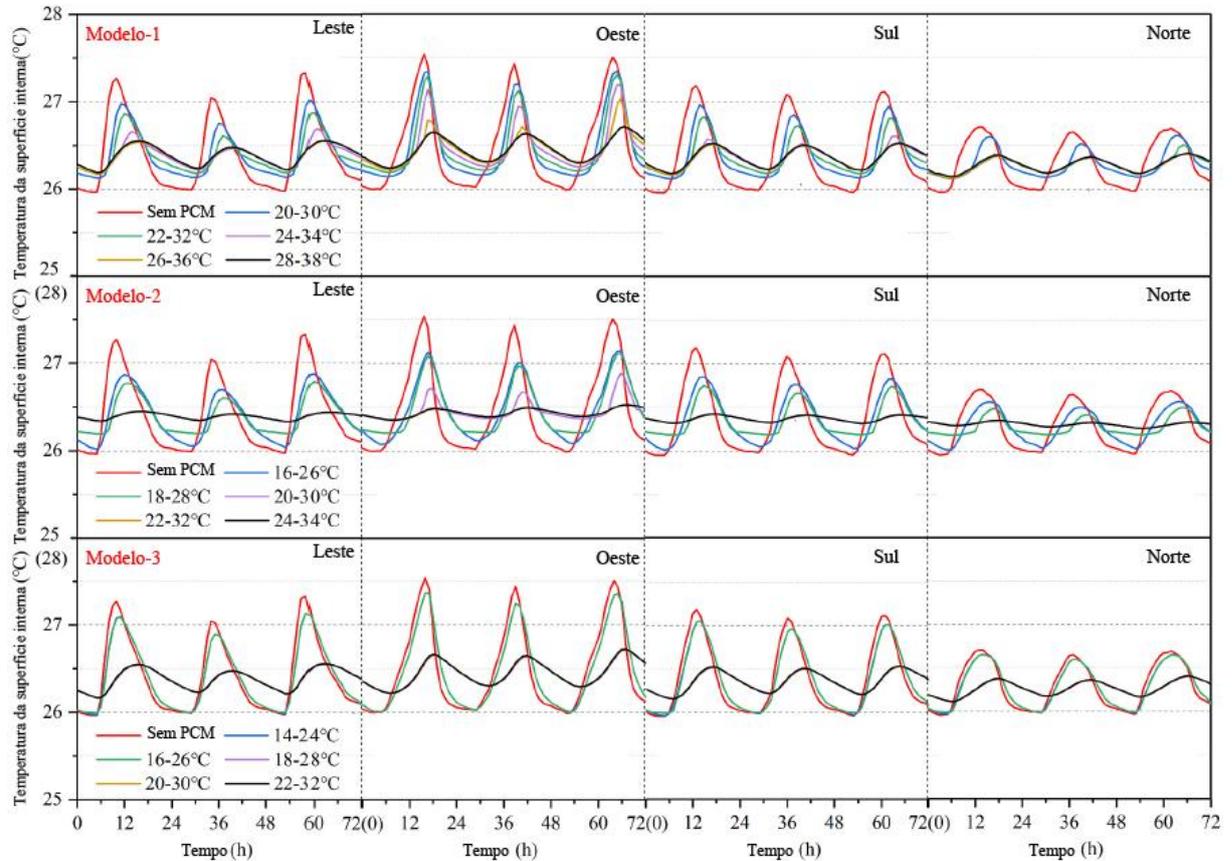
Figura 39- Configurações de paredes avaliadas



Fonte: Liu et. al (2022)

Os resultados demonstram que temperatura de troca de fase adequada do PCM para cada configuração de parede é diferente (Figura 40), e que quando bem prescrita, possibilita uma redução na variação de temperatura superficial interna diária. Dentre as possibilidades de formatação de parede, aquela que demanda menor temperatura de fusão para o PCM é aquela cujo material é aplicado na superfície interna da parede (Modelo-3). Desta forma, mesmo que a temperatura superficial sofra maiores oscilações, há uma maior estabilização da temperatura em temperaturas menos elevadas, o que potencialmente geraria menor desconforto térmico por calor se comparado com as demais configurações.

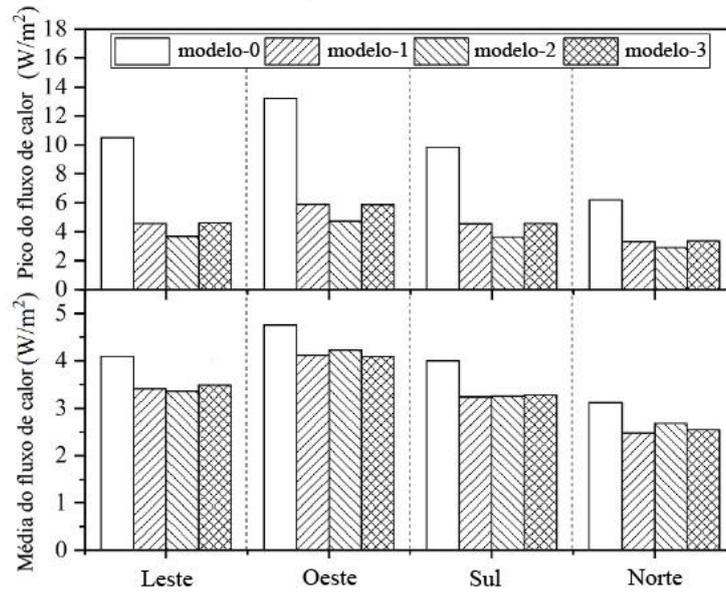
Figura 40- Variação da temperatura da superfície interna da parede em diferentes direções com o tempo sob diferentes temperaturas de troca de fase e localizações do PCM.



Fonte: Liu et. al (2022)

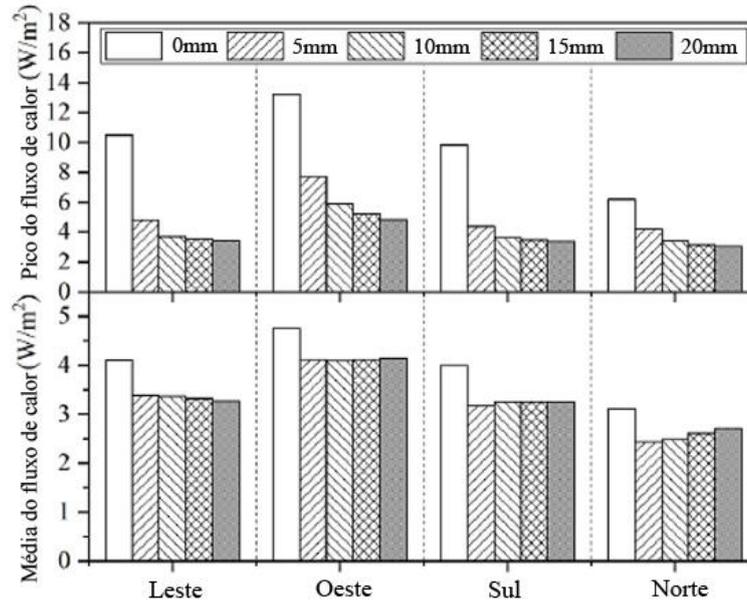
As melhorias mais substanciais no desempenho térmico são observadas nas paredes voltadas para leste e oeste, reduzindo o ganho de calor em 62,8% e 66,4% respectivamente, se comparado com a mesma configuração de parede, mas sem PCM (Figura 41). Como resultado, as paredes voltadas a leste e oeste têm prioridade na instalação do PCM (Figura 42), exigindo também maiores espessuras (10 mm enquanto 5 mm para as demais paredes).

Figura 41- Fluxo de calor da parede para diferentes orientações de parede e localizações de PCM.



Fonte: Liu et. al (2022)

Figura 42- Fluxo de calor da parede para diferentes espessuras e localizações de PCM.

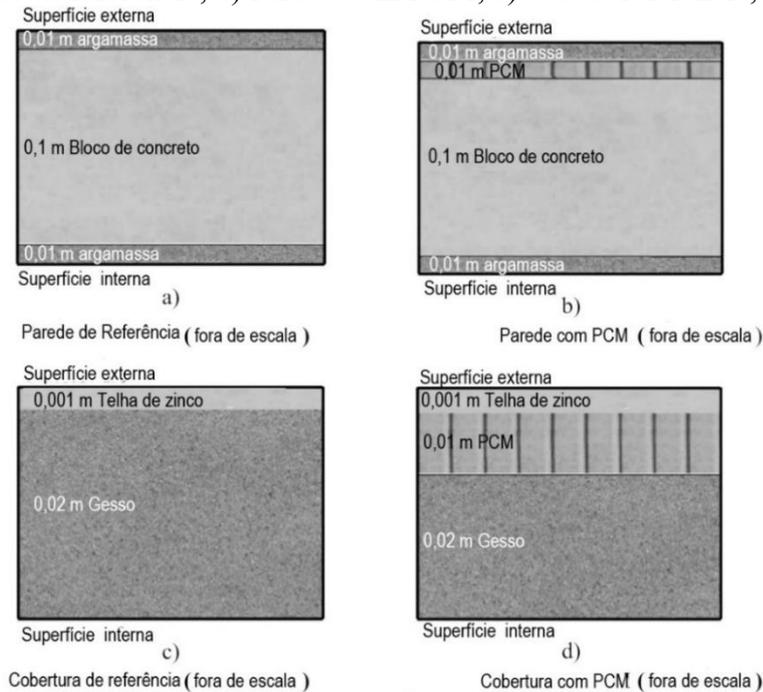


Fonte: Liu et. al (2022)

Em climas quentes e úmidos, como demonstram Beltrán e Martinez-Gomez (2019), a utilização de PCM's com o intuito de aumentar a inércia térmica da envoltória de edificações pode não trazer grandes benefícios ao desempenho térmico.

Os autores analisaram o desempenho térmico e o balanço energético com e sem PCM (Figura 43) na envoltória de uma habitação de interesse social (HIS) em três diferentes condições climáticas do Equador, sendo estas Quito, Guayaquil e Francisco de Orellana. Cabe ressaltar que, neste estudo, o PCM foi locado próximo à face externa da vedação.

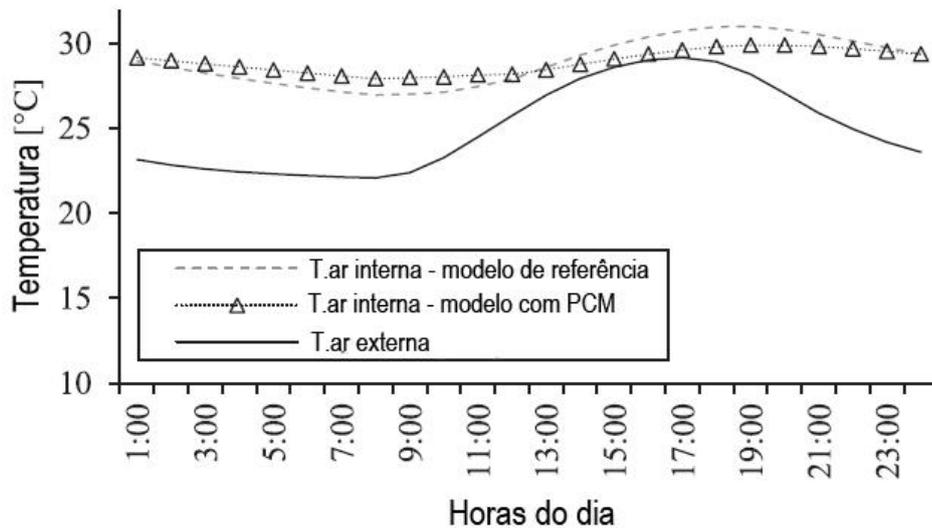
Figura 43 - Configuração da construção para o caso de referência e o caso com o PCM a) Parede de referência, b) Parede com PCM, c) teto de referência, d) telhado com PCM.



Fonte: Beltrán e Martinez-Gomez (2019)

Por meio de simulação computacional, comprovou-se que a consequente diminuição de amplitude térmica atingida no interior da edificação em virtude do aumento de inércia térmica pode ser negativa nas cidades de Guayaquil e Francisco Orellana. Quando adotado o PCM, foram identificadas altas temperaturas do ar dentro da habitação, mesmo nos períodos mais frescos do dia, contribuindo para a ocorrência de maior desconforto térmico (Figura 44). Tais condições climáticas são dotadas de pouca amplitude térmica diária, onde são registradas altas temperaturas no período diurno, sem diminuição significativa durante a noite.

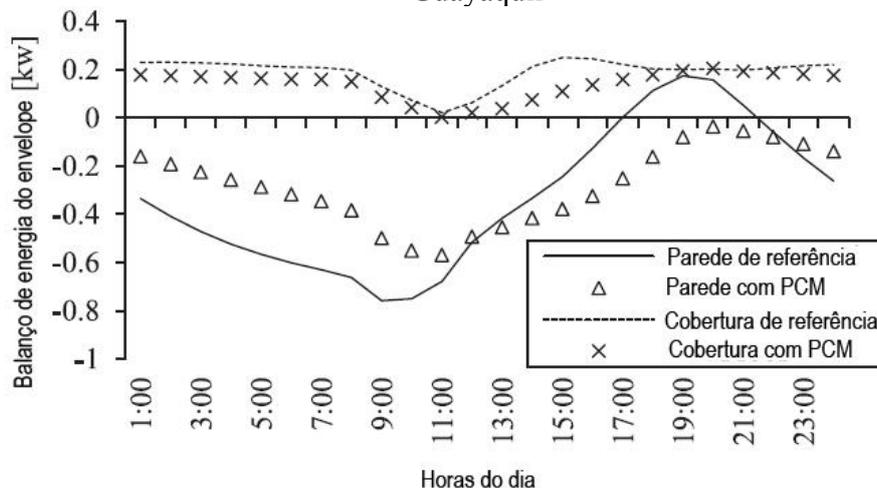
Figura 44 - Comparação entre a temperatura do ar interna nos modelos de referência e com PCM e temperatura do ar externa, na cidade de Guayaquil



Fonte: Beltrán e Martínez-Gomez (2019)

É possível, no entanto, apontar benefícios na utilização de tais materiais quando aplicado junto à face externa da vedação para esta condição climática, tais como o menor ganho e perda de energia pelas paredes e cobertura (Figura 45). Sendo assim, em alguns casos, a adoção do PCM pode contribuir para uma maior eficiência energética, quando considerada uma edificação dotada de sistema artificial de condicionamento térmico.

Figura 45 - Comparação do balanço energético do envelope durante um dia entre paredes de referência e paredes com PCM, telhado de referência e telhado com PCM, na cidade de Guayaquil



Fonte: Beltrán e Martínez-Gomez (2019)

Al-Absi et. al. (2020) investigaram o potencial da aplicação passiva de PCMs para o ambiente interno de uma unidade habitacional em um edifício multifamiliar no clima quente e úmido da Malásia.

Para o estudo foram avaliadas a temperatura de fusão (26 a 27, 27 a 28, 28 a 29 e 29 a 30°C) e a espessura ideal (0, 6, 12 e 18mm) do PCM, assim como os efeitos da variação destes sobre a temperatura do ar interna por meio do modelo numérico. A unidade habitacional foi considerada com os componentes construtivos convencionais da construção civil do país em questão (Figura 46).

Figura 46- Materiais utilizados para o modelo numérico e as espessuras de cada componente.

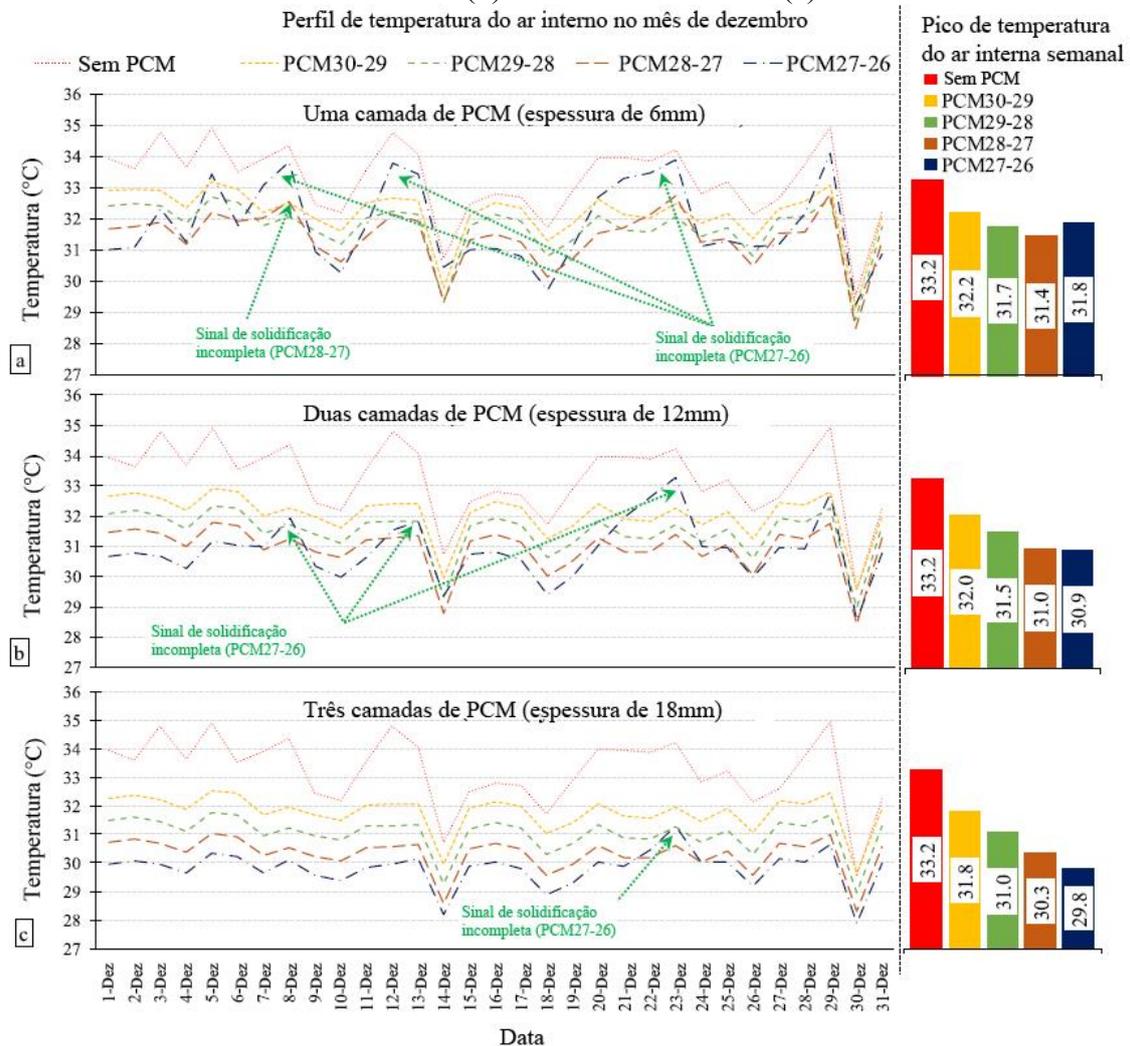
Item	Descrição	Espessura
Paredes externas	Argamassa	130mm
	Parede de concreto	
	Argamassa	
Paredes internas	Argamassa	126mm
	Parede de tijolos cerâmicos	
	Argamassa	
Piso	Piso cerâmico	110mm
	Laje de concreto	
Janelas	Vidro simples com 6mm + película	6mm

Fonte: Al-Absi et. al. (2020)

Os resultados apontaram uma maior redução do pico de temperatura interna utilizado PCM's em maiores e espessuras (18 mm) e com temperaturas de fusão entre 26 e 27°C, sendo este o material de menor temperatura de troca de fase, dentre as possibilidades estudadas. Esta configuração possibilitou um decréscimo de 4,9°C se comparado com o caso base, sem a utilização do PCM (Figura 47).

A melhora no comportamento térmico ocorreu uma vez que as condições de temperaturas internas permitiram o processo completo de troca de fase do material ao longo do dia com maior frequência, e a maior espessura foi capaz de armazenar de forma mais eficaz o calor latente no período mais quente e dissipar este no ambiente no período mais fresco, ao contar com ventilação natural noturna.

Figura 47-Temperatura máxima diária (esquerda) e mensal (direita) do ar interno (T_i) para os PCMs com diferentes temperaturas de fusão usando uma camada PCM (a), duas camadas PCM (b) e três camadas PCM (c).



Fonte: Al-Absi et. al. (2020)

No Brasil, foram realizados poucos estudos em relação ao comportamento térmico deste tipo de material em edificações. Dentre estes, pode-se destacar os de Brito et. al (2017) e Pons e Stanescu (2017).

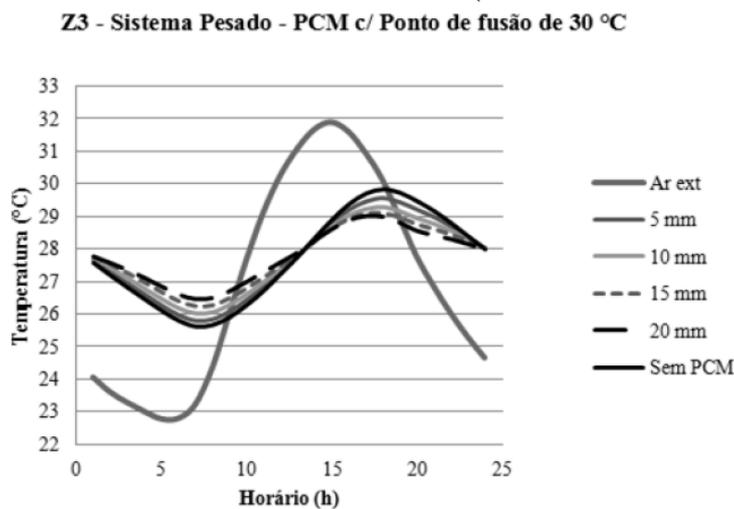
Brito et. al (2017) avaliaram o impacto da utilização de PCM's na amplitude térmica diária assim como na temperatura máxima interna em um ambiente com janela voltada para oeste, considerando um dia típico de verão de oito cidades brasileiras, representando cada uma das zonas bioclimáticas.

O estudo foi conduzido por meio de simulação computacional no software *EnergyPlus*, sendo analisadas a aplicação de PCM, com diversas temperaturas de fusão e espessuras, junto

a dois diferentes tipos de envoltória, sendo um leve e outro pesado. O sistema leve, sendo composto de 1cm de chapa cimentícia, 5cm de lã de vidro e 1,2cm de gesso nas paredes e cobertura composta por telha cerâmica e forro de gesso; e o sistema pesado foi considerado com paredes de 15cm de concreto e cobertura composta por forro de concreto também de 15cm e telhas cerâmicas.

Com relação à edificação com envoltória pesada, os resultados das simulações apontaram que por esse modelo de construção ser com alta inércia térmica, a implementação de PCM foi pouco significativa, mas ainda assim apresentando uma redução de amplitude térmica diária e uma redução na temperatura máxima de até 1,5°C dentro do ambiente, quando adotado um PCM com temperatura de fusão de 30°C (Figura 48).

Figura 48 - Gráfico da temperatura do ar exterior e no interior de modelo com sistema pesado, sem PCMs e com PCMs (espessuras de 5, 10, 15 e 20mm) com ponto de fusão de 30°C na cidade de São Paulo (zona bioclimática 3)

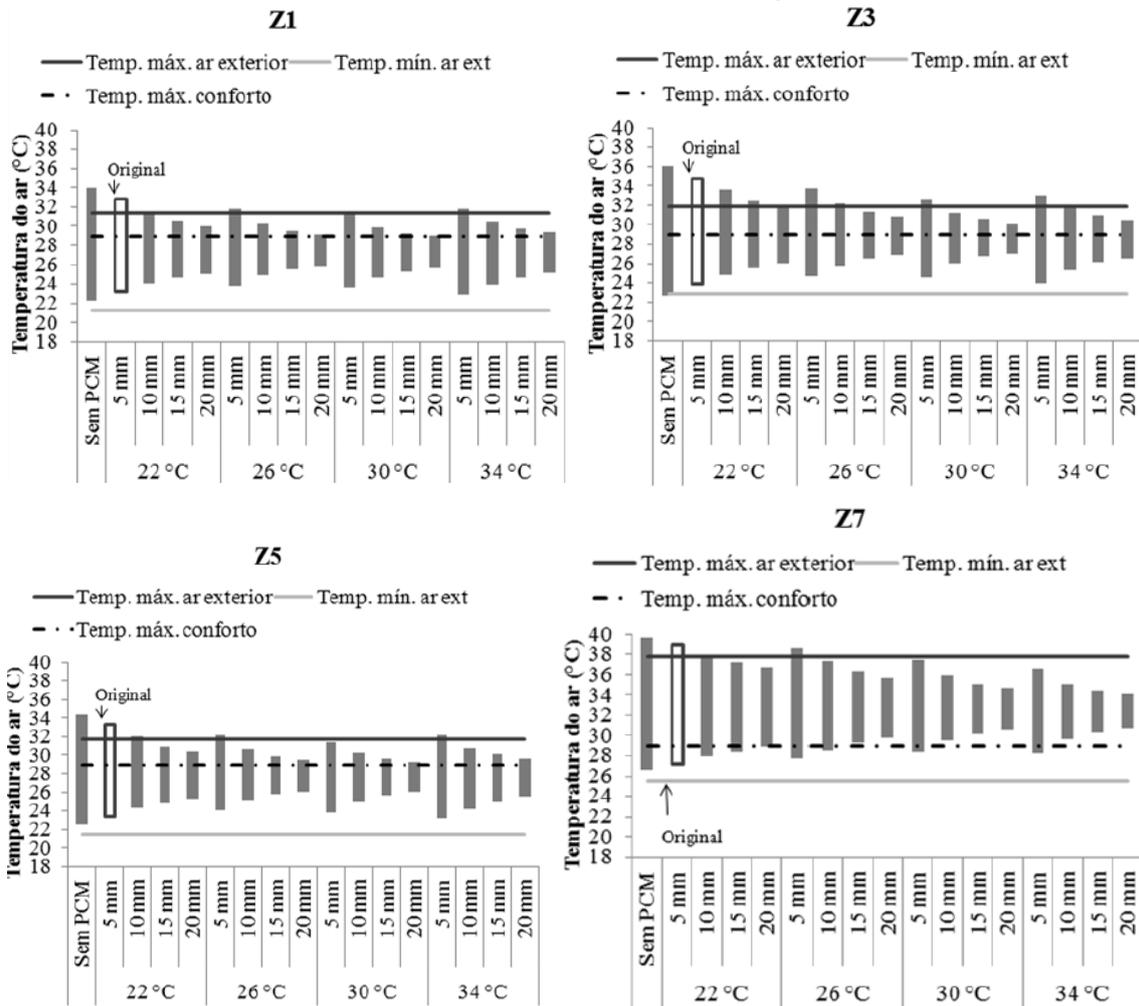


Fonte: Brito et. al (2017)

Com relação à envoltória leve, as simulações apontaram que PCM's com temperaturas de fusão de 30°C e 36°C apresentaram os melhores resultados nas zonas bioclimáticas de 1 a 5 (mais fria e moderada) e de 6 a 8 (mais quentes), respectivamente. Dessa forma, fica clara a necessidade da adoção de PCMs com temperaturas mais elevadas de fusão em climas mais quentes (Figura 49).

Os resultados também apontaram que a adoção de maiores espessuras contribuiu para uma maior redução de amplitude térmica no interior do ambiente (Figura 49).

Figura 49 - Intervalos de temperatura do ar interior com sistema leve, sem PCMs e com PCMs nas Zonas bioclimáticas 1, 3, 5 e 7, respectivamente.

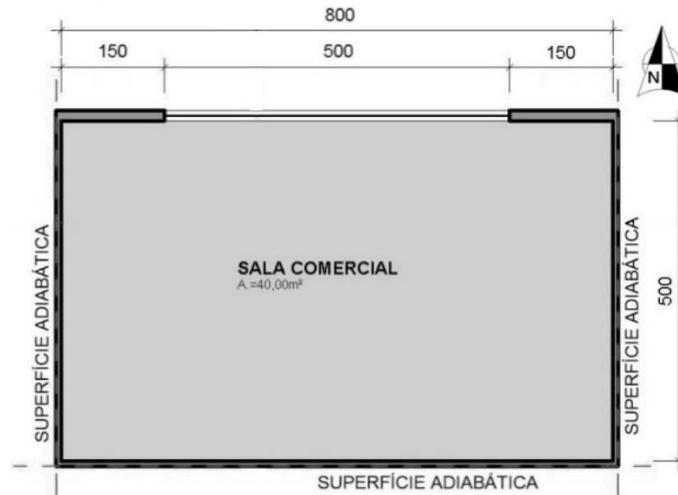


Fonte: Brito et. al (2017)

Apesar do estudo demonstrar que a utilização do PCM na construção civil pode ser vantajosa nos diferentes climas brasileiros, cabe ressaltar que o modelo avaliado ainda está longe de reproduzir as circunstâncias reais, por adotar PCM's com características físicas hipotéticas; por não considerar o ganho de calor interno por meio de ocupação humana e equipamentos; e pela geometria da célula não condizer com as características encontradas em edificações convencionais.

Pons e Stanescu (2017) investigaram, por meio de modelo matemático, o potencial dos PMC's em diferentes espessuras na redução de consumo de energia elétrica com ar condicionado em uma sala comercial (Figura 50), considerando as condições climáticas das oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Figura 50 - Planta do modelo físico



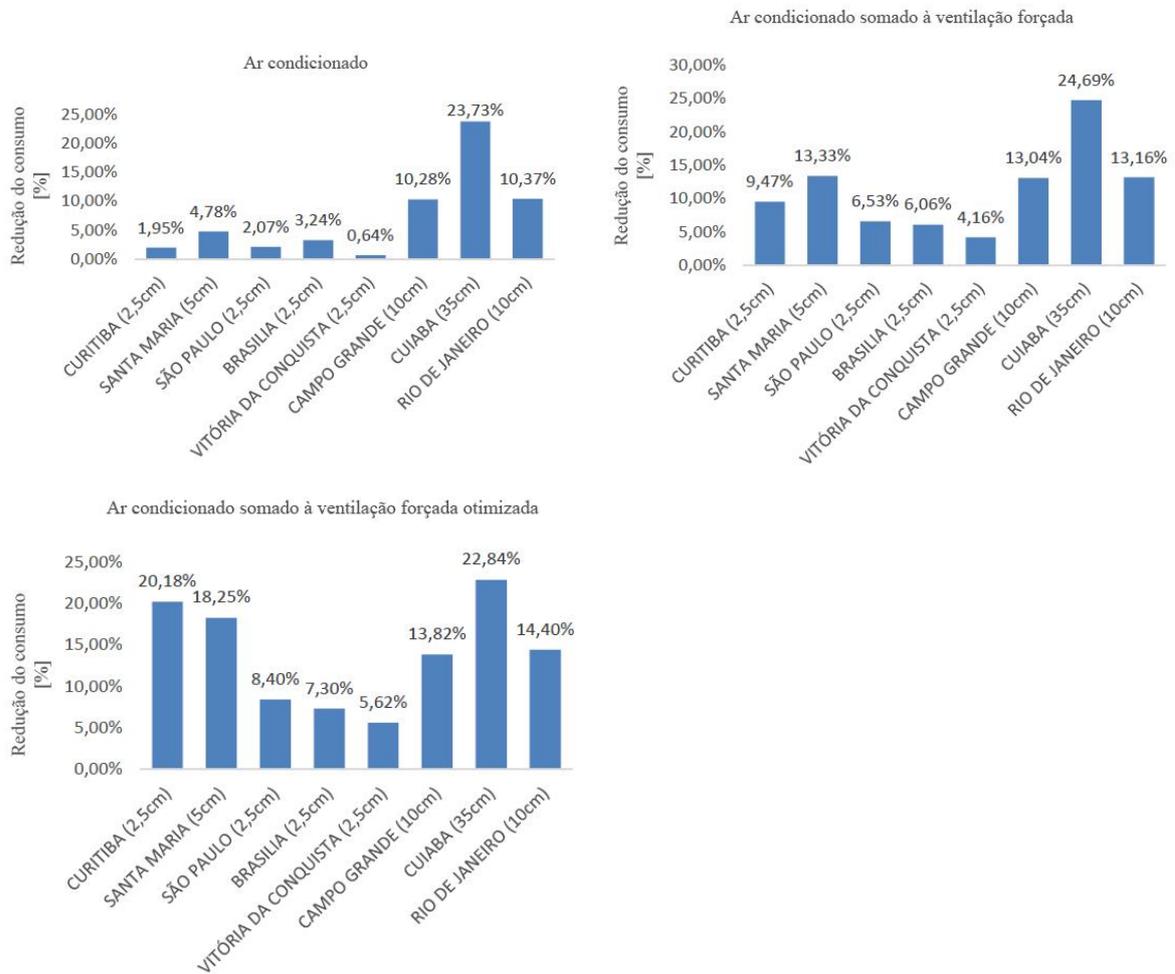
Fonte: Pons e Stanescu (2017)

Para o estudo, foram consideradas 3 diferentes estratégias de condicionamento térmico do ambiente, sendo a primeira composta somente por ar condicionado, a segunda pelo ar condicionado somado à ventilação forçada e a terceira pelo ar condicionado somado à ventilação forçada otimizada (considerando o ciclo de Carnot em espaços de tempo infinitesimais).

O modelo foi considerado com paredes em alvenaria de tijolo maciço com e sem PCM com temperatura de fusão de 26°C, laje mista na cobertura, assoalho de madeira no piso.

Concluiu-se que todas as condições climáticas brasileiras apresentaram reduções de consumo de energia ao se adotar o PCM junto a envoltória com qualquer umas das estratégias de condicionamento do ar (Figura 51). Nas condições climáticas dotadas de maior amplitude térmica, como na zona bioclimática 7 (Cuiabá), foram identificados os melhores resultados. No entanto deve-se ressaltar que as mesmas condições climáticas requerem uma maior espessura de PCM, o que pode, por ventura, vir a inviabilizar a adoção do material.

Figura 51 - Comparativo de redução do consumo no cenário somente com ar condicionado, ar condicionado somado à ventilação forçada e ar condicionado somado à ventilação forçada otimizada, respectivamente.



Fonte: Pons e Stanescu (2017)

O estudo de Pons e Stanescu (2017) poderia apresentar melhores resultados, caso fossem adotados PCM's com maior temperatura de fusão, tal como apresentado por Brito et. al (2017), ou então a adoção do sistema de ventilação noturna como forma de auxiliar uma maior eficácia do material em garantir um consumo energético mais baixo, tal como apresentado por Solgi, Fayaz e Kari (2016).

Leitzke (2021) em sua dissertação de mestrado verificou o impacto da utilização de PCMs como elementos regulatórios para inércia térmica nas paredes externas e cobertura de uma edificação nas ZBs 1, 2 e 3 do Brasil.

Figura 52- Modelo 3D da edificação estudada



Fonte: Leitzke (2021)

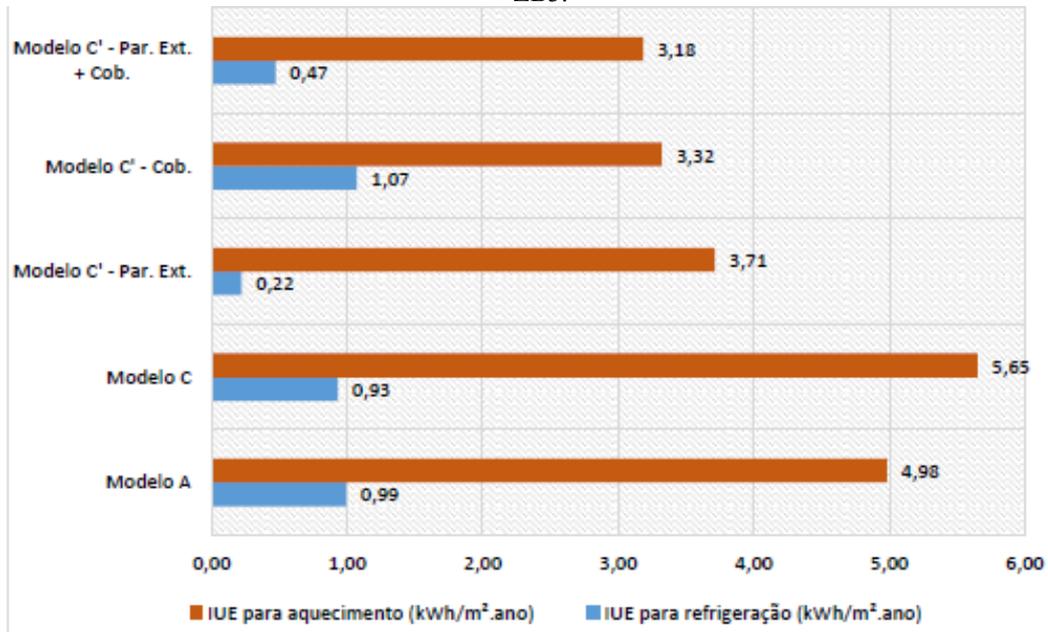
Inicialmente foram feitas simulações em quatro modelos de envoltória sem a doção de PCM: modelo A (alvenaria com isolante nas paredes e laje com isolante na cobertura- seguindo os princípios da Standard Passive House), B(alvenaria nas paredes e telha de fibrocimento, câmara de ar e forro de gesso na cobertura- seguindo os limites mínimos da NBR 15.575), C (sistema leve com isolante nas paredes e laje com isolante na cobertura) e D (sistema leve sem isolante nas paredes e laje com isolante na cobertura).

Posteriormente os modelos foram testados com juto ao PCM, ora na cobertura, ora na parede, e por fim em ambos.

Os resultados mostraram que a aplicação dos PCMs contribuiu com a redução das necessidades energéticas da habitação estudada, desta forma o material microencapsulado se mostrou eficaz, em uma proporção de 20% da composição do revestimento interno, de contribuir para a redução de consumo de energia elétrica para condicionamento térmico.

Os modelos com maior isolamento térmico na envoltória, quando somado ao PCM na em uma vedação leve (Modelo C'), contribuiu para melhoria das condições energéticas da habitação, sobretudo quando aplicado tanto na cobertura, quanto nas paredes externas. Desta forma, os resultados obtidos destacam a importância da aplicação do PCM associado ao isolamento térmico para a melhoria do desempenho energético da edificação nas ZBs 1, 2 e 3 (Figura 53).

Figura 53- Resultados de Intensidade do uso de energia elétrica para os modelos com menor transmitância na ZB3.



Fonte: Leitzke (2021)

Por meio do estado da arte apresentado anteriormente, é possível fazer algumas considerações, tais como as condições climáticas nas quais o material é mais indicado para se proporcionar um maior conforto térmico ao usuário, ou para se reduzir o consumo de energia em diversas tipologias de edificação.

Dentre todas as condições climáticas, a utilização de PCM junto à envoltória se apresentou mais promissora naquelas que apresentam maiores amplitudes térmicas, caracterizadas pela presença de temperaturas elevadas durante o período diurno, e mais baixas durante o período noturno. Desta forma, o material contribui, de forma bastante eficaz, para a redução dos extremos de temperatura, propiciando assim um aumento significativo na ocorrência de temperaturas mais próximas à faixa de conforto térmico.

É importante, no entanto, considerar que as mesmas condições climáticas podem requerer uma maior espessura do material, caso não sejam adotados PCM's com temperaturas de fusão adequados, e sem a utilização de estratégias passivas auxiliares, o que pode vir a inviabilizar a utilização do material em alguns casos.

Uma forma de proporcionar uma maior eficácia na melhoria do desempenho térmico de edificações com a adoção de PCM's é a utilização destes em conjunto da ventilação natural, especialmente no período noturno. A combinação dessa estratégia permite ao PCM completar,

de forma mais eficiente, seu ciclo de fusão, uma vez que o permite dissipar o calor armazenado durante períodos mais quentes do dia.

Em locais cujas condições climáticas se apresentam mais amenas, a utilização do PCM se mostra benéfica nos dias mais quentes do ano, contribuindo para redução da temperatura no pico de calor. Nessas localidades, no período mais frio do ano o material também pode auxiliar na redução de fluxo de calor do meio interno para o externo.

Em climas quentes e úmidos, devido à baixa amplitude térmica diária, a utilização do material não se mostra tão vantajosa quando utilizada para aumentar a inércia térmica de envoltórias de edificações. Neste caso há uma redução na dissipação do calor do meio interno para o meio externo, podendo resultar no aumento do consumo de energia elétrica para resfriamento da edificação.

Pode-se concluir também que a adoção de PCM deve ser bastante estudada, principalmente com relação a sua temperatura de fusão, para que esteja adequada ao clima ao que está inserido. Ao não atingir a temperatura de fusão, e conseqüentemente, não completar o ciclo, o PCM não gera o armazenamento de calor latente de forma eficiente, resultando em um baixo aproveitamento dos potenciais do material.

O correto posicionamento do PCM dentro dos componentes que compõem uma edificação é de grande importância para que a estratégia contribua para um melhor desempenho térmico da edificação. Uma vez que o PCM venha a ser utilizado com a função de reduzir a amplitude térmica no ambiente interno, o material tem maior eficácia quando aplicado o mais próximo possível da superfície interna da vedação.

Apesar de apenas um estudo, dentre os apresentados, abordar o tema, há a possibilidade de se utilizar o material para se reduzir o ganho de calor do meio externo para o interno. Neste caso a utilização do PCM se torna mais eficaz quando utilizado junto a superfície externa da vedação, armazenando o calor durante o período mais quente do dia e dissipando-o no meio externo no período mais frio.

Por fim, é possível constatar, também, que a utilização do PCM microencapsulado é a mais frequente como demonstra a Tabela 6. A adoção do material microencapsulado permite que seja misturado a materiais de acabamentos como o gesso ou a argamassa, e desta forma se apresentando mais próximo à superfície interior da vedação. O PCM macroencapsulado, por sua vez, gera a necessidade de um acabamento na superfície interna da vedação, para proteger o material, diminuindo, assim, sua eficácia.

Tabela 6 – Estudos apresentados no estado da arte e o encapsulamento do PCM

Estudo	Encapsulamento
BRITO et.al, 2017	Hipotético
ASCIONE et. al, 2014	Microencapsulado
SOLGI, FAYAZ, e KARI, 2016	Microencapsulado
KUZNIK e VIRGONE, 2009	Microencapsulado
SHILEI, NENG e GUOHUI, 2006	Microencapsulado
PONS e STANESCU, 2017	Microencapsulado
BELTRÁM e MARTINEZ-GOMEZ, 2019	Microencapsulado
KARAOULIS, 2017	Não há informação
TARDIEU et.al, 2011	Microencapsulado
FERSTER et. al, 2017	Não há informação
LAAOUATNI et. al, 2016	Macroencapsulado
AHMADI e SHAHCHERAGHIAN, 2015	Macroencapsulado
IMGHORE et. al, 2021	Microencapsulado
ALASSAAD et. al, 2023	Microencapsulado
AL-YASIRI e SZABÓ, 2022	Macroencapsulado
PARK et. al, 2023	Microencapsulado
LIU et. al, 2022	Não há informação
Al-Absi et. al, 2020	Não há informação
Leitzke, 2021	Microencapsulado

Fonte: do autor

2.4 SIMULAÇÃO DE PCM'S NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como pôde-se verificar no item 2.3, há diversas formas de se estudar o impacto do PCM no desempenho térmico de edificações. Podem ser utilizados ensaios e medições *in loco*, simulação por modelo matemático ou computacional. No entanto, a simulação computacional se apresenta como a ferramenta mais frequente, devido a maior praticidade e menor custo de execução (SAFFARI et. al 2017).

Segundo Saffari et. al (2017), as ferramentas de Simulação computacional para análise de PCM's na construção civil mais utilizadas são o *EnergyPlus*, o TRNSYS e o ESP-r. O *EnergyPlus*, por incluir vários algoritmos que calculam as trocas térmicas, ser gratuito, amplamente utilizado internacionalmente e já ter sido validado analiticamente, comparativamente e experimentalmente, é o software proeminente e mais comum, o que pode ser verificado, também, no item 2.3 do corpo deste trabalho (Tabela 7).

Tabela 7– Estudos apresentados no estado da arte, método de estudo e de simulação do PCM

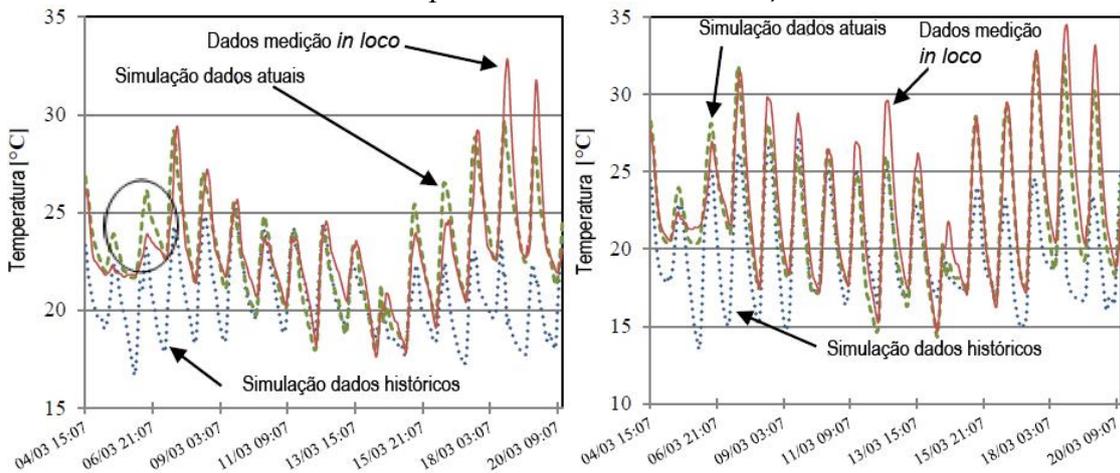
Estudo	Método de estudo	Software
BRITO et.al, 2017	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
ASCIONE et. al, 2014	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
SOLGI, FAYAZ, e KARI, 2016	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
KUZNIK e VIRGONE, 2009	Medição <i>in loco</i>	-
SHILEI, NENG e GUOHUI, 2006	Medição <i>in loco</i>	-
PONS e STANESCU, 2017	Modelo matemático e simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
BELTRÁM e MARTINEZ-GOMEZ, 2019	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
KARAOULIS, 2017	Simulação computacional	<i>DesignBuilder</i>
TARDIEU et.al, 2011	Simulação computacional e medição <i>in loco</i>	<i>EnergyPlus</i>
FERSTER et. al, 2017	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>
LAAOUATNI et. al, 2016	Medição <i>in loco</i>	-
AHMADI e SHAHCHERAGHIAN, 2015	Modelo matemático	-
IMGHOURE et. al, 2021	Modelo matemático	-
ALASSAAD et. al, 2023	Modelo matemático	-
AL-YASIRI e SZABÓ, 2022	Medição <i>in loco</i>	-
PARK et. al, 2023	Medição <i>in loco</i>	-
LIU et. al, 2022	Medição <i>in loco</i>	-
Al-Absi et. al, 2020	Simulação computacional	<i>DesignBuilder</i>
Leitzke, 2021	Simulação computacional	<i>EnergyPlus</i>

Fonte: do autor

Dentre os estudos já apresentados, cabe ressaltar o de TARDIEU et. al (2011) que, primeiramente, buscou validar o modelo de simulação de PCM no *EnergyPlus*, comparando seus resultados com medição *in loco*. Os resultados da simulação apontaram resultados bastante

semelhantes aos medidos in loco (Figura 54 e Tabela 8), especialmente quando adotado um arquivo climático com os dados adquiridos nos dias do experimento, mostrando assim a confiabilidade da ferramenta.

Figura 54 - Temperatura dentro do modelo com e sem PCM, respectivamente, durante o período de 04 a 20 de março.



Fonte: TARDIEU et. al (2011)

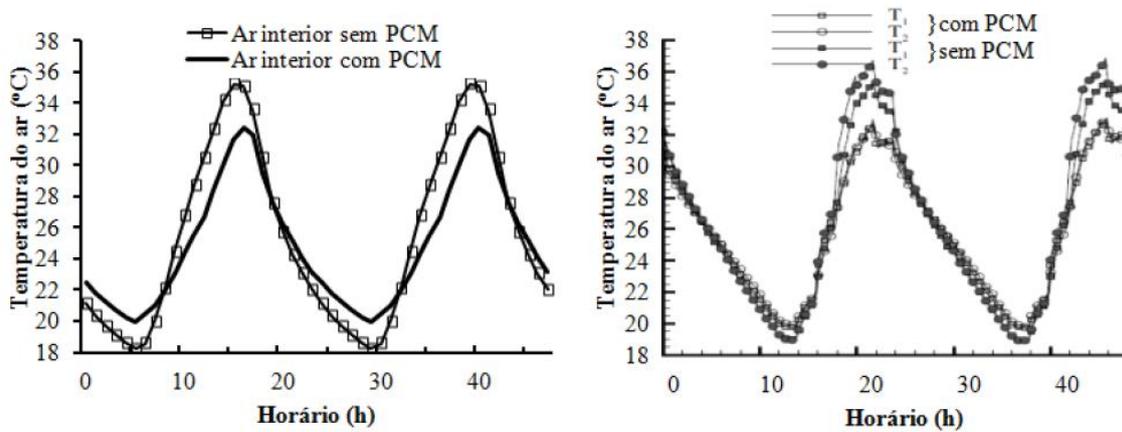
Tabela 8- Desvio médio das simulações para o período de 04 a 20 de março.

Período C	
C1 (sem PCM)	C2 (com PCM)
$\bar{\Delta}_a(Sim/hist) = 13.4 \%$	$\bar{\Delta}_a(Sim/hist) = 10.3 \%$
$\bar{\Delta}_b(Sim/atual) = 5.0 \%$	$\bar{\Delta}_b(Sim/atual) = 3.6 \%$

Fonte: TARDIEU et. al (2011)

Brito et. al (2017) também procuraram validar a simulação de PCM's no *EnergyPlus* 8.1. com base no experimento in loco realizado por Kuznik e Virgone (2009), já mencionado no corpo deste texto. Os autores obtiveram boa relação entre os resultados obtidos nas medições in loco e os encontrados por meio de simulação (Figura 55).

Figura 55 - Gráficos da temperatura do ar interior nas simulações de Brito et. al (2017) (à esquerda) e nas medições de Kuznik e Virgone (2009) (à direita)



Fonte: Kuznik e Virgone (2009)

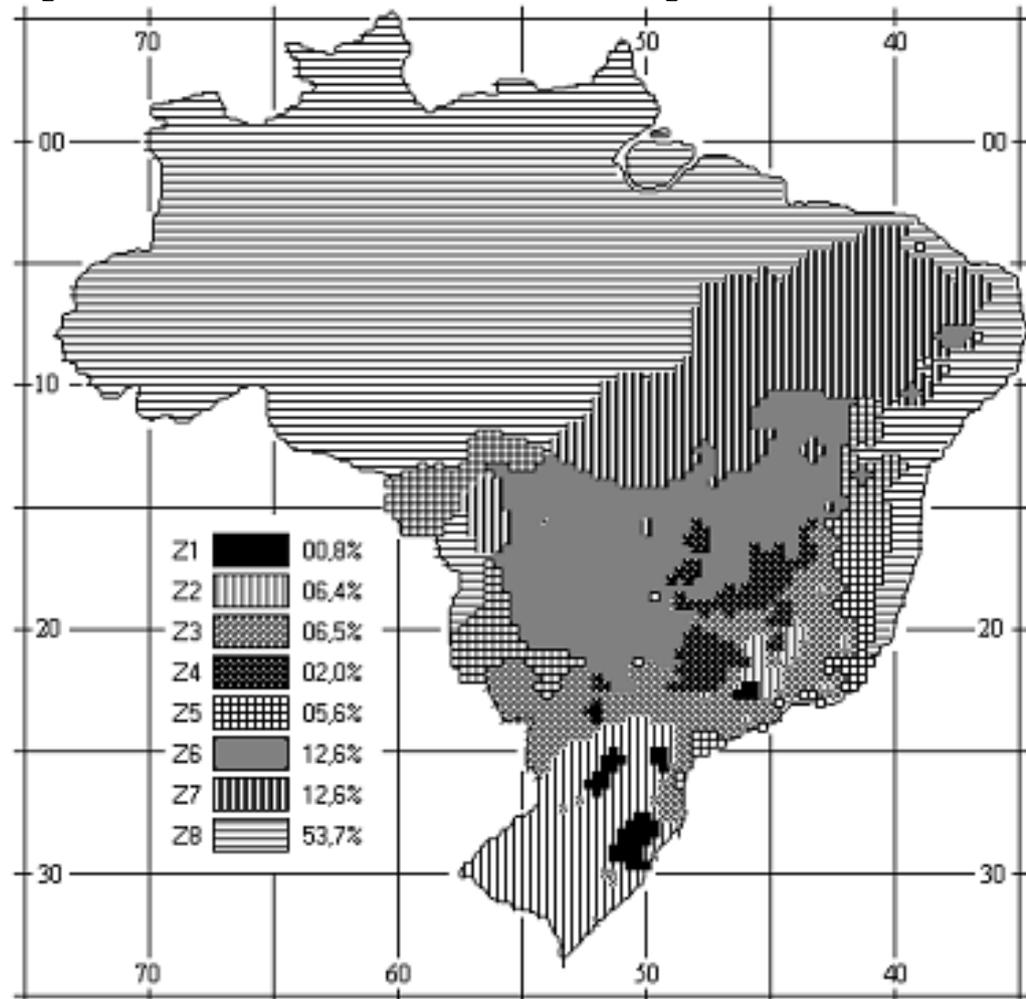
2.5 ATRASO TÉRMICO, CAPACIDADE TÉRMICA E AS NORMAS VIGENTES NO BRASIL

No Brasil, a utilização de sistemas leves de construção esbarra em questões normativas no que refere ao seu desempenho térmico. Esta barreira ocorre devido a necessidade de adoção de materiais pesados, com maior capacidade térmica e atraso térmico em envoltórias, sobretudo em paredes para que se reduza a ocorrência de temperaturas extremas, diminuindo assim a amplitude térmica diária no ambiente interno.

A NBR 15220 (ABNT, 2005), intitulada “Desempenho térmico de edificações”, traz em seu terceiro, de cinco segmentos, o zoneamento bioclimático brasileiro, tal como recomendações e diretrizes construtivas, sem caráter normativo, para adequação climática de habitações unifamiliares de interesse social em cada uma destas zonas bioclimáticas.

Este zoneamento divide o território brasileiro em oito diferentes zonas de acordo com as condições climáticas encontradas em cada uma das partes do país (Figura 56).

Figura 56 – Zoneamento bioclimático brasileiro segundo a NBR15220



Fonte: ABNT (2005)

Dentre as diretrizes construtivas abordadas na norma, estão as configurações construtivas de paredes e coberturas que são recomendadas para cada uma das zonas bioclimáticas brasileiras (Tabela 9). Tais recomendações são feitas quanto às propriedades físicas dos componentes construtivos, tais como atraso térmico, transmitância térmica e fator solar (Tabela 10).

Tabela 9 - Tipos de vedações externas para cada zona bioclimática brasileira segundo a NBR 15220.

Zona bioclimática	Parede	Cobertura
Zn1	Leve	Leve isolada
Zn2	Leve	Leve isolada
Zn3	Leve refletora	Leve isolada
Zn4	Pesada	Leve isolada
Zn5	Leve refletora	Leve isolada
Zn6	Pesada	Leve isolada
Zn7	Pesada	Pesada
Zn8	Leve refletora	Leve refletora

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

Tabela 10– Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa segundo a NBR 15220.

Vedações externas		Transmitância térmica - U W/m ² .K	Atraso térmico - φ Horas	Fator solar - FS _o %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$	$FS_o \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\varphi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\varphi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Desta forma, é possível verificar que em três das oito zonas bioclimáticas é indicada a adoção de paredes dotadas de um atraso térmico superior a 6,5 horas, e em uma delas é recomendada a adoção de coberturas provida da mesma propriedade. Somando a área coberta por essas zonas observa-se que a norma recomenda o uso de paredes pesadas para mais de um quarto do território nacional. Dentro dessa região, para a zona 7, que representa 12,6% da área do país, recomenda-se ainda o uso de coberturas pesadas.

A NBR15575: Edificações Habitacionais - Desempenho (ABNT, 2021), traz em seu quarto capítulo, a partir do método simplificado, requisitos e critérios para a verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de paredes. São feitas recomendações quanto às propriedades físicas dos componentes construtivos, como capacidade e transmitância térmica a serem adotadas em paredes externas.

Ao analisar a norma, pode-se verificar que há, em sete das oito zonas bioclimáticas (ABNT, 2005), a indicação da utilização de paredes externas dotadas de capacidade térmica superior a 130 KJ/m².K (Tabela 11).

Tabela 11-Limites de capacidade térmica segundo a NBR15575

Capacidade térmica (CT)	
kJ / m ² .K	
Zona 8	Zonas 1,2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: ABNT (2021)

Na mesma norma, no entanto, o capítulo cinco somente traz recomendações quanto à transmitância térmica a ser adotada em coberturas não apresentando a necessidade de adoção de materiais com maior capacidade térmica e que resultem em um maior atraso térmico na cobertura.

As mesmas recomendações de envoltória apresentadas na NBR15575 (ABNT, 2021), são feitas pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), do PROCEL/INMETRO.

2.6 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A implementação de sistemas leves de construção surge como uma promissora solução para reverter o cenário nacional de déficit habitacional, destacando-se por sua rapidez na execução e reduzido desperdício de materiais. Além disso, tais sistemas proporcionam a construção com menor consumo de água, contribuindo para práticas mais sustentáveis e minimizando o impacto ambiental.

Entretanto, um desafio significativo que se apresenta é o baixo desempenho térmico dessas estruturas, uma questão salientada por normativas em vigor no Brasil. Este fator se torna um obstáculo à implementação generalizada de sistemas leves em edificações habitacionais. Nesse contexto, surge a relevância dos Phase Change Materials (PCM), materiais capazes de aumentar a inércia térmica de vedações mesmo em pequenos volumes, como explorado ao longo deste capítulo.

A introdução dos PCM em conjunto com sistemas leves de construção apresenta um potencial transformador no desempenho térmico dessa configuração de envoltória, influenciando positivamente toda a cadeia produtiva da construção civil no Brasil. Estudos que analisam o comportamento dos PCM em diversas condições climáticas, de envoltória e de uso, evidenciam seu potencial em adaptar-se às condições brasileiras.

Assim, torna-se fundamental explorar os PCM como elementos cruciais para aprimorar o desempenho térmico de sistemas leves de construção. Esta abordagem não apenas visa superar o desafio térmico inerente a esses sistemas construtivos, mas também propõe uma inovação significativa que pode reverberar positivamente em termos de eficiência energética e sustentabilidade na construção civil brasileira.

3 MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO PILOTO

Com o intuito de verificar o impacto da utilização de PCM's junto a sistemas leves de construção nas condições térmicas internas de HUPP's, foi proposta, primeiramente, a simulação computacional de um modelo simplificado sob as condições climáticas de duas cidades brasileiras, representando zonas bioclimáticas nas quais a utilização de envoltórias que apresentam um elevado atraso térmico é apontado pelas normativas como benéfico.

Primeiramente neste capítulo, foi feita a caracterização climática das cidades selecionadas para o estudo.

Em seguida, foi definido o modelo computacional para a simulação, onde são descritas as características geométricas, os materiais empregados, as cargas térmicas internas, o regime de ventilação e a configuração da envoltória.

Por fim, chegou-se aos resultados do estudo piloto por meio de simulações computacionais no software *EnergyPlus 9.2* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019) e arquivo climático de extensão “.epw” disponíveis em LABEEE (2016).

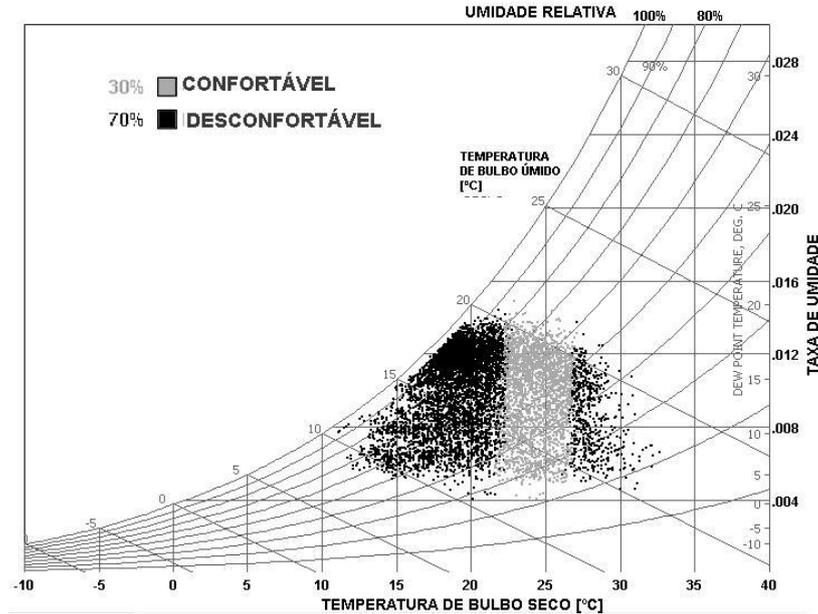
3.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

Para as simulações do estudo piloto foram selecionadas as cidades de Brasília e Goiânia, por apresentarem características climáticas que, segundo a revisão bibliográfica, são propícias a adoção de PCM's junto à envoltória, atuando como um agente passivo de condicionamento térmico.

3.1.1 Brasília

Brasília, capital federal do Brasil, localizada na latitude 15°50'16" Sul e longitude 47°42'48" Oeste, insere-se, segundo a NBR15220 (ABNT, 2005) na zona bioclimática 4. Apresenta condições de desconforto em 70% das horas do ano, sendo destas a maioria por frio, apesar de também apresentar desconforto por calor, representados na Figura 57 pelos pontos pretos à direita da zona de conforto (nuvem de pontos em cinza).

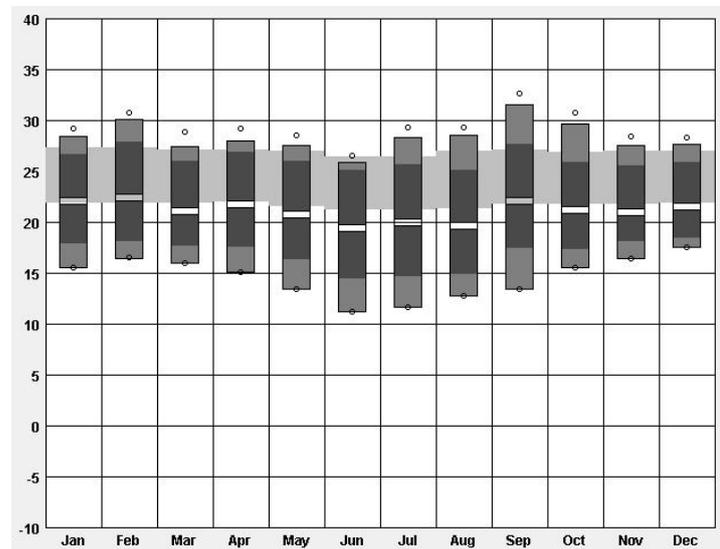
Figura 57 - Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Brasília, DF. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.



Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

A cidade registra amplitude térmica anual não muito elevada, por estar localizada em uma latitude entre o equador e o trópico de capricórnio, sendo recorrente o registro de temperaturas médias das mínimas próximas a 13°C no outono e inverno e temperaturas médias das máximas acima de 25°C na primavera e verão (Figura 58).

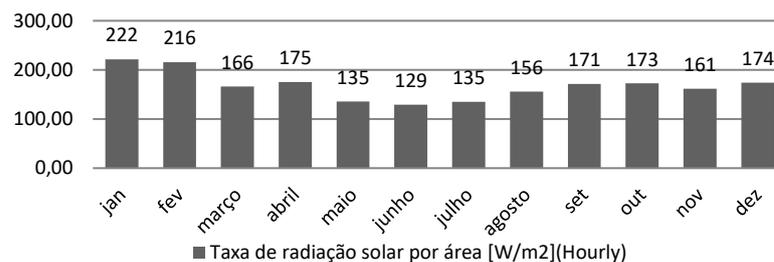
Figura 58 - Temperaturas médias mensais (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Brasília, DF.



Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Ainda fruto de sua localização geográfica, Brasília apresenta taxa de radiação solar bem distribuída durante o ano, mas com maior incidência nos meses do verão, como é possível verificar na Figura 59.

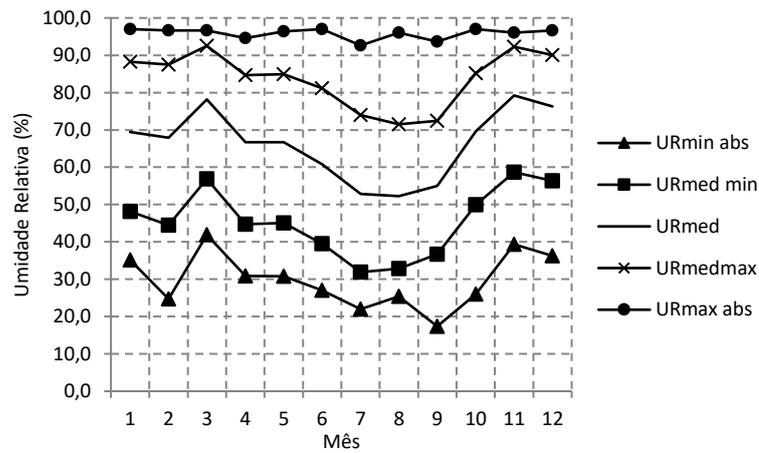
Figura 59 - Taxa de radiação solar incidente em plano horizontal [W/m^2] h, em Brasília/DF.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

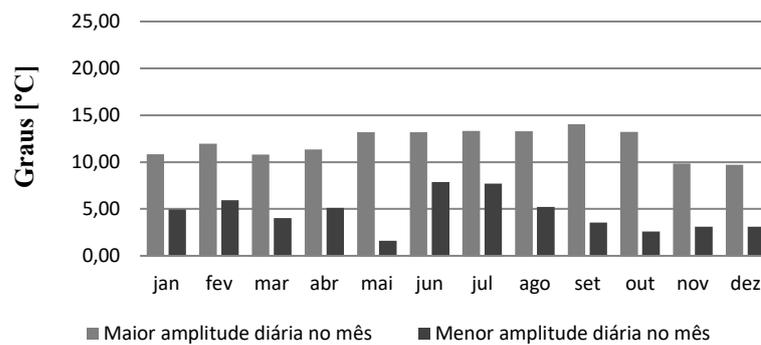
A baixa umidade relativa do ar, que é frequente ao longo do ano, mas que se intensifica no período que se estende de maio a outubro quando são registrados valores inferiores a 20% (Figura 60), favorece a ocorrência de maiores amplitudes térmicas diárias (Figura 61 e Figura 62), resultando em variações de temperaturas acima $10^{\circ}C$ em quase um terço do ano (Figura 63).

Figura 60 - Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Brasília, DF.



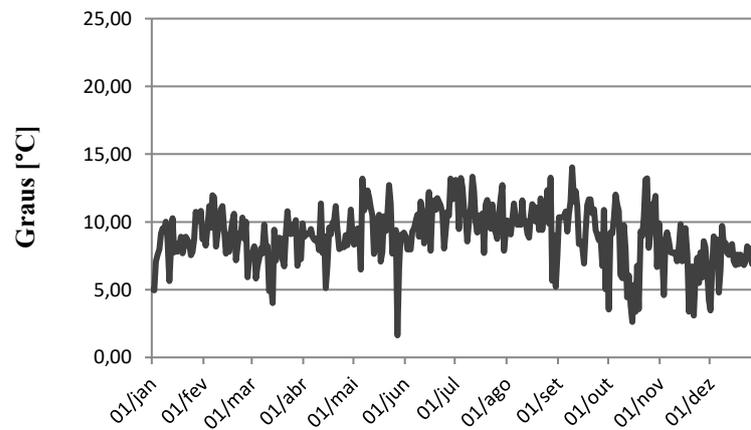
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 61 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Brasília, DF.



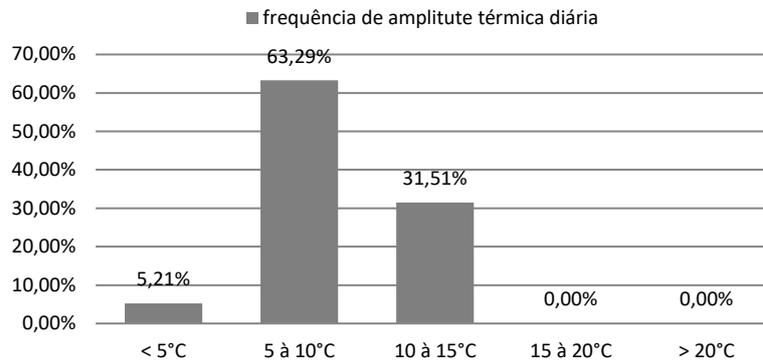
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 62 - Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Brasília, DF.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 63 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Brasília, DF.

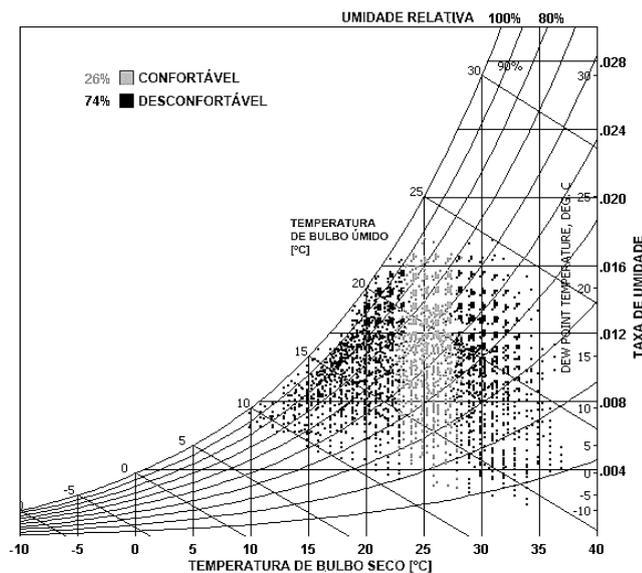


Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

3.1.2 Goiânia

Inserido, segundo a NBR15220 (ABNT, 2005), na zona bioclimática 6, a cidade de Goiânia localiza-se na latitude $16^{\circ}40'48''$ Sul e longitude $49^{\circ}15'18''$ Oeste. Esta apresenta condições de conforto térmico em pouco mais de um quarto das horas do ano, sendo as condições de desconforto por calor ou por frio distribuídas de forma equilibrada (Figura 64).

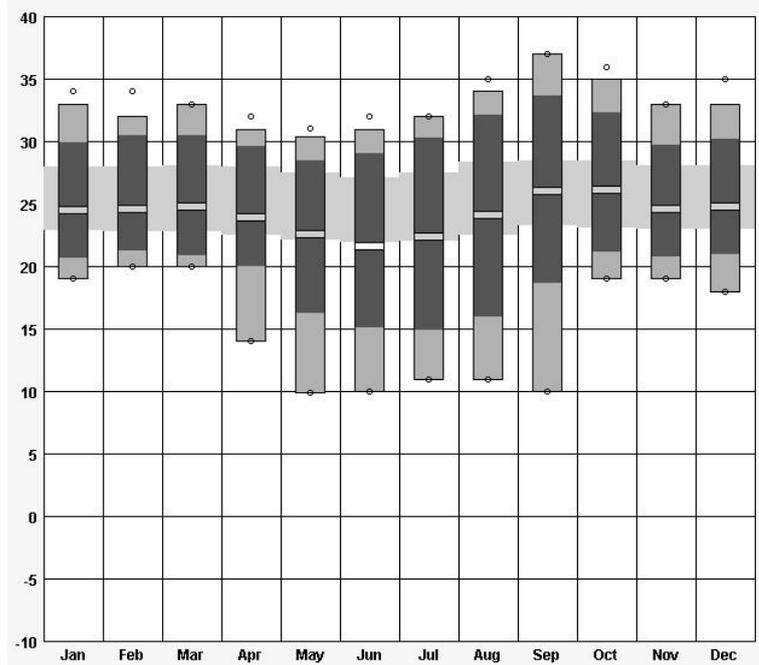
Figura 64- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Goiânia, GO. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.



Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

A cidade não registra grande amplitude térmica anual, com ocorrência de temperaturas médias próximas a 22°C no inverno e temperaturas médias próximas a 25°C na primavera, apresentando mais condições de calor durante esta estação do ano do que no verão. Durante quase todo o ano se apresentam temperaturas médias dentro da zona de conforto térmico (Figura 65).

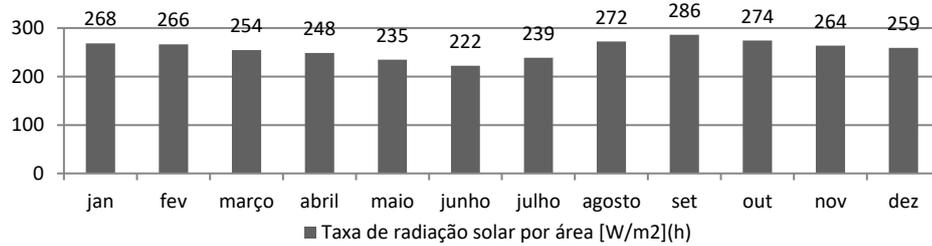
Figura 65- Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Goiânia, GO.



Fonte: Elaborado no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015) e por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Os meses mais quentes são os mesmos que apresentam maiores taxas de incidência de radiação solar, e os mais frios as menores taxas (Figura 66).

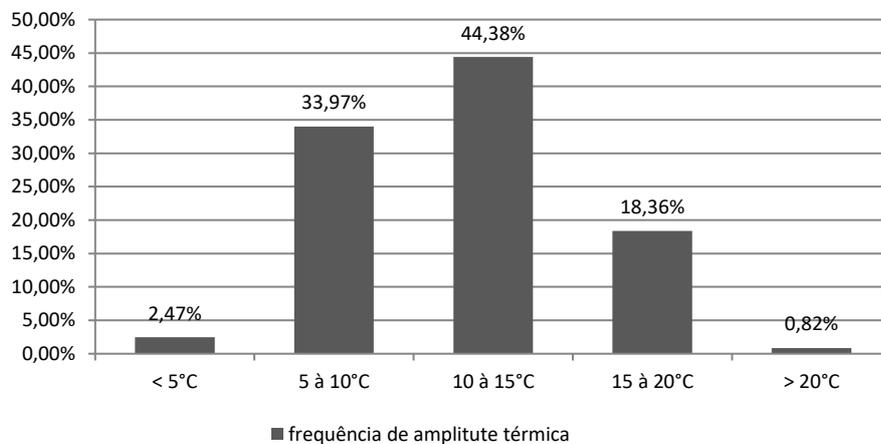
Figura 66- Taxa de radiação solar incidente em plano horizontal [W/m^2] h, em Goiânia, GO.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

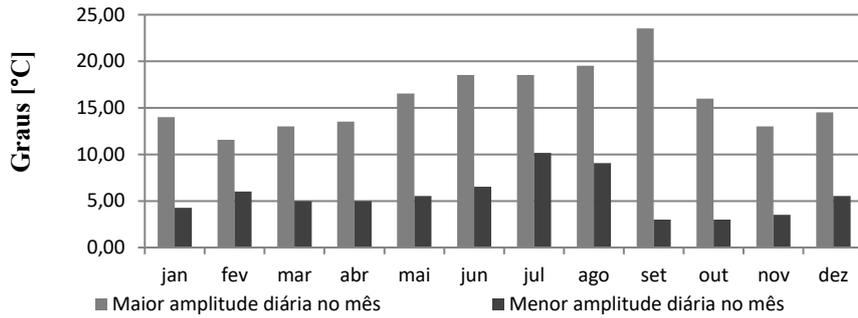
Em quase dois terços dos dias, Goiânia apresenta amplitude térmica diária superior a 10°C (Figura 67), sendo os meses que se estendem de maio a outubro aqueles com maior variação de temperatura em um mesmo dia (Figura 68 e Figura 69) e com menor umidade relativa do ar (Figura 70). Conseqüentemente, neste período, é possível verificar temperaturas bastante elevadas, acima dos 35°C , e temperatura moderadamente baixas, próximas dos 10°C , nesta localidade.

Figura 67- Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Goiânia, GO.



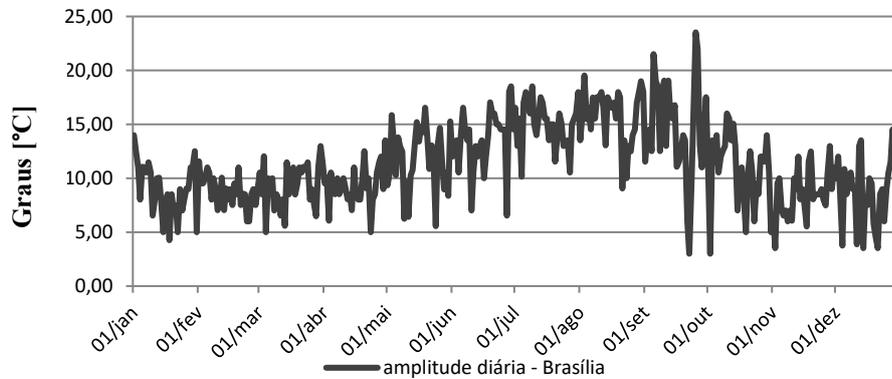
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 68 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Goiânia, GO.



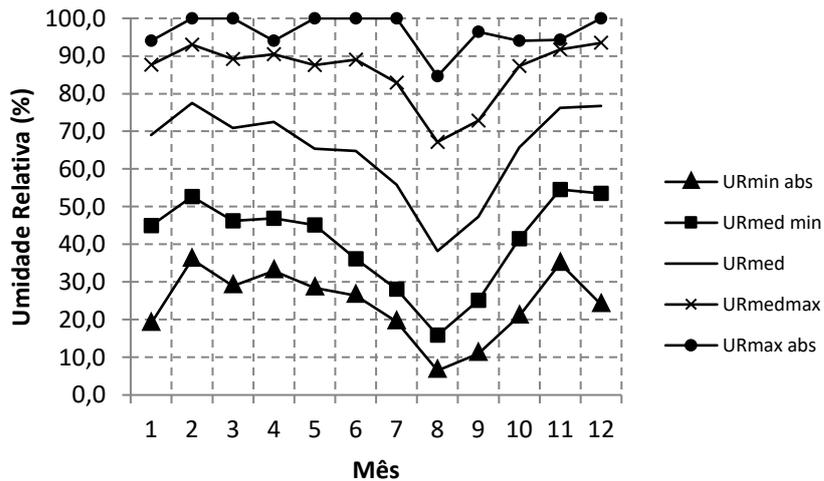
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 69- Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Goiânia, GO.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 70- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Goiânia, GO.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

3.1.3 Síntese da caracterização climática

As duas cidades selecionadas para o estudo piloto, representando duas zonas bioclimáticas com grande potencial para a adoção de PCM's junto a envoltória leve, apresentam condições climáticas dotadas de algumas semelhanças.

Ambas são dotadas de invernos com temperaturas mínimas moderadamente baixas, mas com temperatura média pouco abaixo da zona de conforto térmico. Apesar de ambas apresentarem grande amplitude térmica diária em boa parte do ano, a cidade de Goiânia a apresenta de forma mais pronunciada, com a ocorrência de temperaturas mais extremas.

Figura 71- Síntese comparativa das condições climáticas das duas zonas bioclimáticas analisadas.

ZB	Cidade	Condições climáticas
4	Brasília	Temperaturas moderadamente baixas no inverno e moderadamente altas na primavera. Amplitude térmica diária moderadamente alta na maioria dos dias, mas mais elevada no período que compreende de maio à outubro.
6	Goiânia	Temperaturas moderadamente baixas no inverno e altas na primavera. Amplitude térmica diária alta na maioria dos dias, mas mais acentuada no período que compreende de abril à setembro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

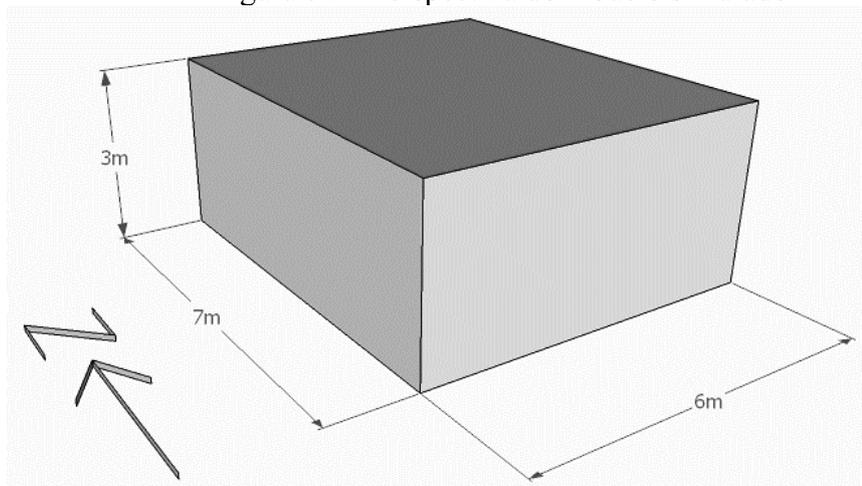
Para a execução das simulações computacionais do estudo piloto, adotou-se o software *EnergyPlus*, versão 9.2 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019). As informações inseridas nas simulações computacionais abrangeram a composição geométrica do modelo, as cargas térmicas internas, propriedades dos materiais construtivos adotados na envoltória e seu padrão de uso e ocupação.

Com o intuito de comparar o desempenho térmico dos modelos e seus componentes de envoltória, ambos foram simulados apenas com a variação do sistema construtivo das paredes e coberturas.

3.2.1 Geometria do modelo

Com o propósito de se executar um estudo preliminar sobre as potencialidades do uso de PCM's em uma HUPE, o modelo adotado para o estudo piloto procurou reproduzir de forma simplificada o seu volume e área de envoltória (modelo *shoebox*). Desta forma, o modelo consistiu em uma única zona térmica com 42 m² de área, representando uma edificação constituída de dois dormitórios, uma sala, uma cozinha e um banheiro, sem a presença de janelas ou portas, com infiltração de ar controlada e com a presença de um único elemento que representa toda massa das paredes internas ao mesmo (Figura 72).

Figura 72 – Perspectiva do modelo simulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Cargas térmicas internas

As cargas térmicas internas provenientes de iluminação, equipamentos e ocupação humana adotadas no modelo seguiram os valores indicados pela NBR15575 (ABNT, 2021) (Tabela 12 e Tabela 13).

Tabela 12 – Padrões de ocupação diários dos ambientes de permanência prolongada

Horário	Ocupação		
	Sala (%)	Dormitório (%)	Uso misto (%)
00:00 – 00:59	100	0	100
01:00 – 01:59	100	0	100
02:00 – 02:59	100	0	100
03:00 – 03:59	100	0	100
04:00 – 04:59	100	0	100
05:00 – 05:59	100	0	100
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	0	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	50	50
15:00 – 15:59	0	50	50
16:00 – 16:59	0	50	50
17:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: proposta de revisão da NBR15575 (ABNT, 2021)

Tabela 13 - Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos ambientes de permanência prolongada

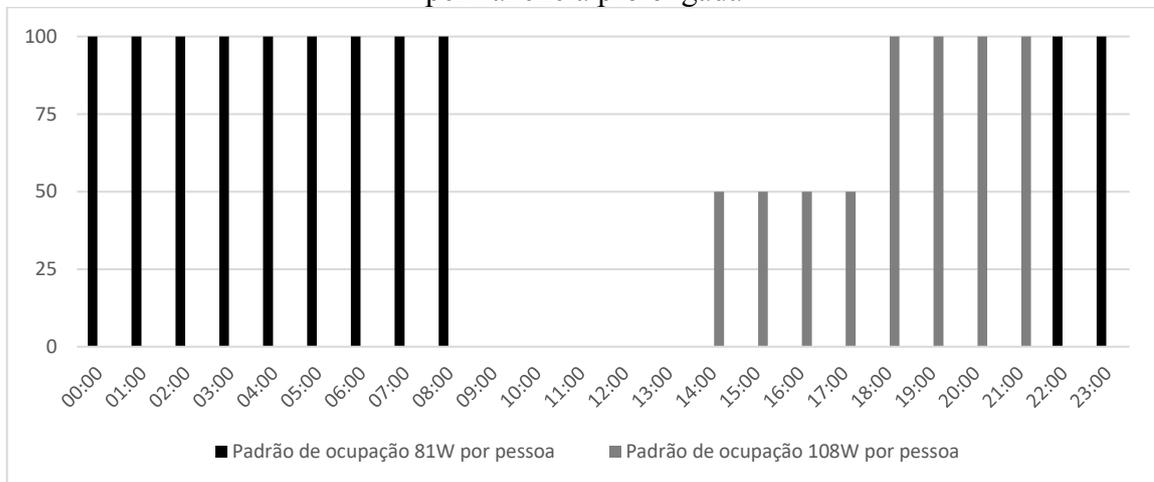
Horário	Iluminação		
	Sala (%)	Dormitório (%)	Uso misto (%)
00:00 – 00:59	0	0	0
01:00 – 01:59	0	0	0
02:00 – 02:59	0	0	0
03:00 – 03:59	0	0	0
04:00 – 04:59	0	0	0
05:00 – 05:59	0	0	0
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	0	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	0	0
15:00 – 15:59	0	0	0
16:00 – 16:59	0	100	100
17:00 – 17:59	0	100	100
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: proposta de revisão da NBR15575 (ABNT, 2021)

Uma vez que o modelo se constitui em uma única zona térmica, mas que representa os usos de três ambientes de permanência prolongada, sendo eles dois dormitórios e uma sala, as cargas internas e padrões de uso foram unificados.

Desta forma foram aplicados os padrões de ocupação diários em porcentagem, de acordo com o Figura 73, sendo a porcentagem de 100% no padrão de ocupação correspondente a quatro pessoas com taxa metabólica de variando de 81 à 108 W cada uma, dependendo da atividade exercida dentro do ambiente (Tabela 14).

Figura 73- Padrões de ocupação diários e taxa metabólica dos usuários dos ambientes de permanência prolongada



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 14 – Taxas metabólicas e fração radiante para os usuários

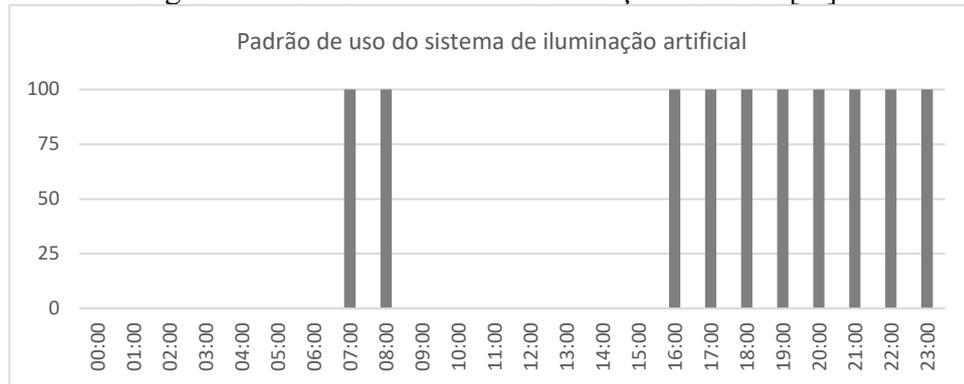
Tabela 12 – Taxas metabólicas e fração radiante para os usuários

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal (W/m^2)	Calor produzido por $1,80 m^2$ de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: NBR15575 (ABNT, 2021)

Da mesma forma, os padrões de uso de iluminação seguiram os valores percentuais propostos na norma, mas considerando todos ambientes de forma simultânea como apresenta a Figura 74. A porcentagem de 100% corresponde a $5 W/m^2$ de densidade de potência instalada de iluminação, conforme Tabela 15.

Figura 74 – Padrão de uso de iluminação artificial [%].



Fonte: NBR15575 (ABNT, 2021)

Tabela 15 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível

Ambiente	DPI (W/m ²)	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23
Uso misto	5,00	0,32	0,23
	5,00	0,32	0,23

Fonte: NBR15575 (ABNT, 2021)

Já as cargas internas de equipamentos foram consideradas 120 W totais para equipamentos diversos, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 – Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos ambientes de permanência prolongada

Ambiente	Período de uso	Potência (W)	Fração radiante
Sala	14:00 às 21:59	120	0,30
Uso misto	14:00 às 21:59	120	0,30

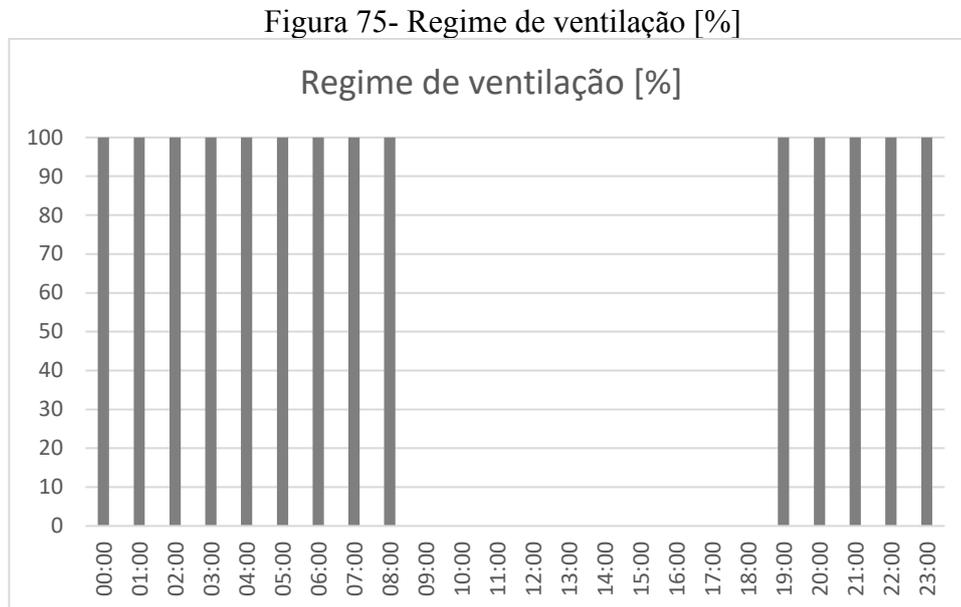
NBR15575 (ABNT, 2021)

3.2.3 Regime de ventilação

Para identificar as condições onde o PCM seria favorável ao desempenho térmico da edificação, o estudo piloto foi realizado com a simulação de um regime virtual de ventilação natural, definindo-se as trocas de ar horárias para o modelo, independente do regime de ventos dos arquivos climáticos.

O regime de operação da ventilação natural foi definido de forma a permitir a troca de ar no período noturno, das 19 horas as 8 horas, sempre que a temperatura interna superasse os 24°C e uma vez que a mesma estivesse acima da temperatura do ar externo. Inicialmente, e

somente para o estudo piloto, adotou-se a taxa de 1 troca de ar por hora, ocorrendo no período indicado, conforme a Figura 75.



Fonte: elaborado pelo autor

Tal regime de ventilação foi adotado, por este ser, segundo a revisão bibliográfica, aquele que apresenta as melhores condições para a incorporação de PCM's junto à envoltória, facilitando a ocorrência do ciclo completo de troca de fase e garantindo maior eficácia da ação.

3.2.4 Casos estudados

Para o estudo piloto foram simulados 3 diferentes modelos de configuração da envoltória (Tabela 17), sendo o primeiro (Caso 1), considerado o caso base, em alvenaria e seguindo configurações de envoltória recomendadas pelo método simplificado e prescritivo da NBR 15575 (ABNT, 2021), com capacidade térmica mais elevada entre os casos estudados.

O Caso 2 foi considerado em sistema leve de construção, não atendendo configurações de envoltória recomendadas pelo método simplificado e prescritivo da NBR 15575 (ABNT, 2021), sendo assim desprovido de inércia térmica relevante.

Já o Caso 3 foi considerado no mesmo sistema construtivo do Caso 2, mas com a inclusão de PCM's junto às vedações.

A simulação dos três estudos de caso teve como intuito analisar como o PCM poderia trazer ao sistema leve de construção uma maior inércia térmica na envoltória, gerando assim

uma menor amplitude térmica diária dentro de uma HUPP, tal qual está presente no modelo em alvenaria.

Tabela 17 – Casos simulados

Caso	Paredes externas	Paredes internas	Teto	Telhado
1	Alvenaria	Alvenaria	Laje de concreto	Telha de
2	<i>Drywall</i> isolado	<i>Drywall</i>	Forro de gesso	fibrocimento +
3	<i>Drywall</i> isolado + gesso com 23,25% de PCM	<i>Drywall</i> + gesso com 23,25% de PCM	Forro de gesso com 23,25% de PCM	isolante térmico (lã de vidro)

Fonte: Elaborado pelo autor.

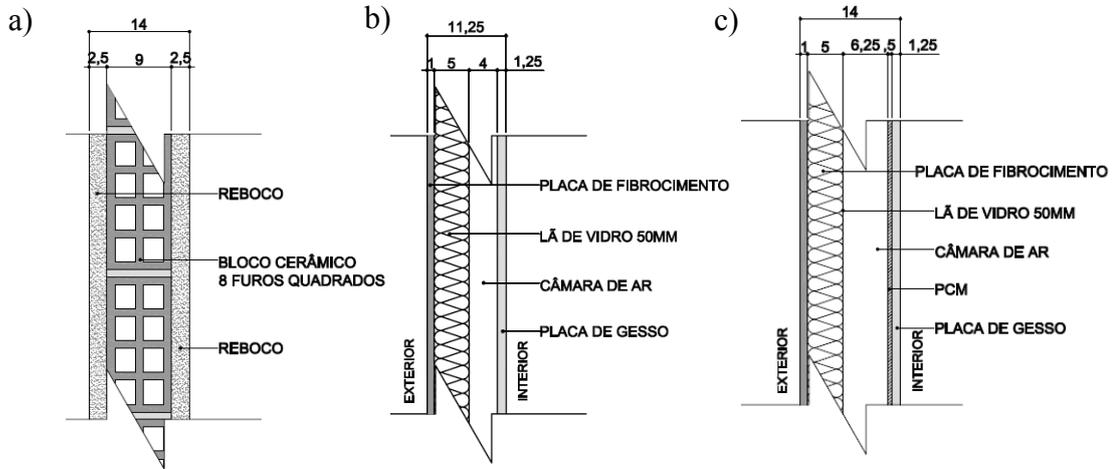
3.2.5 Configurações de envoltória do estudo piloto

No Caso 1, em alvenaria, as paredes externas e internas foram consideradas em tijolo de 8 furos quadrados com revestimento de argamassa (Figura 76 e Figura 77).

No Caso 2, caracterizado por um sistema mais leve de construção, foram configuradas duas diferentes composições de paredes: uma externa, que divide o ambiente interno e o meio externo, e outra interna, que divide ambientes internos da edificação. Desta forma, o Caso 2 apresenta a parede externa contendo, além das placas de fechamento em fibrocimento e gesso, uma câmara de ar e camada de lã de vidro. Já as paredes internas são caracterizadas por uma câmara de ar envolta por duas placas de gesso (Figura 76 e Figura 77).

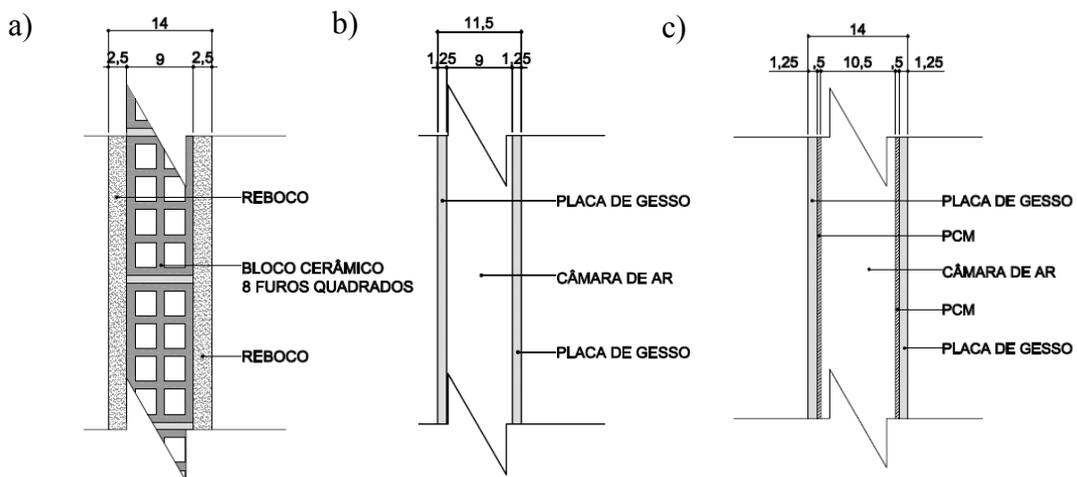
O Caso 3, tal como ocorre no segundo caso, apresenta configurações diferentes para paredes externas e interna, sendo, conforme já apresentado anteriormente, idênticas às mesmas, no entanto com a adição do PCM (Figura 76 e Figura 77).

Figura 76 – Configurações de paredes externas simuladas: a) parede em alvenaria; b) parede em sistema de construção leve; e c) parede em sistema de construção leve com PCM



Fonte: Elaborado pelo autor.

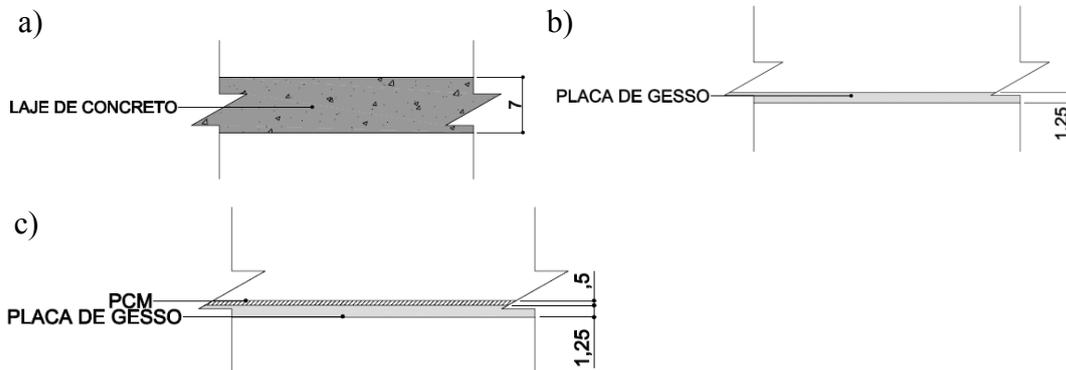
Figura 77 - Configurações de paredes internas simuladas: a) parede em alvenaria; b) parede em sistema de construção leve; e c) parede em sistema de construção leve com PCM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tetos da habitação foram considerados em laje de concreto: Caso 1 (Figura 78 a); forro de gesso: Caso 2 (Figura 78 b); e forro de gesso associado ao PCM: Caso 3 (Figura 78 c).

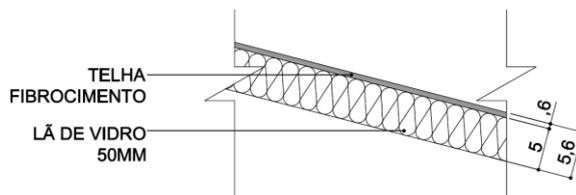
Figura 78 - Configurações de forro simuladas: a) laje de concreto; b) forro de gesso sem isolante térmico; e c) forro de gesso com isolante térmico com PCM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os telhados foram considerados sempre em telha de fibrocimento de 6 mm de espessura somada ao isolante térmico (Figura 79).

Figura 79 – Configuração do telhado simulado



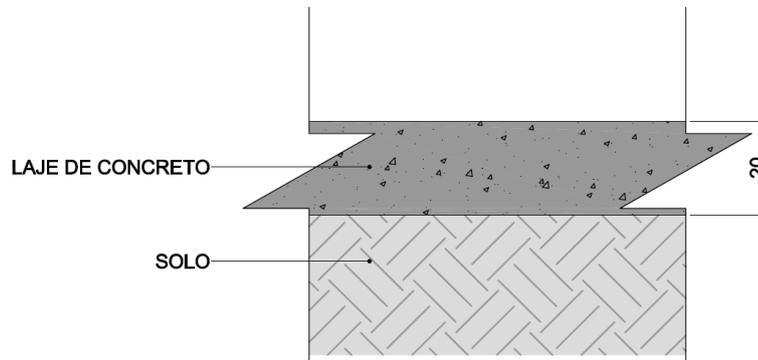
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.6 Transferência de calor com o solo

Uma vez que o modelo trata de uma edificação térrea e se encontra em contato com o solo, havendo somente uma laje de concreto os separando, a temperatura do mesmo tem impacto considerável na temperatura interna.

Com o intuito de executar uma simulação mais precisa do comportamento térmico do estudo piloto, seguindo recomendações do RTQ-R (INMETRO, 2012) foi utilizada a ferramenta *slab* do *software EnergyPlus 9.2* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2020), gerando assim um perfil de temperatura mensal do solo em contato com a laje do piso.

Figura 80 – Configurações da laje de piso no modelo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.7 Materiais construtivos

Para as simulações foram adotadas as características físicas de cada um dos materiais (Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23), utilizando-se como fontes de informação a NBR 15220, catálogos de fabricantes e o documento intitulado Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1 de Ordenes et. al. (2003).

Tabela 18- Propriedades físicas dos materiais empregados no modelo.

Materiais	Espessura (m)	λ (W/m.K)	Rt (m ² .K/W)	c (kJ/(kg.K))	ρ (kg/m ³)	Ct (kJ/(m ² .K))	α
Reboco	0,025	1,15	0,02	1,00	2000	50,00	0,20
bloco ceramico 8 furos quadrados*	0,01	0,90	0,02	0,92	2252	29,01	0,50
telha fibrocimento	0,006	0,95	0,01	0,84	1800	9,07	0,60
laje concreto (teto)	0,07	1,75	0,04	1,00	2200	154,00	0,50
laje concreto (piso)	0,20	1,75	0,11	1,00	2200	440,00	0,50
Madeira para portas	0,04	0,23	0,15	1,34	750	40,20	0,70
lã de vidro 50mm	0,05	0,042	1,19	0,70	50	1,75	0,50
Placa de Gesso	0,0125	0,350	0,04	0,84	875	9,19	0,20
placa fibrocimento	0,01	0,95	0,01	0,84	1800	15,12	0,20
Camara de ar vertical alta emissividade com espessura acima de 50mm	-	-	0,17	-	-	-	-
Camara de ar vertical alta emissividade com espessura entre 20 e 50mm	-	-	0,16	-	-	-	-
Camara de ar horizontal fluxo de calor ascendente alta emissividade com espessura acima de 50mm	-	-	0,14	-	-	-	-
PCM (temp. de fusão= 25°C)	0,005	0,2	0,025	2	830	8,3	-
PCM (temp. de fusão= 28°C)	0,005	0,2	0,025	2	830	8,3	-

*Espessura equivalente

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19- Propriedades físicas das paredes empregadas no modelo.

Parede	RT [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	CT [kJ/m ² .K]
Alvenaria	0,41	2,41	158,01
Drywall	1,57	0,64	26,06
Drywall interna	0,49	2,04	18,38
Drywall + PCM	1,63	0,61	43,55
Drywall + PCM interna	0,62	1,61	53,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20- Propriedades físicas das coberturas empregadas no modelo.

Cobertura	RT [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	CT [kJ/m ² .K]
Alvenaria	1,52	0,66	164,82
Drywall	1,51	0,66	20,01
Drywall + PCM	1,57	0,64	37,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21– Composição das paredes.

Elemento construtivo	Parede de alvenaria	Parede <i>Drywall</i> externa	Parede <i>Drywall</i> interna
Camada externa	Reboco	Placa de fibrocimento	Placa de gesso
Camada 2	Bloco ceramico 8 furos	lã de vidro 50mm	Câmara de ar
Camada 3	Câmara de ar	Câmara de ar	Placa de gesso
Camada 4	Bloco ceramico 8 furos	Placa de gesso	
Camada 5	Reboco		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22– Composição das paredes (continuação).

Elemento construtivo	Parede <i>Drywall</i> + PCM externa	Parede <i>Drywall</i> + PCM interna
Camada externa	Placa de fibrocimento	Placa de gesso
Camada 2	lã de vidro 50mm	PCM
Camada 3	Câmara de ar	Placa de gesso
Camada 4	Placa de gesso	Câmara de ar
Camada 5	PCM	Placa de gesso
Camada 6	Placa de gesso	PCM
Camada 7		Placa de gesso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23– Composição das coberturas.

Elemento construtivo	Cobertura alvenaria	Cobertura Drywall	Cobertura Drywall+PCM
Camada externa	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento	Telha fibrocimento
Camada 2	Lã de vidro 50 mm	Lã de vidro 50 mm	Lã de vidro 50 mm
Camada 3	Câmara de ar	Câmara de ar	Câmara de ar
Camada 4	Laje de concreto	Placa de gesso	Placa de gesso
Camada 5			PCM
Camada 6			Placa de gesso

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.7.1 PCM utilizado

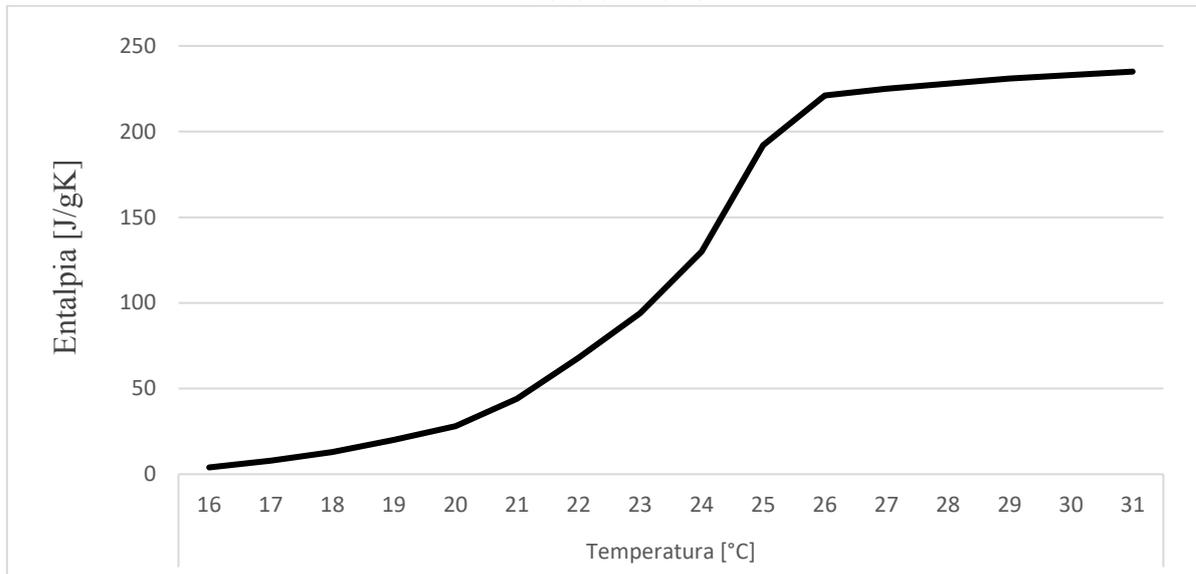
Como já exposto anteriormente na revisão bibliográfica, a adoção de um dado material PCM requer alguns critérios para sua seleção, visando um bom desempenho térmico. Dentre estes critérios pode-se destacar a temperatura de fusão, sua forma de encapsulamento e capacidade de armazenamento de energia térmica.

A temperatura de fusão ideal do PCM a ser adotado em uma envoltória é, segundo Peippo, Kauranen e Lund (1991), de 1 a 3 °C acima da temperatura média do ambiente sem o uso do material. Desta forma, como na cidade de Brasília o modelo com envoltória em *Drywall* apresentou temperatura média de 23,9°C, constatou-se que a temperatura de fusão do PCM deveria estar entre 24,9 e 26,9°C. Já na cidade de Goiânia, como a temperatura média no modelo com envoltória em *Drywall* foi de 26,4°C, verificou-se que a temperatura de fusão do PCM deveria estar entre 27,4 e 29,4°C.

Quanto ao encapsulamento, apesar do maior custo, optou-se por PCM's microencapsulados. Estes, por terem espessuras inferiores à 1mm, são facilmente incorporados a elementos de vedação como placas de gesso ou concreto, além de apresentarem uma maior transferência de calor, solidificação mais homogênea e serem menos propensos ao aparecimento de patologias em obras (LIU et. al, 2018).

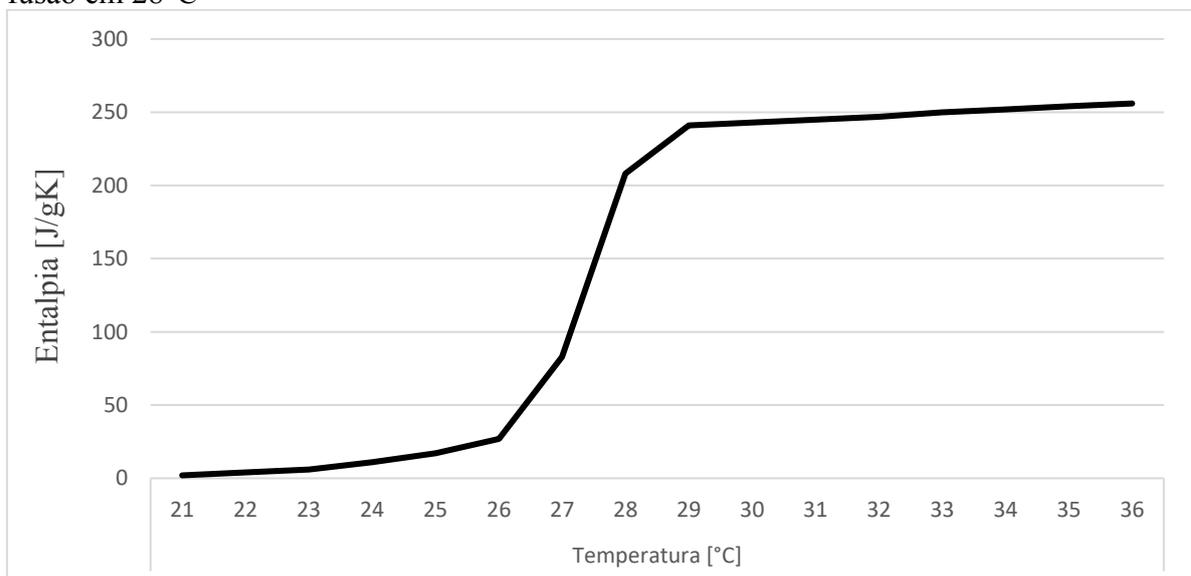
Desta forma, ao se analisar os produtos presentes no mercado, optou-se em adotar um PCM orgânico, microencapsulado (RUBITHERM, 2020), com temperatura de Fusão em 25°C (Figura 81), para a cidade de Brasília, e com temperatura de fusão em 28°C na cidade de Goiânia (Figura 82).

Figura 81- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 25°C



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em catálogo fornecido pelo fabricante.

Figura 82- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 28°C



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o estudo piloto, os PCM's selecionados foram misturados ao gesso em uma proporção de 23,25% do peso total do componente, valor um pouco inferior a proporção máxima de 30% apontada por Kuznik e Virgone (2009). Tal valor adotado corresponde à uma camada com espessura de 5mm aplicado nas simulações no software *EnergyPlus*, conforme é apresentado no item anterior.

3.2.8 Simulação computacional do PCM no *EnergyPlus*

Para a simulação do PCM no software *EnergyPlus* versão 9.2 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019) foi utilizado o objeto *MaterialProperty:PhaseChange*. Neste são inseridos os valores de entalpia de acordo com a temperatura ao qual o material se encontra (Figura 83), assim como é associado ao algoritmo de solução de diferenças finitas de condução para o cálculo.

Figura 83-Objeto *MaterialProperty:PhaseChange* utilizado nas simulações

Field	Units	Obj6
Name		RT26
Temperature Coefficient for Thermal Conductivity	W/m-K2	0
Temperature 1	C	19
Enthalpy 1	J/kg	13000
Temperature 2	C	20
Enthalpy 2	J/kg	21000
Temperature 3	C	21
Enthalpy 3	J/kg	30000
Temperature 4	C	22
Enthalpy 4	J/kg	38000
Temperature 5	C	23
Enthalpy 5	J/kg	50000
Temperature 6	C	24
Enthalpy 6	J/kg	70000
Temperature 7	C	25
Enthalpy 7	J/kg	105000
Temperature 8	C	26
Enthalpy 8	J/kg	177000
Temperature 9	C	27
Enthalpy 9	J/kg	193000
Temperature 10	C	28
Enthalpy 10	J/kg	198000
Temperature 11	C	29
Enthalpy 11	J/kg	200000
Temperature 12	C	30
Enthalpy 12	J/kg	201000
Temperature 13	C	31
Enthalpy 13	J/kg	203000
Temperature 14	C	32
Enthalpy 14	J/kg	205000
Temperature 15	C	33
Enthalpy 15	J/kg	207000

Fonte: *EnergyPlus* versão 9.2 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019).

Cabe ressaltar que esse modelo de simulação de PCM considera somente uma curva de entalpia, seja para a fusão ou para a solidificação do material.

Posteriormente a esse processo, o objeto é associado ao material do PCM em *Material*, onde são inseridas as demais propriedades térmicas deste, e em sequência associado às definições de construção das paredes externas, internas e forro no objeto *Construction*.

Figura 84 - Objeto *Material* utilizado nas simulações

Field	Units	Obj15
Name		RT26
Roughness		Smooth
Thickness	m	0,005
Conductivity	W/m-K	0,2
Density	kg/m ³	830
Specific Heat	J/kg-K	2000
Thermal Absorptance		0,9
Solar Absorptance		0,4
Visible Absorptance		0,4

Fonte: *EnergyPlus* versão 9.2 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019).

3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO RESULTADO

O desempenho térmico da envoltória da edificação simulada foi avaliado pelas condições alcançadas no ar interno, quanto a:

- a) perfil de temperatura nas semanas de calor e frio extremos;
- b) amplitude térmica diária;
- c) balanço térmico;
- d) horas de desconforto por frio e calor;
- e) frequência de ocorrência.

3.3.1 Perfil de temperatura nas semanas de pico de frio e de calor

Para a análise de perfil de temperatura, foram identificados os dias de temperatura máxima e mínima absoluta nas condições climáticas de Brasília e Goiânia, e conseqüentemente, considerados três dias que o antecederam, tal como três dias que o sucederam, compondo, assim, o período de uma semana.

Nesse método de avaliação, são apresentadas as temperaturas do ar interno do modelo com cada uma das configurações de envoltória, tal como a temperatura do ar externo, com o intuito de verificar o impacto dos tipos de parede nas condições térmicas internas durante esses períodos, e de averiguar e quantificar o amortecimento e o atraso térmico proporcionado por cada sistema construtivo.

3.3.2 Frequência de amplitudes térmicas diárias

A frequência de amplitudes térmicas diárias são apresentados em valores percentuais de horas, no qual é possível verificar a ocorrência das variações durante o ano, possibilitando, assim, analisar o impacto do PCM junto ao sistema leve de construção, no que se refere a gerar maior atraso térmico no modelo estudado.

3.3.3 Balanço térmico

São apresentados os balanços térmicos dos dias no qual se apresentam as temperaturas máxima e mínima absoluta.

Os dados são apresentados em intervalos horários e demonstram as fontes de ganho e perda de calor através da envoltória sob as diferentes configurações de sistema construtivo.

3.3.4 Horas de desconforto por frio e calor

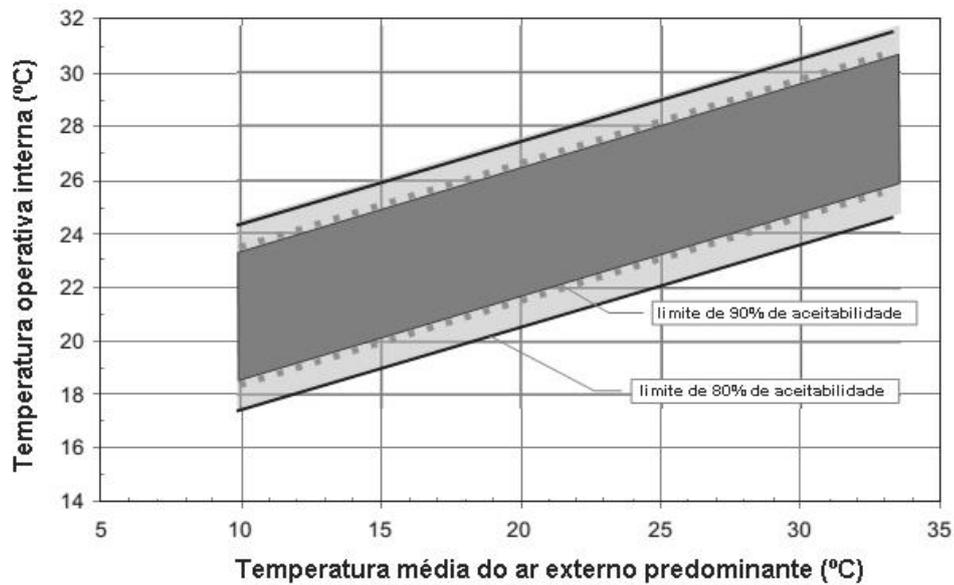
Foi adotado o modelo de conforto adaptativo (ASHRAE, 2010) para ambientes naturalmente ventilados para a determinação de horas de desconforto por calor e frio enquanto a edificação é considerada ocupada. Considerou-se o limite de 90% de aceitabilidade dos usuários com o intuito de verificar as condições de conforto térmico de forma mais restritiva.

Para a aplicação deste modelo não deve existir qualquer dispositivo de condicionamento térmico artificial, os ocupantes devem apresentar somente atividade sedentária, com vestimentas com isolamento entre 0,5 e 1,0 clo, e com temperatura média predominante no exterior entre 10°C e 33,5°C.

A Figura 85 mostra as faixas de temperaturas operativas aceitáveis no interior de ambientes naturalmente ventilados de acordo com a ASHRAE STANDARD 55 (ASHRAE, 2010) em função das temperaturas médias predominantes no exterior dos últimos sete dias.

No software EnergyPlus esta média é calculada a partir do arquivo climático especificado para a simulação, sendo utilizada como indicador para a adaptação do ocupante às condições ao ar livre e determina a aceitabilidade de condições em ambientes construídos. O modelo é responsável também por gerar a adaptação das vestimentas dentro dos ambientes internos, dentro do intervalo estipulado pela ASHRAE STANDARD 55 (ASHRAE, 2010).

Figura 85- Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados.



Fonte: ASHRAE 55(2010) modificado pelo autor.

3.3.5 Frequência de ocorrência de temperaturas

Para uma melhor compreensão quanto à distribuição da temperatura do ar ao longo de todo ano, no período em que o modelo é ocupado, são apresentadas as frequências de ocorrência de temperaturas do ar resultantes com cada configuração de envoltória.

4 RESULTADOS DO ESTUDO PILOTO

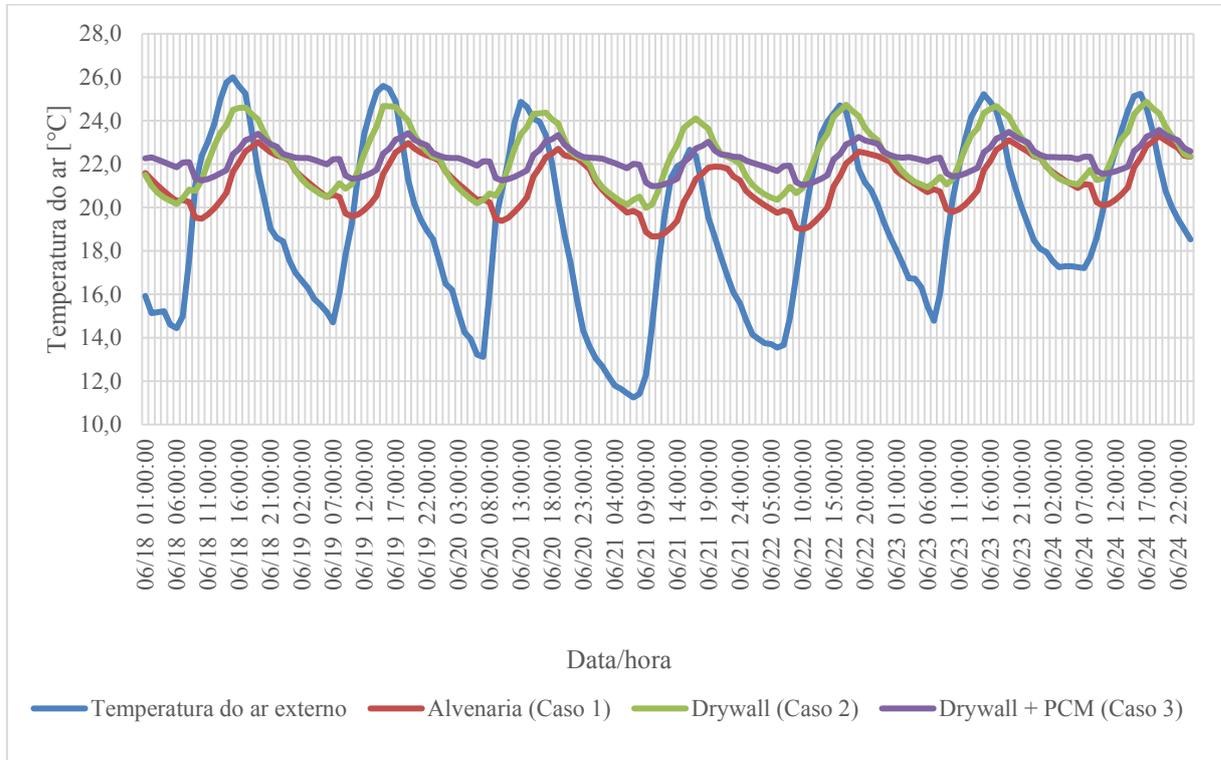
Nesse capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais de cada uma das configurações de envoltória sob as condições climáticas de Brasília e Goiânia (zonas bioclimáticas 4 e 6).

4.1 RESULTADOS PARA BRASÍLIA

Ao se comparar o perfil de temperatura nos períodos extremos de frio (Figura 86) e de calor (Figura 87) do Caso 1, em alvenaria, e o Caso 2, em que a envoltória é constituída de um sistema leve, fica clara a desvantagem ao se adotar um sistema construtivo com baixa capacidade térmica, e conseqüente baixo atraso térmico, quando a edificação está exposta a consideráveis amplitudes térmicas diárias como é o caso do clima de Brasília. Esta configuração de envoltória proporciona uma menor redução na variação de temperatura do ar no período de um dia.

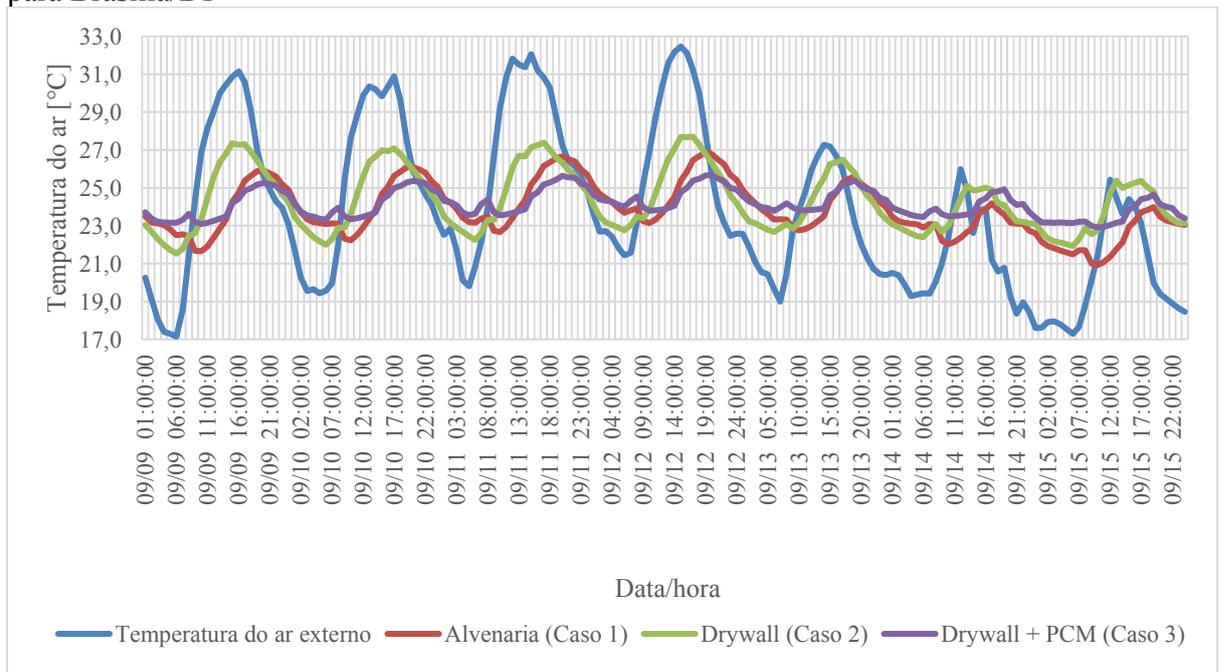
Por outro lado, cabe ressaltar que o Caso 3, apesar de adotar um sistema leve de construção, é aquele que apresenta a menor variação diária de temperatura nesses dois períodos (Figura 86 e Figura 87), evidenciando a eficácia do PCM em reduzir a ocorrência de temperaturas extremas no interior do modelo.

Figura 86- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o dia mais frio para Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

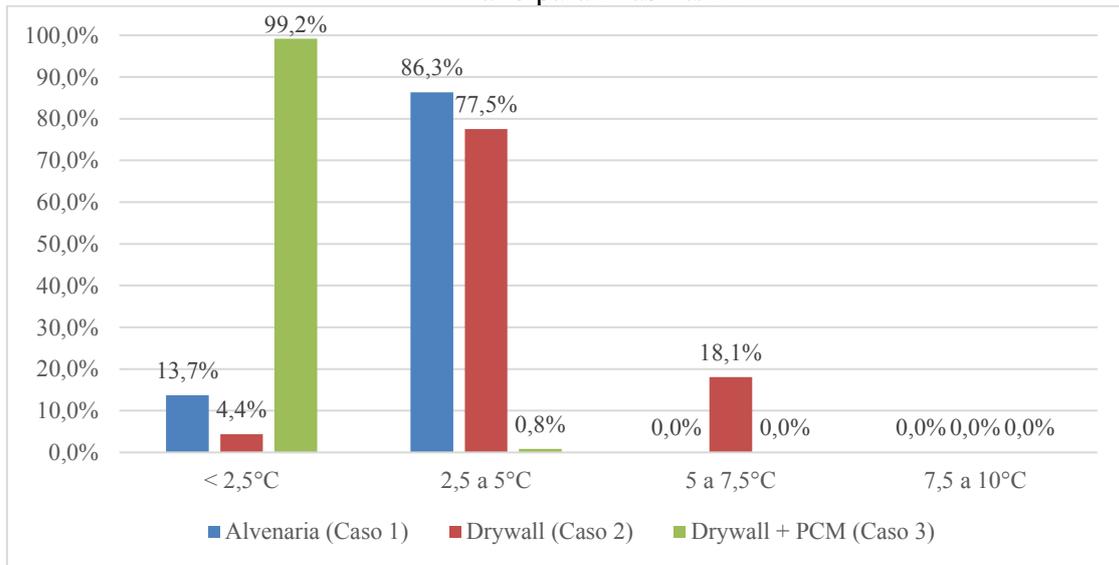
Figura 87- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o pico de calor para Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bom desempenho térmico da envoltória em sistema leve de construção somada ao PCM (Caso 3), também se torna evidente quando analisada a frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos ao longo do ano (Figura 88). Esta vedação é aquela que apresenta os menores índices entre os três casos estudados, proporcionando uma oscilação abaixo de 2,5°C na temperatura interna em quase todo ano.

Figura 88 – Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no período de um ano para Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro aspecto benéfico da adoção do PCM é que o sistema leve com este material é o que apresenta a maior temperatura do ar no horário de frio extremo, e a mais baixa temperatura no horário de pico de calor (Figura 89). Comparando apenas o Caso 1 e o Caso 2, para cada um desses períodos, fica claro o benefício da adoção da alvenaria no período mais quente, e do *drywall*, no período mais frio do ano.

Figura 89- Extremos de temperaturas registradas no ar exterior e nos três casos simulados para Brasília/DF.

	Ar externo	Alvenaria (Caso 1)	Drywall (Caso 2)	Drywall + PCM (Caso 3)
Registro extremo de frio (temperatura mínima do ar)				
Temperatura do ar	11,2	19,8	20,4	22,0
Diferença		8,6	9,1	10,8
Registro extremo de calor (temperatura máxima do ar)				
Temperatura do ar	32,5	25,4	27,7	24,8
Diferença		-7,1	-4,8	-7,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando se analisa o balanço térmico do dia mais frio do ano (Figura 90), onde são apresentados os meios pelos quais há ganho e perda de calor no modelo, fica evidente que o modelo em alvenaria é aquele que permite uma maior perda de calor por meio das paredes, pois possuem a maior transmitância térmica dentre os casos estudados.

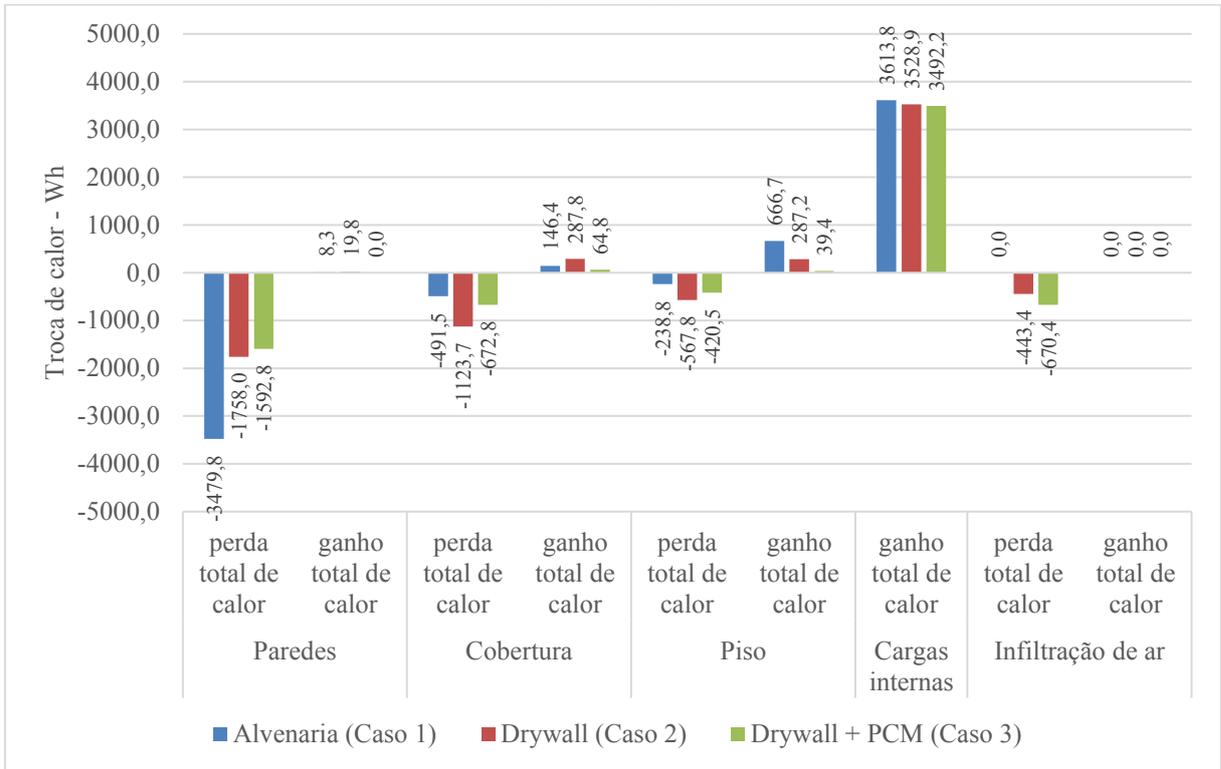
Já os modelos em sistema leve, com e sem PCM (Caso 3 e 2, respectivamente), que apresentam uma menor transmitância térmica nas paredes externas, provocam uma menor perda de calor, propiciando ao ambiente interno atingir temperaturas mais elevadas. A menor perda de calor, somada à ação do PCM, que, apesar de não atingir temperaturas suficientemente altas para completar seu ciclo de mudança de fase (ver curva de entalpia na Figura 81), atua como armazenador de calor latente, proporcionando uma redução na amplitude térmica do ambiente interno, assim como na ocorrência de temperaturas mais altas no período mais frio do dia.

Cabe ressaltar, que apesar de as três coberturas simuladas possuírem transmitância térmica semelhantes, os Casos 1 e 3, com maior capacidade de armazenamento de calor na envoltória, resultam em menores trocas térmicas por aquela superfície, conservando calor absorvido no período mais quente e dispersando no período mais frio do dia. Este fenômeno contribui para a ocorrência de menor ganho e perda de calor para o meio externo por meio da cobertura.

Assim como ocorre no dia mais frio do ano, quando se analisa o balanço térmico de cada caso no dia mais quente do ano, é possível verificar que nos Casos 1 e 3, a cobertura é responsável por ganhos e perdas de calor inferiores ao do Caso 2. Esta menor troca de calor por este componente, contribui de forma incisiva para uma redução nos extremos de temperatura dentro do ambiente interno.

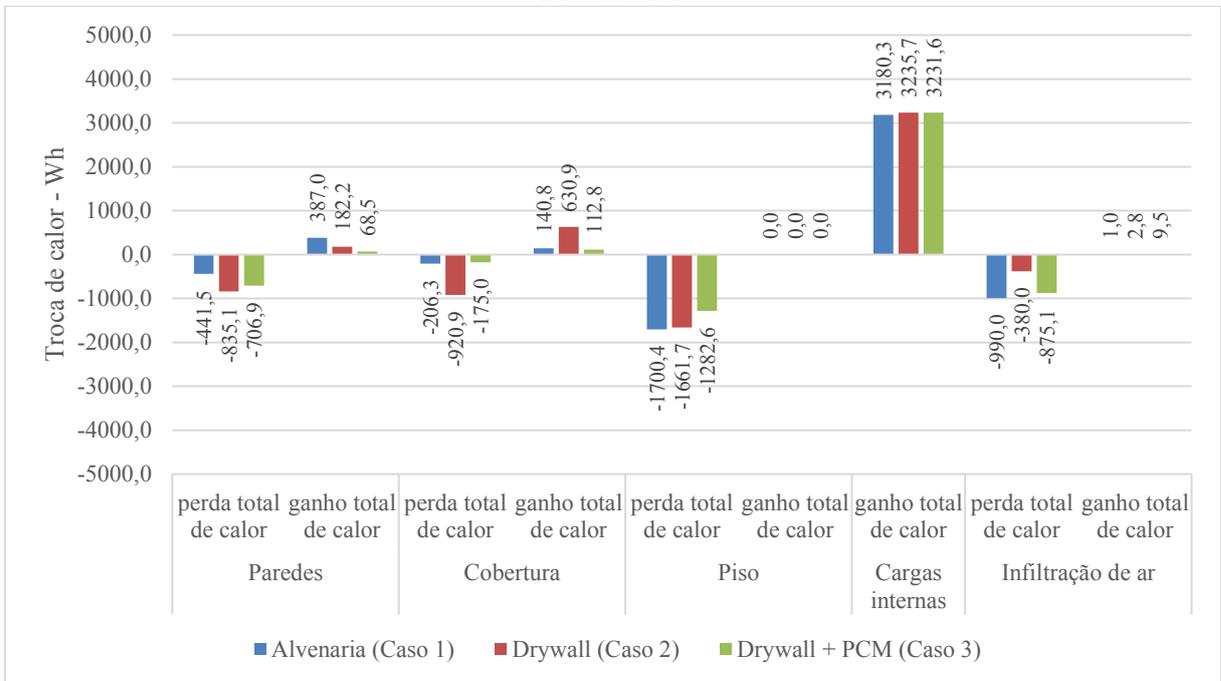
Ao se adotar um sistema leve em conjunto com o PCM, como está definido no Caso 3, nota-se uma grande eficácia em se evitar o ganho e a perda de calor em toda a envoltória, e sobretudo na cobertura.

Figura 90- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 21 de junho para o clima de Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 91- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 12 de setembro para o clima de Brasília/DF



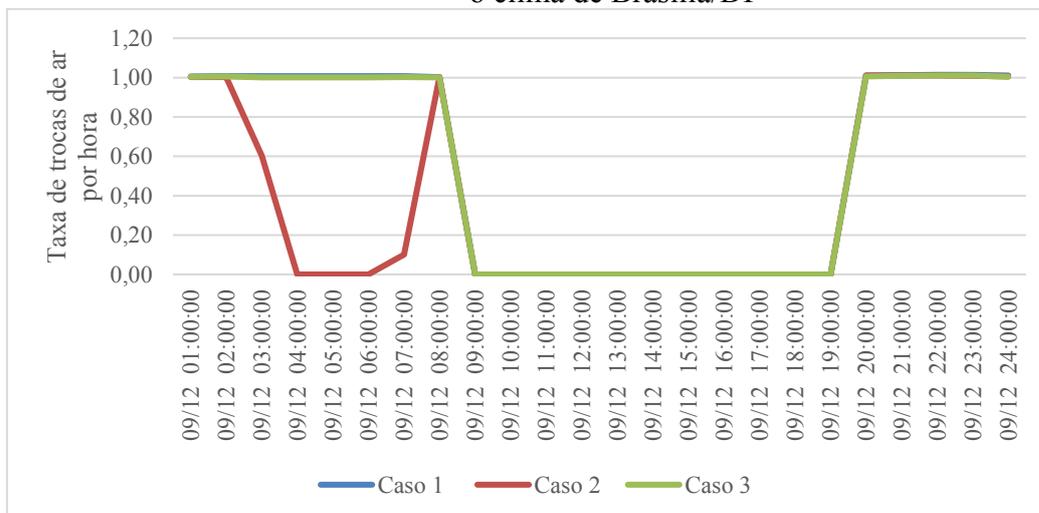
Fonte: Elaborado pelo autor.

Faz-se necessário ressaltar que, apesar de o Caso 1 apresentar maior ganho de calor por meio das paredes, é o caso que apresenta a menor perda por este componente durante o período mais quente do ano. Isto se dá devido ao fato de esta configuração de envoltória perder calor por outros meios. Dentre estes, pode se destacar a perda para de calor pelo piso e pela infiltração de ar externo.

A maior perda de calor para o piso no Caso 1 ocorre por este estar em contato com um solo com temperaturas mais baixas no período mais quente, resultados da temperatura mais reduzida no ambiente interno, e que provoca uma maior perda de calor, se comparado aos outros casos. Cabe destacar que o solo, com alta inércia térmica, apresenta pouca oscilação de temperatura ao longo das horas e dos dias. Dessa forma, funciona como um grande armazenador de calor no verão e grande absorvedor de calor no inverno.

A infiltração de ar atua, no Caso 1 (Figura 92), de forma mais eficaz, promovendo a perda de calor interno por este caso apresentar maior inércia térmica, o que vem a gerar uma menor amplitude térmica interna, e consequentemente apresentar temperaturas mais elevadas no período noturno, acionando assim a troca de ar interno. As paredes em alvenaria, devido à sua mais elevada capacidade térmica, armazenam mais calor ao longo do dia, que ao ser liberado no período noturno, resulta numa condição em que demanda mais trocas de ar pela infiltração. Ressalta-se que o modelo computacional foi montado para permitir a infiltração de ar durante a noite, apenas quando a temperatura interna superasse os 24°C.

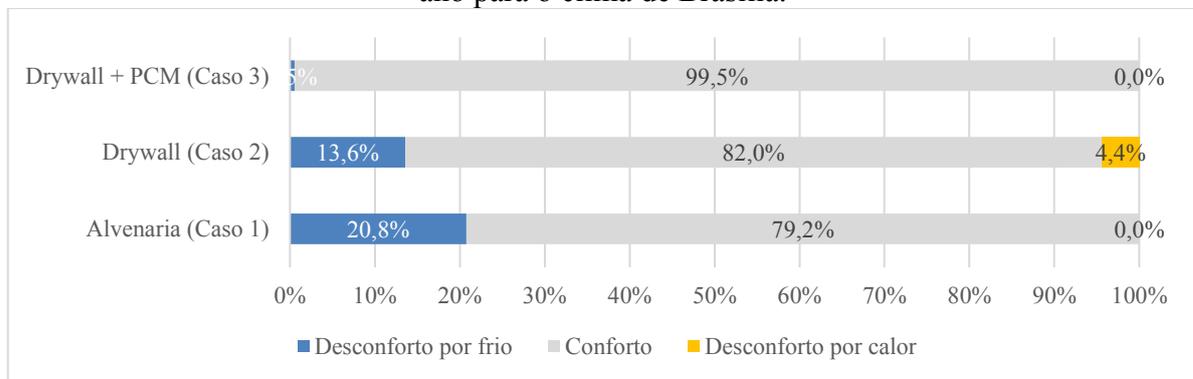
Figura 92- Taxas de troca de ar por hora dos três casos estudados no dia 12 de setembro para o clima de Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda quanto ao balanço térmico, é possível verificar, em ambos períodos estudados, que a carga térmica interna gerada pela ocupação e utilização de equipamentos é a principal fonte de ganho de calor nos modelos. Sendo assim, deve-se destacar que a envoltória capaz de armazenar esse calor e dissipá-lo no meio interno no período mais frio é aquela que tem maior potencial em gerar mais horas de conforto térmico ao usuário. O Caso 3 (*drywall*+PCM) foi o modelo que apresentou melhor resultado final com essa estratégia, conforme pode ser observado na Figura 93.

Figura 93- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no período de um ano para o clima de Brasília.



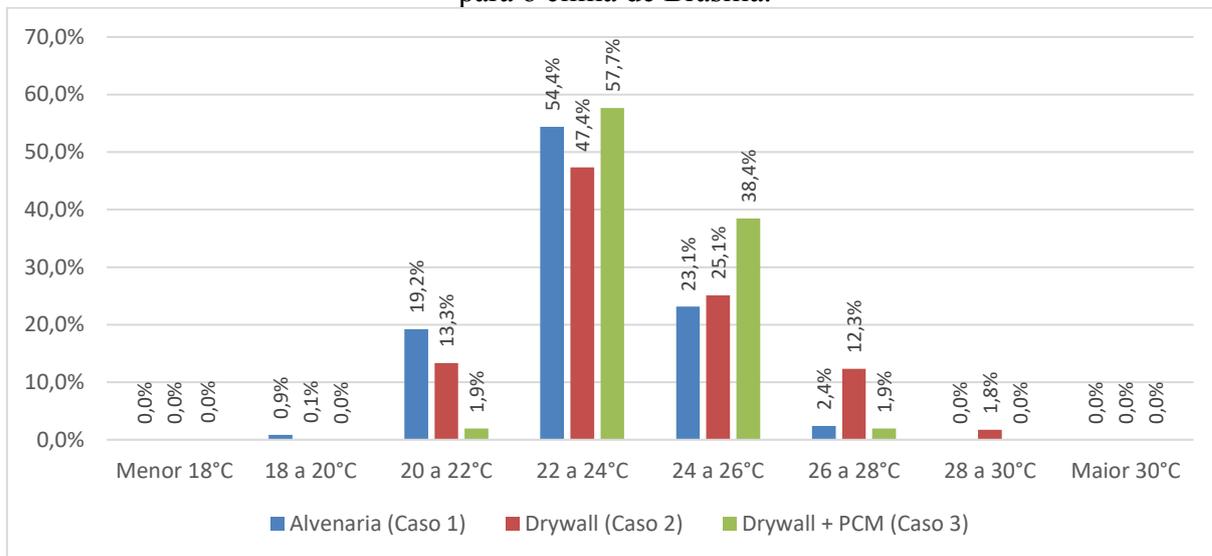
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a porcentagem de horas de conforto térmico e de desconforto por frio ou calor, evidencia-se os benefícios da adoção do PCM junto ao sistema leve de construção, uma vez que este é o caso que consegue minimizar, de forma mais equilibrada, a presença de condições de desconforto, seja por frio, quanto por calor.

Isso ocorre porque esta configuração de envoltória é aquela que apresenta menor frequência de horas de temperaturas extremas, como é possível verificar na Figura 94.

Analisando a porcentagem de horas de desconforto nos Casos 1 e 2, pode se verificar que a maior frequência de temperaturas mais baixas no Caso 1, e de temperaturas mais elevadas no Caso 2, contribuem para uma maior ocorrência de desconforto por frio e calor, respectivamente. Porém, ambos os casos resultam em porcentagem de horas de conforto semelhante.

Figura 94- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos simulados para o clima de Brasília.

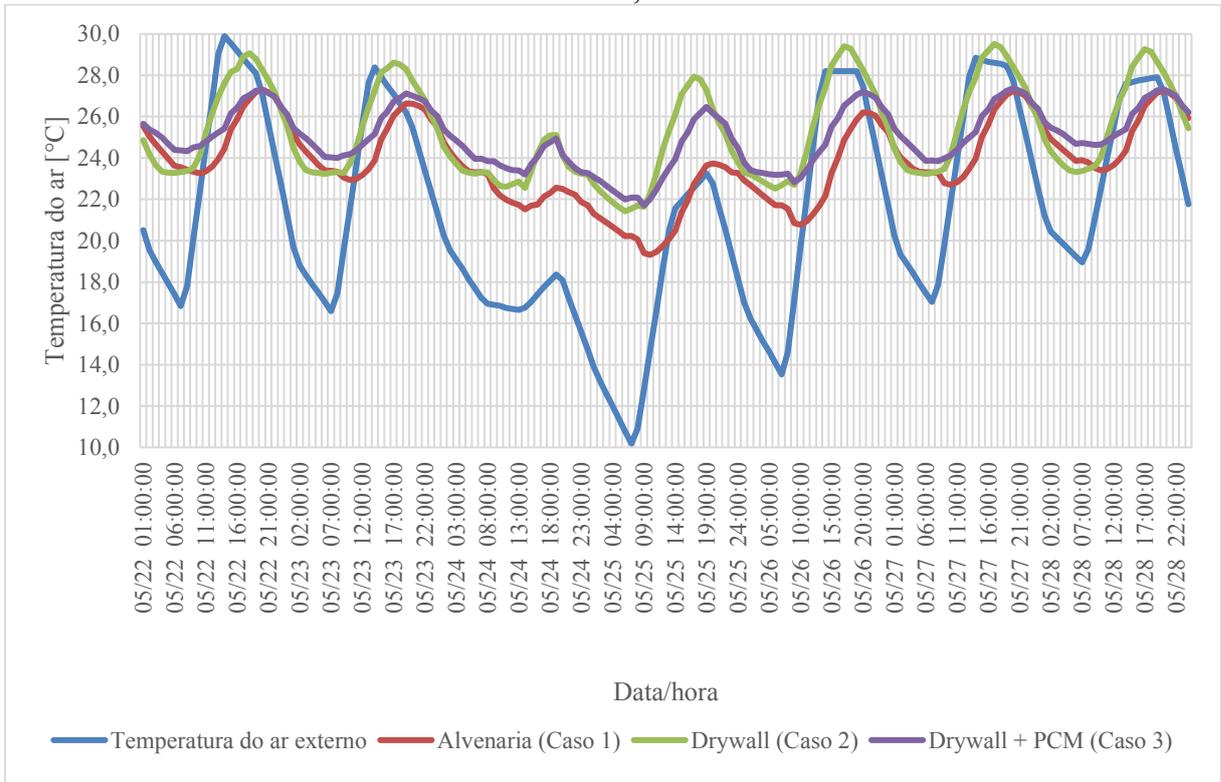


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 RESULTADOS PARA GOIÂNIA

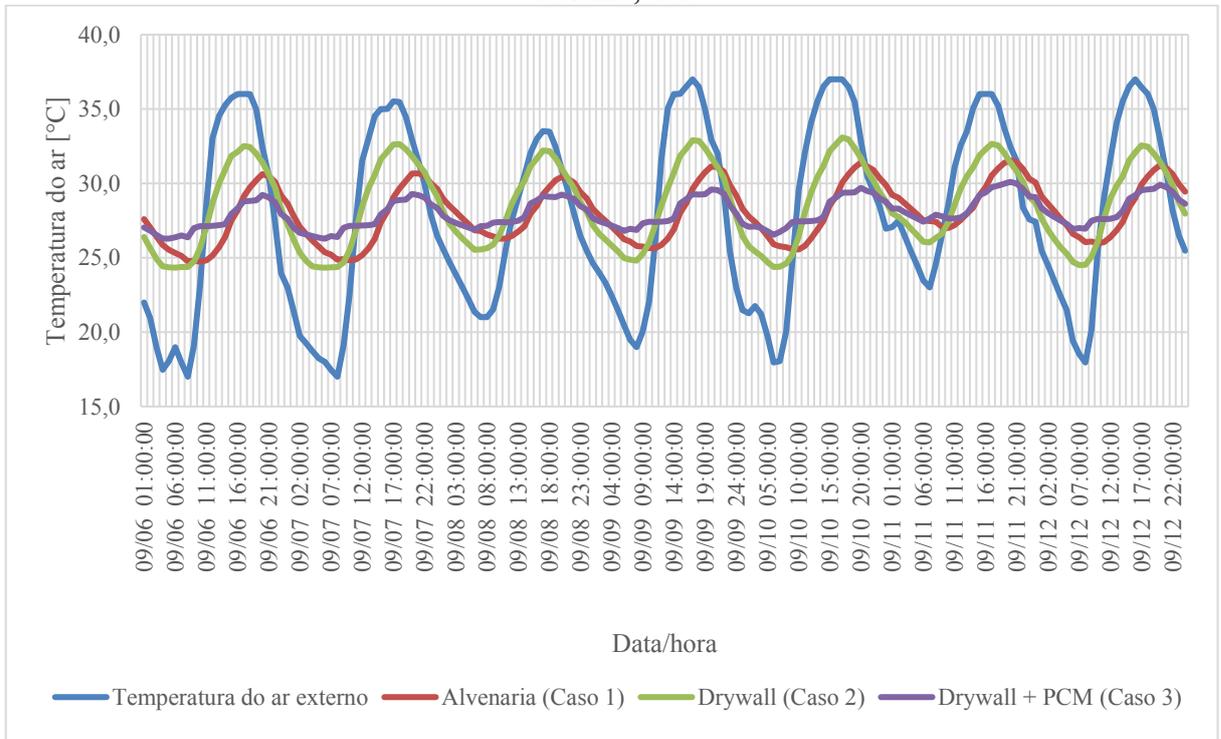
Na cidade de Goiânia, ao se comparar o perfil de temperatura no período mais frio e mais quente do ano (Figura 95 e Figura 96) é possível verificar que a utilização do PCM junto ao sistema leve (Caso 3) é aquela que apresenta as menores variações de temperatura ao longo de um dia, com as menores temperaturas máximas e maiores temperaturas mínimas (Figura 97).

Figura 95- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o dia mais frio em Goiânia, GO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 96- Perfil de temperatura do ar interno nos modelos na semana com o pico de calor em Goiânia, GO



Fonte: Elaborado pelo autor

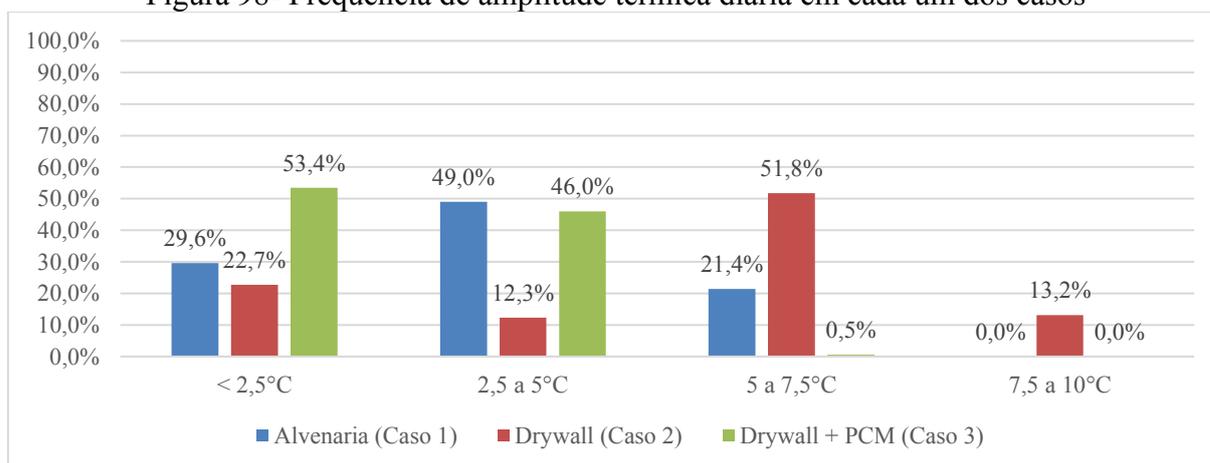
Figura 97- Extremos de temperaturas registradas no ar exterior e nos três casos simulados para Goiânia/GO

	Ar externo	Alvenaria (Caso 1)	Drywall (Caso 2)	Drywall + PCM (Caso 3)
Registro extremo de frio (temperatura mínima do ar)				
Temperatura do ar	10,2	20,2	21,5	22,1
Diferença		10,0	11,4	11,9
Registro extremo de calor (temperatura máxima do ar)				
Temperatura do ar	37,0	29,6	32,9	29,3
Diferença		-7,4	-4,1	-7,7

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa menor variação de temperatura do ar no ambiente interno no Caso 3, também se apresenta ao longo de todo o ano, como pode-se averiguar no resumo estatístico apresentado na Figura 98. Este caso, em mais da metade dos dias, proporciona uma variação diária inferior a 2,5°C na temperatura do ar, enquanto o Caso 2, em *drywall*, apresenta uma variação de mais de 5°C em quase dois terços do ano. Tal desempenho comprova a eficácia do PCM em reduzir a amplitude térmica diária em uma edificação com envoltória leve, uma vez que produz resultados melhores até mesmo que o Caso 1, em alvenaria, sendo este último o com maior capacidade térmica.

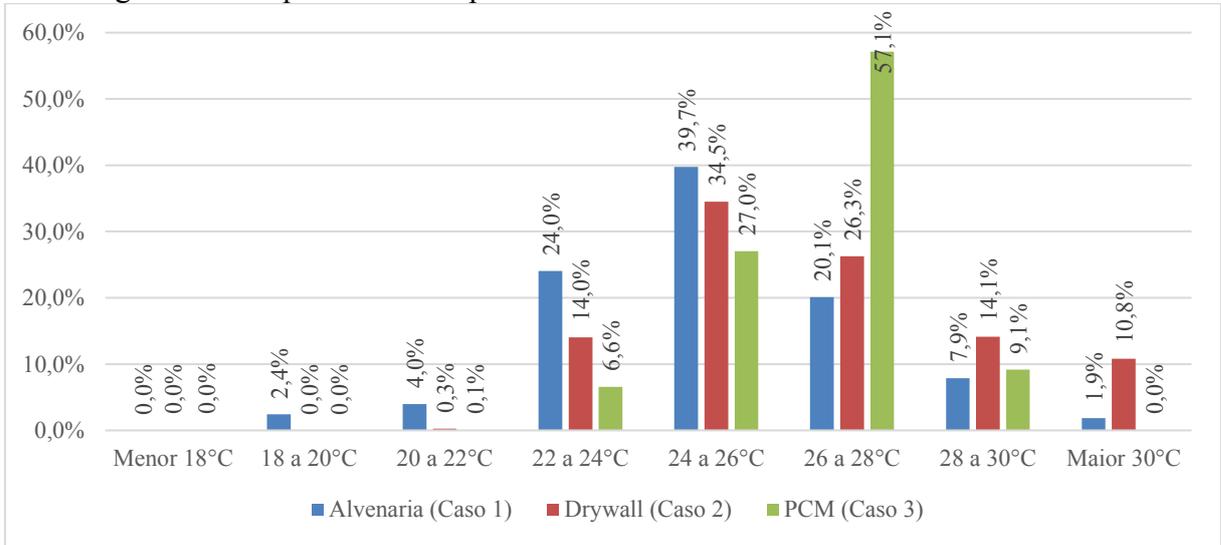
Figura 98- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos



Fonte: Elaborado pelo autor

Junto a essa redução de amplitude térmica diária no ambiente interno ocasionada pela adoção do PCM junto ao sistema leve (Caso 3), há também uma diminuição na ocorrência de temperaturas extremas, como pode-se verificar na Figura 99.

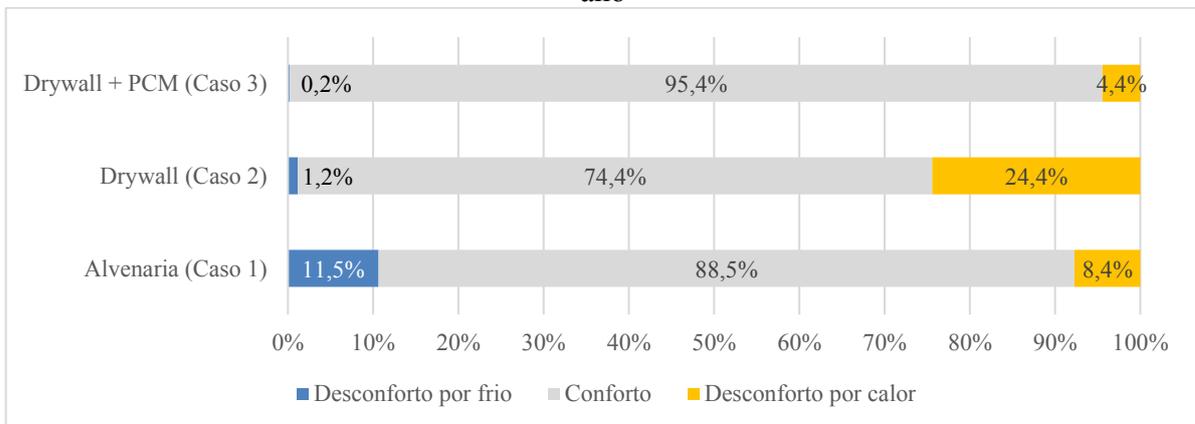
Figura 99- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos



Fonte: Elaborado pelo autor

Cabe ressaltar que apesar dessa menor amplitude térmica diária favorecer a ocorrência de temperaturas mais elevadas no período noturno na semana mais quente e para temperaturas mais baixas no período diurno da semana mais fria, o Caso 3 é aquele que apresenta a maior porcentagem de horas de conforto térmico ao longo do ano, apresentando assim os menores valores de porcentagem de horas de desconforto por frio e por calor entre os casos analisados (Figura 100).

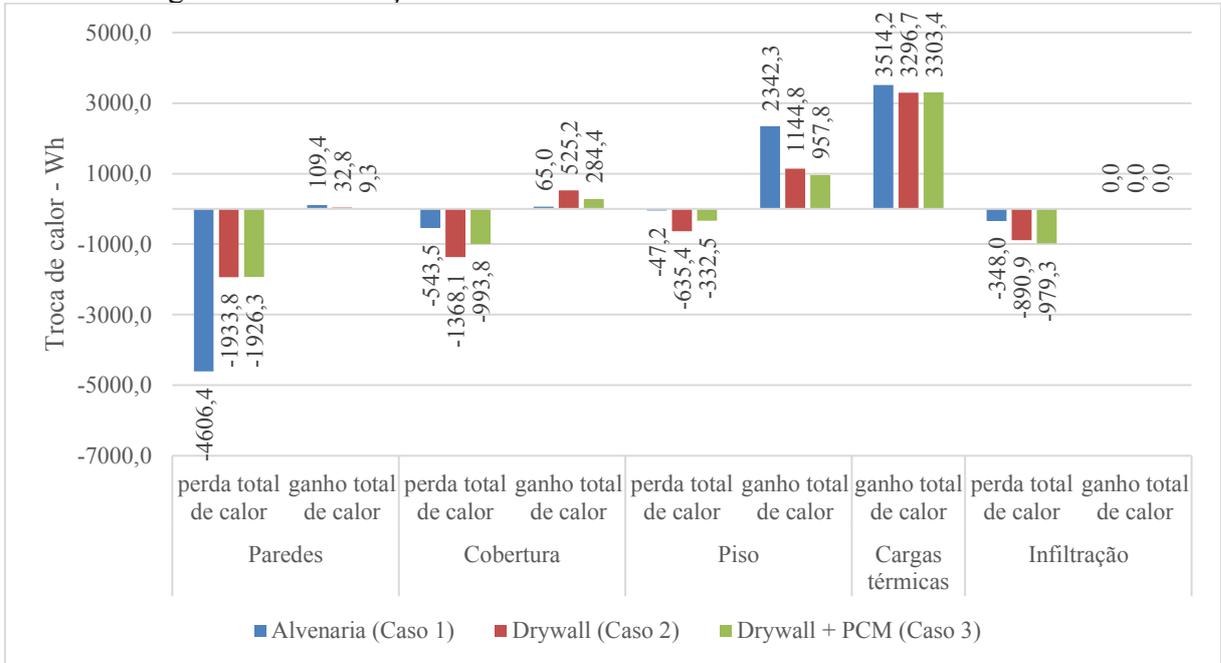
Figura 100- Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no período de um ano



Fonte: Elaborado pelo autor

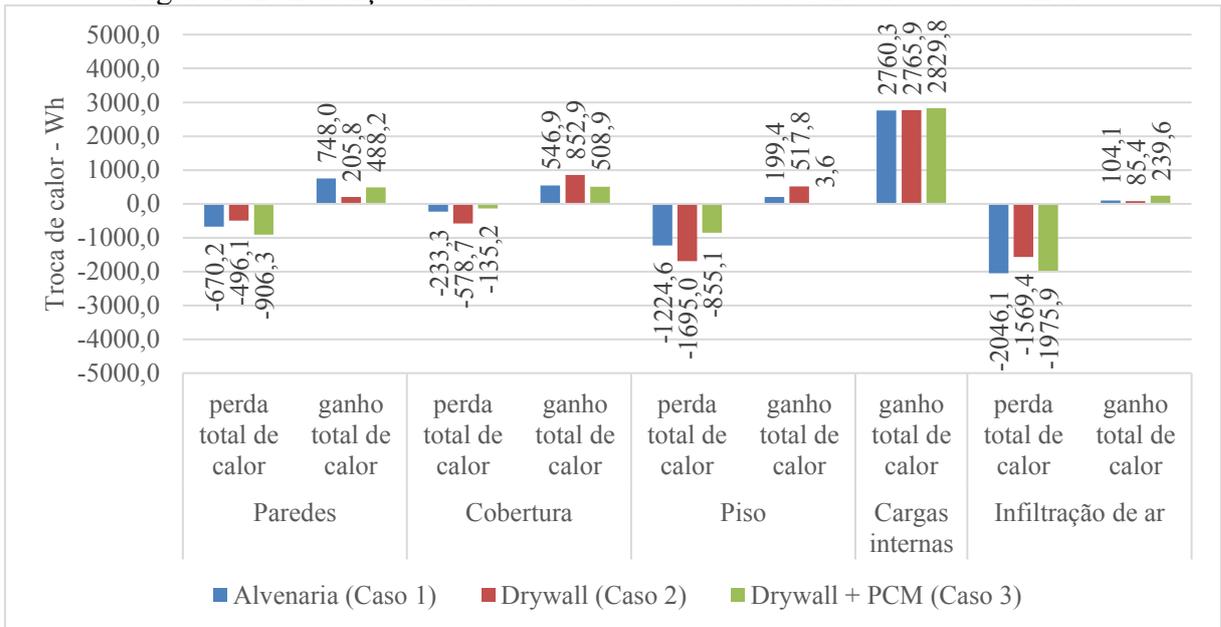
Quando se analisa o balanço térmico das três configurações de envoltórias, fica evidente que o Caso 3 é aquele que proporciona menor troca de calor entre o meio interno e o meio externo, seja no dia mais frio ou no dia mais quente do ano (Figura 101 e Figura 102).

Figura 101 – Balanço térmico dos três casos estudados no dia 25 de maio



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 102- Balanço térmico dos três casos estudados no dia 9 de setembro



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de as paredes do Caso 2 proporcionarem uma reduzida troca de calor, este é também o caso que apresenta maior troca pela cobertura, uma vez que este elemento exibe uma menor capacidade de armazenamento de calor, colaborando para a ocorrência de temperaturas mais elevadas no modelo.

Por outro lado, o Caso 1, apesar de exibir uma baixa troca de calor pela cobertura, apresenta uma elevada perda de calor pelas paredes, em especial no dia mais frio do ano, o que vem a contribuir para a ocorrência de temperaturas mais baixas dentro do modelo com essa configuração de envoltória.

Da mesma forma que ocorre na cidade Brasília, é possível verificar em Goiânia, que em ambos períodos estudados, a carga térmica interna gerada pela ocupação e utilização de equipamentos é a principal fonte de ganho de calor nos modelos, e que a infiltração de ar é o meio mais eficaz em dissipá-lo. Também é possível verificar, que para ambas condições climáticas, a envoltória capaz de armazenar o calor, no período mais quente, e dissipá-lo no meio interno no período mais frio do dia é aquela que tem maior potencial em gerar o conforto térmico ao usuário.

4.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Por meio das simulações computacionais pôde-se confirmar algumas tendências que já haviam sido averiguadas em estudos analisados na revisão bibliográfica.

Pôde-se verificar que a adoção do PCM junto ao sistema leve de construção apresentou, dentre os casos estudados, a menor amplitude térmica diária no interior do modelo, ao armazenar, de forma eficiente, o calor gerado no período mais quente, e dissipar para o ambiente interno no período mais frio. Consequentemente, pôde-se verificar que com a adoção dos PCM's, houve também um grande aumento na frequência de temperaturas internas próximas às temperaturas de fusão de tais materiais.

O fato de o PCM armazenar o calor, contribui também para uma menor troca através da envoltória, principalmente no período mais quente do ano, o que torna o Caso 3 menos suscetível às variações de temperatura do meio externo.

Todavia, em climas com menor amplitude térmica, e com temperaturas constantemente altas, pode-se antever, que o PCM pode não ser benéfico, pois dificultaria que o ambiente interno atingisse temperaturas mais baixas nos períodos mais amenos do dia, reduzindo assim o conforto térmico do usuário.

Cabe ressaltar, que tais resultados somente foram possíveis devido a escolha de um PCM com a temperatura de fusão adequada, caso contrário, o material não completaria seu ciclo de troca de fase, reduzindo assim a sua eficácia em armazenar calor latente.

Apesar das restrições normativas encontradas na sua utilização nas condições climáticas brasileiras Brasil, o sistema leve de construção se mostrou, quando adotado junto ao PCM, bastante eficaz na redução de amplitude térmica diária, na diminuição da ocorrência de temperaturas extremas, e no aumento do conforto térmico do ambiente interno nas duas zonas bioclimáticas estudadas.

Tal impacto apresentado ao sistema leve de construção gerou resultados mais benéficos que a adoção de sistemas com maior capacidade térmica, como a alvenaria, tal qual é prescrito pela NBR15575.

Ainda que se tenha apontado o benefício na utilização de PCM's junto ao sistema leve de construção nestas duas condições climáticas brasileiras, é importante salientar que o estudo piloto é um modelo simplificado, e que não considerou, por exemplo, a presença de janelas ou elementos translúcidos, sendo estes, geralmente, grandes responsáveis por ganhos e perdas de calor no ambiente interno.

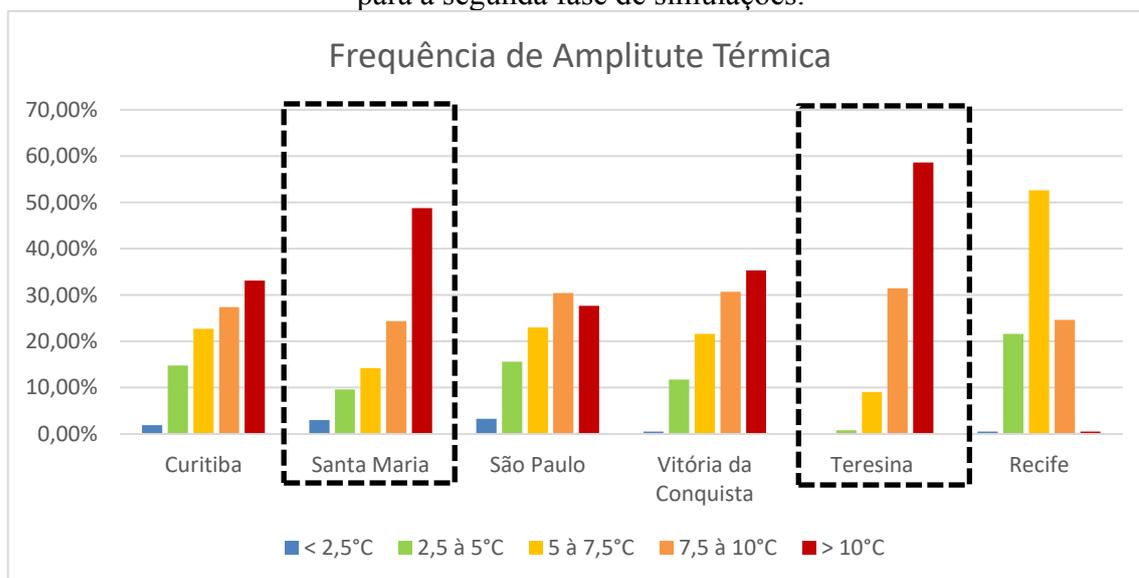
5 MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Uma vez que o estudo piloto apresentou algumas das potencialidades e limitações do uso de PCM associado ao *drywall* em habitações unifamiliares de pequeno porte (HUPP), foram elencadas uma cidade de cada uma das zonas bioclimáticas para se definir quais delas, além das já estudadas, apresentariam maior potencial de aplicação do material junto a esse modelo.

Para isso, fora feita a avaliação, de forma comparativa, de quais cidades e zonas bioclimáticas brasileiras apresentariam a maior amplitude térmica diária ao longo do ano.

A cidade de Santa Maria, localizada no estado do Rio Grande do Sul e a cidade de Teresina, localizada no estado do Piauí, representando as zonas bioclimáticas 2 e 7 respectivamente, se apresentaram como dotadas de maior potencial, uma vez que exibem os maiores índices neste quesito (Figura 103).

Figura 103 – Frequência de amplitude térmica em cidades representantes das 8 zonas Bioclimáticas. Em destaque as que apresentam os maiores valores e que foram selecionadas para a segunda fase de simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

5.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA COMPLEMENTAR

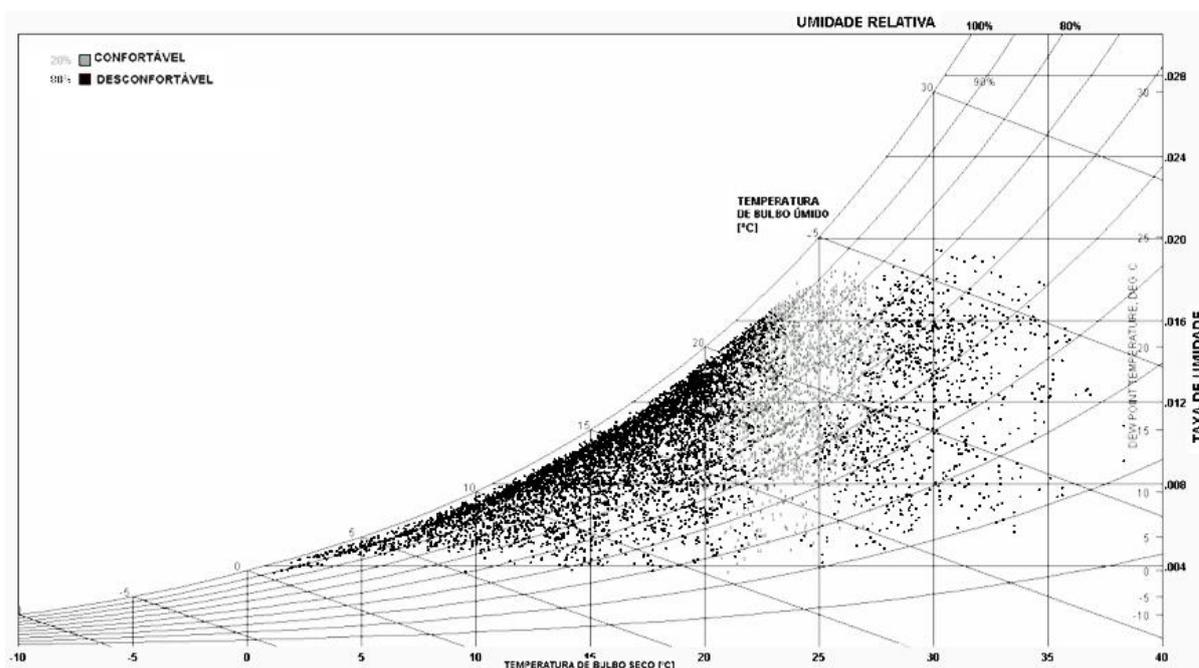
Para as simulações dos estudos de caso foram selecionadas as cidades de Santa Maria e Teresina, além de Brasília e Goiânia, por apresentarem características climáticas que, segundo

os resultados prévios, são propícias a adoção de PCM's em conjunto com sistema *drywall*, e desta forma, as suas caracterizações climáticas são apresentadas a seguir.

5.1.1 Santa Maria

Santa Maria, localizada na latitude 29°41'03" Sul e longitude 53°48'25" Oeste, está, segundo a NBR15220 (ABNT, 2005), inserida na zona bioclimática 2. No município são registradas condições climáticas de desconforto em 80% de horas ao longo do ano (Figura 104), sendo em sua maior parte devido ao frio, embora também apresente considerável porcentagem de horas de desconforto por calor.

Figura 104- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Santa Maria, RS. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.

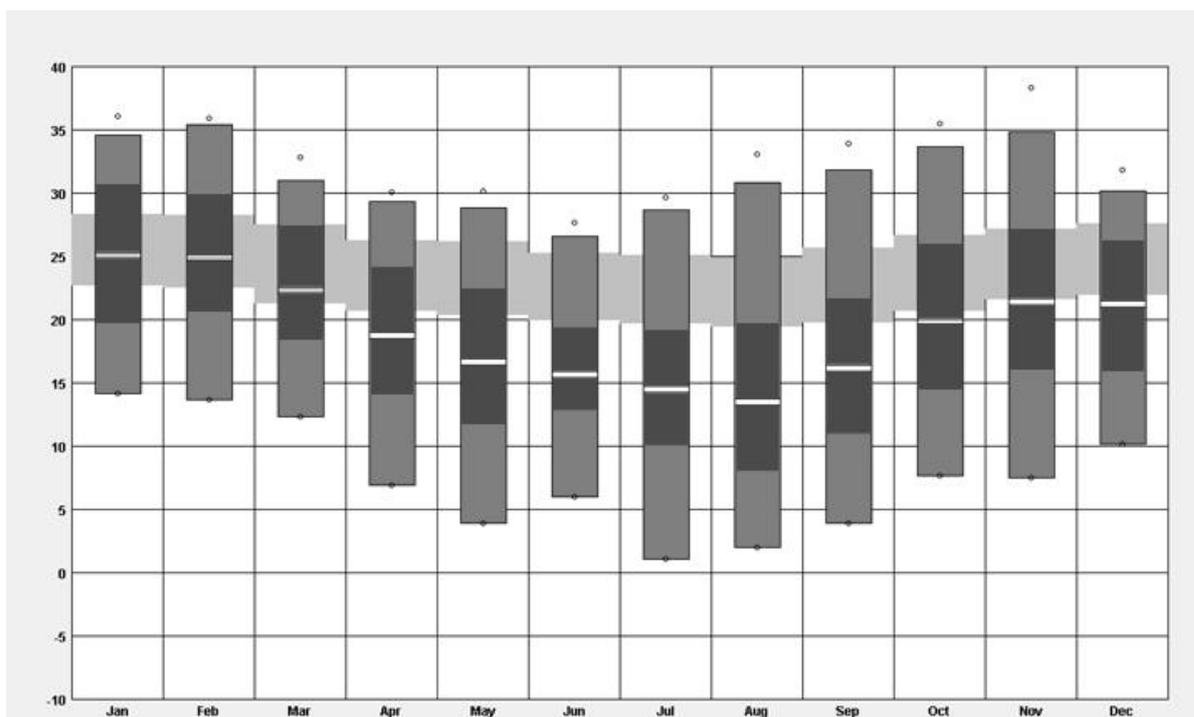


Fonte: Elaborado pelo autor no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015), por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Ao contrário do que ocorre nas demais cidades estudadas, Santa Maria apresenta grande variação de temperaturas ao longo de um só dia (Figura 110), como também grande amplitude térmica anual (Figura 105).

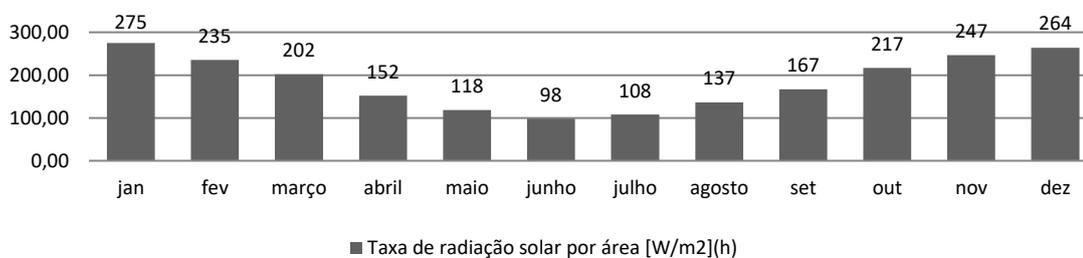
As maiores temperaturas ocorrem em sincronia com os meses nos quais há maior taxa de radiação solar incidente, de outubro a março (Figura 106).

Figura 105 - Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Santa Maria, RS.



Fonte: Elaborado pelo autor no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015), por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

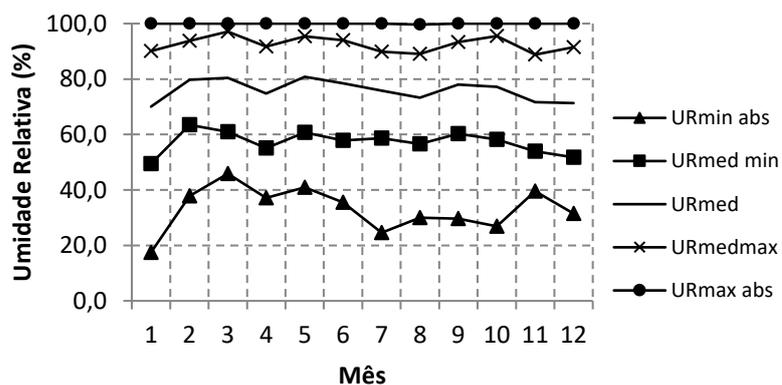
Figura 106– Taxa de radiação solar incidente [W/m^2] h, em Santa Maria/RS.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

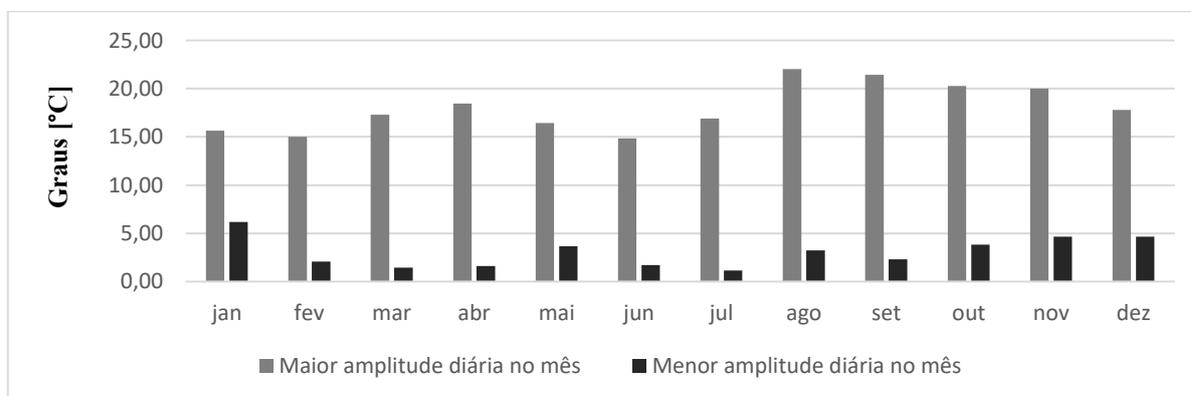
A baixa umidade relativa nos meses de julho a outubro (Figura 107) resultam nas maiores amplitudes térmicas diárias (Figura 108 e Figura 109).

Figura 107- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Santa Maria/RS.



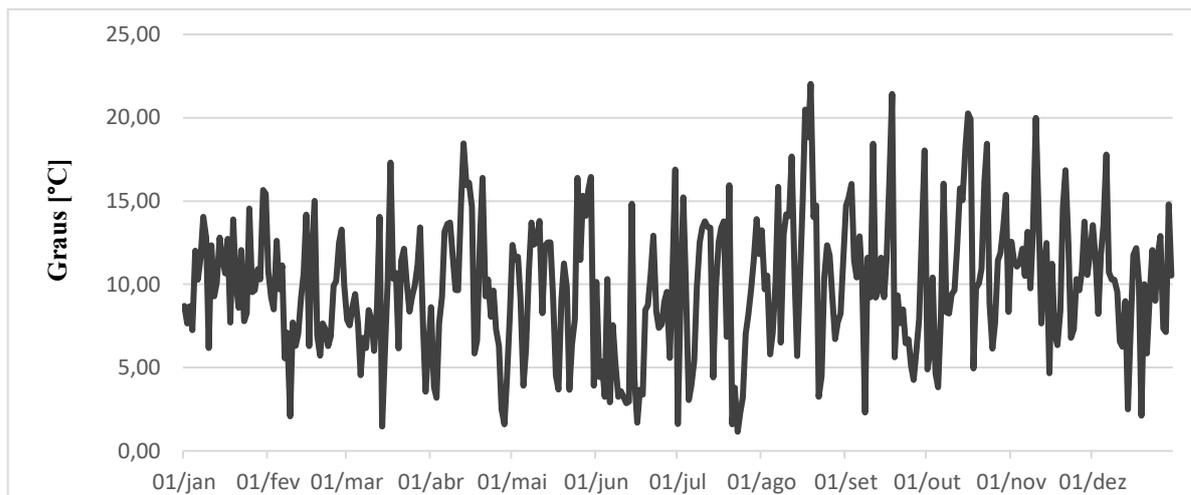
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 108- Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Santa Maria, RS.



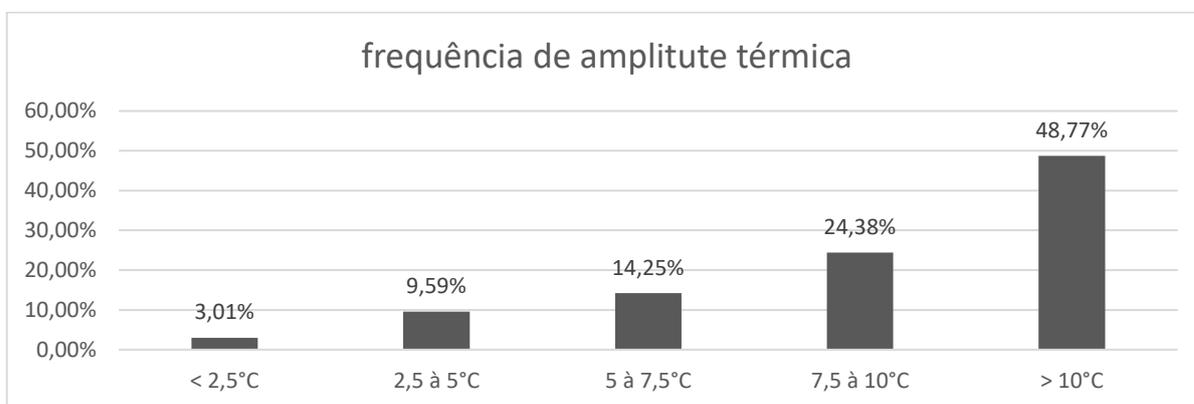
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 109 - Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Santa Maria, RS.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 110 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Santa Maria, RS.

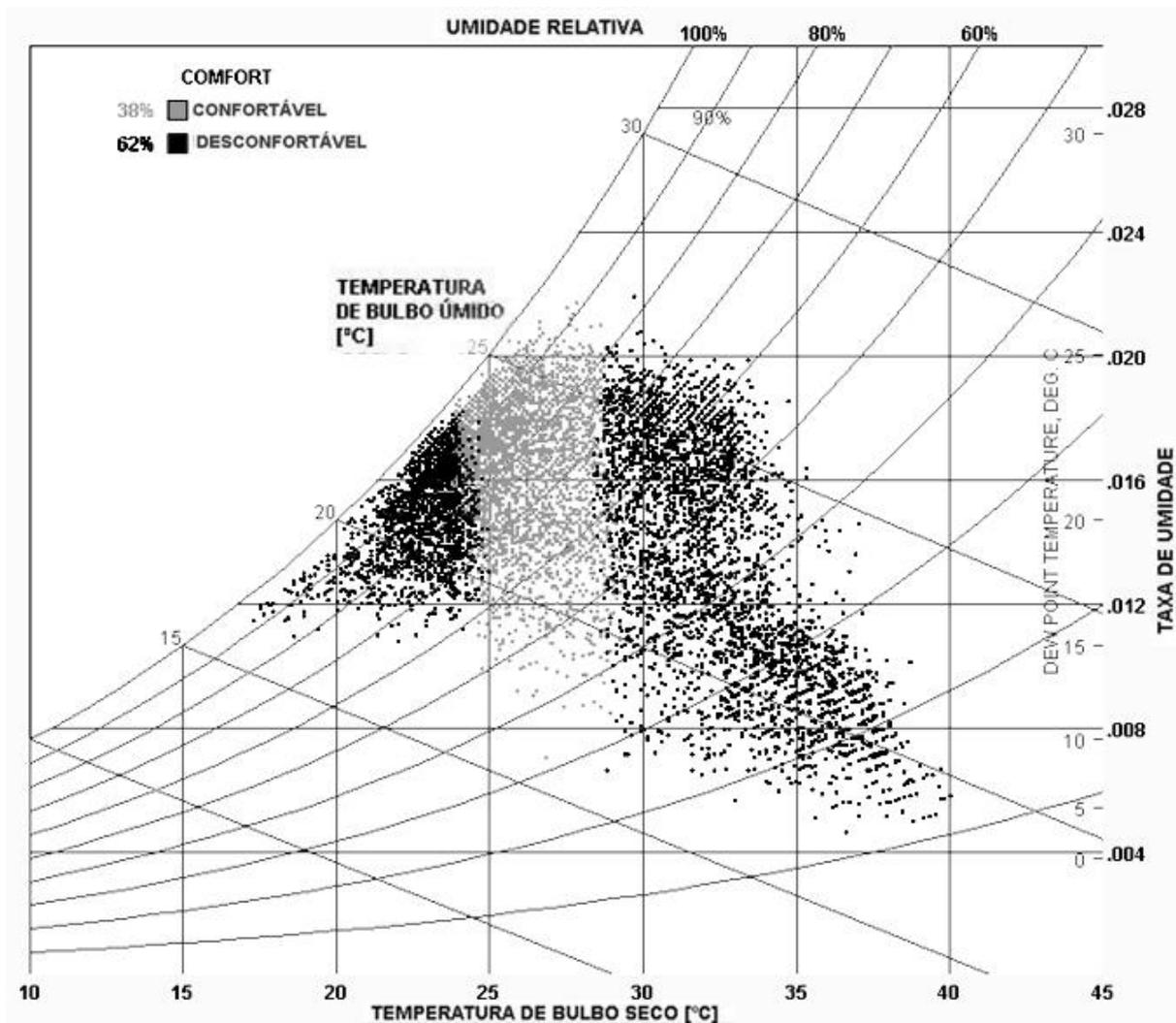


Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

5.1.2 Teresina

A cidade de Teresina está localizada na latitude 05°05'20" Sul e longitude 42°48'07" Oeste, e está situada na zona bioclimática 7, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005). O arquivo climático da cidade apresenta condições de conforto térmico em mais de um terço das horas do ano. No período restante, o desconforto ocorre principalmente por calor (Figura 111).

Figura 111- Carta Psicrométrica com dados horários típicos de temperatura e umidade de Teresina, PI. Pontos pretos: horas de desconforto. Pontos cinza: horas de conforto pelo modelo adaptativo.

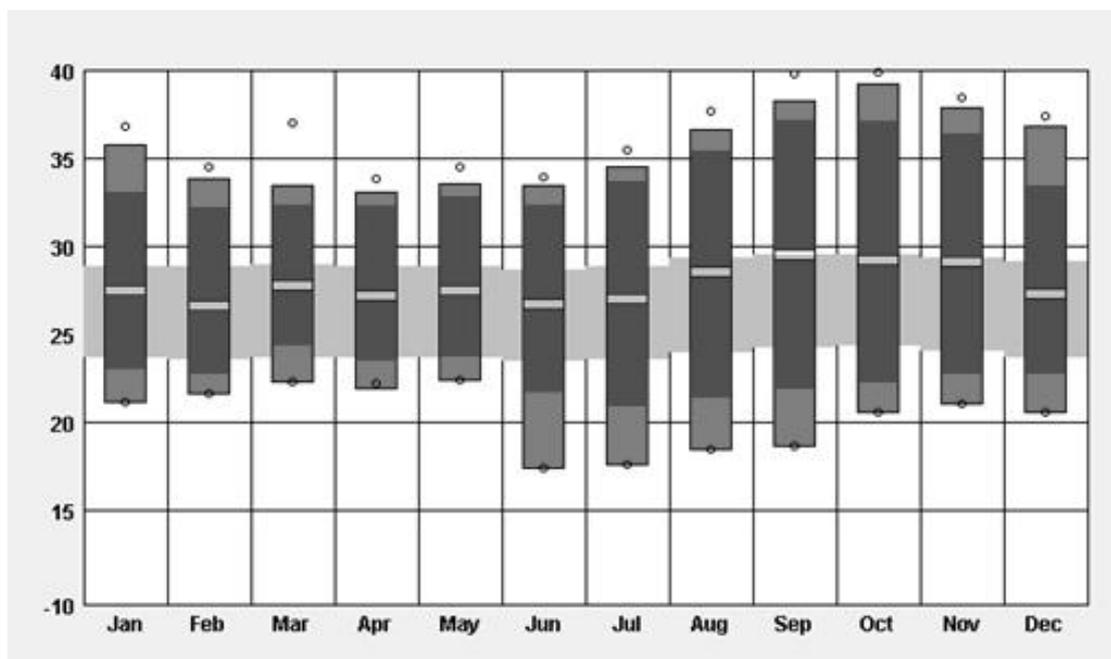


Fonte: Elaborado pelo autor no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015), por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Apesar de Teresina apresentar temperaturas máximas acima dos 30°C ao longo do ano, e podendo atingir valores próximos a 40°C no mês de outubro, as temperaturas médias de todos os meses se encontram dentro da zona de conforto térmico (Figura 112).

Outra característica importante a ser ressaltada, é uma menor amplitude térmica anual na cidade, principalmente se comparado ao que ocorre em Santa Maria.

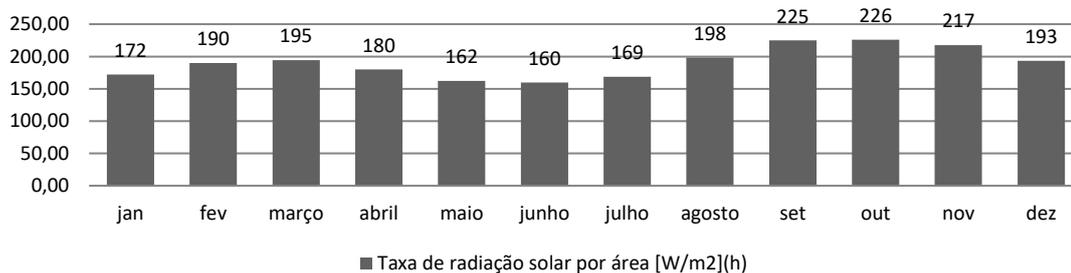
Figura 112-Temperaturas médias (vazio entre as barras cinza escuro), médias das máximas e médias das mínimas (limite superior e inferior das barras em cinza escuro), máximas e mínimas mensais (limite superior e inferior das barras em cinza intermediário) e área de conforto pelo modelo adaptativo (faixa cinza claro) na cidade de Teresina, PI.



Fonte: Elaborado pelo autor no software Climate Consultant 5.5 (UCLA, 2015), por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Em Teresina o índice de radiação solar incidente é elevado o ano todo, porém são os meses mais quentes aqueles que apresentam as taxas mais elevadas (Figura 113).

Figura 113- Taxa de radiação solar incidente [W/m^2] h, em Teresina/PI.

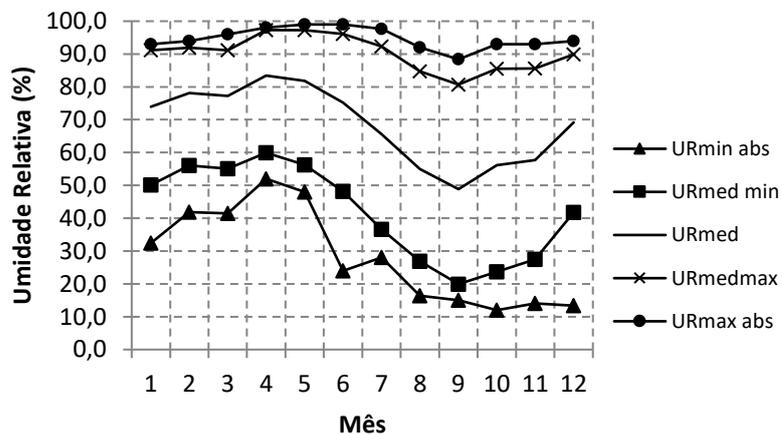


Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

A baixa umidade relativa de junho e dezembro, que pode chegar a quase 10% (Figura 114), resultam nas maiores amplitudes térmicas diárias, podendo atingir quase 18°C (Figura 114),

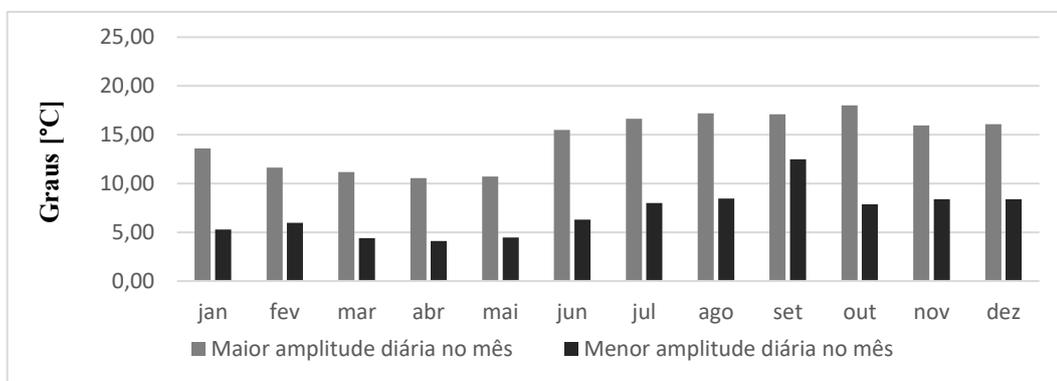
115 e Figura 116). De forma mais ampla, em 60% dos dias do ano a amplitude é superior à 10°C (Figura 117).

Figura 114- Umidade relativa do ar ao longo do ano na cidade de Teresina, PI.



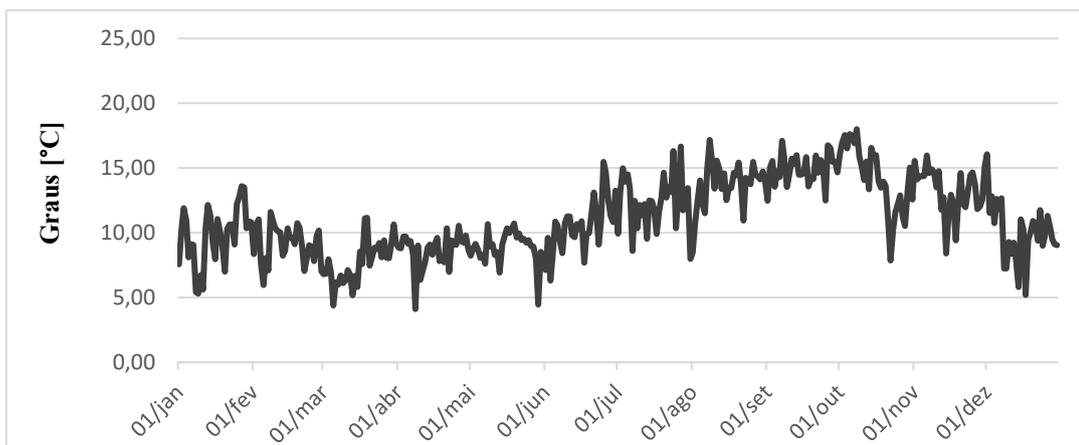
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 115 - Maiores e menores amplitudes térmicas diárias registradas em cada mês do ano na cidade de Teresina, PI.



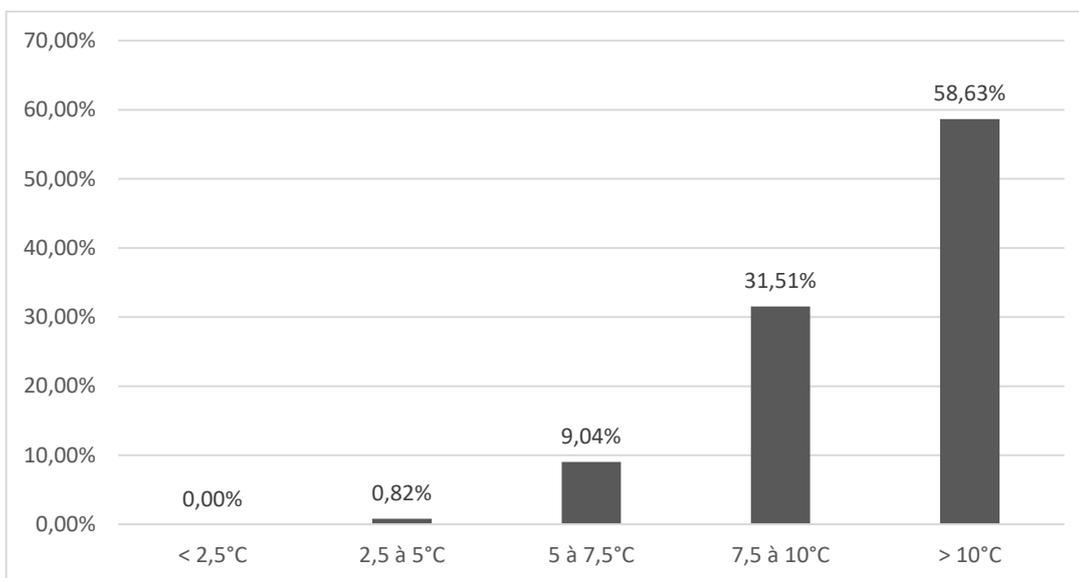
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 116- Amplitude térmica diária ao longo do ano na cidade de Teresina, PI.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

Figura 117 - Frequência de amplitude térmica diária na cidade de Teresina, PI.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do arquivo EPW (LABEEE, 2016).

5.2 DEFINIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A partir dos resultados obtidos com o estudo piloto, no qual foi utilizado um modelo *shoebox* e que se pôde verificar algumas potencialidades e limitações na utilização do PCM para se agregar maior conforto térmico, se definiu para esta etapa o modelo mais detalhado e próximo à realidade de uma HUPP.

Posto isto, o modelo computacional do estudo de caso foi concebido de forma a buscar a maior fidelidade possível com a formatação de uma HUPP, se levando em consideração todos os aspectos possíveis, que estão organizados sequencialmente dentro deste item, em seus respectivos subitens.

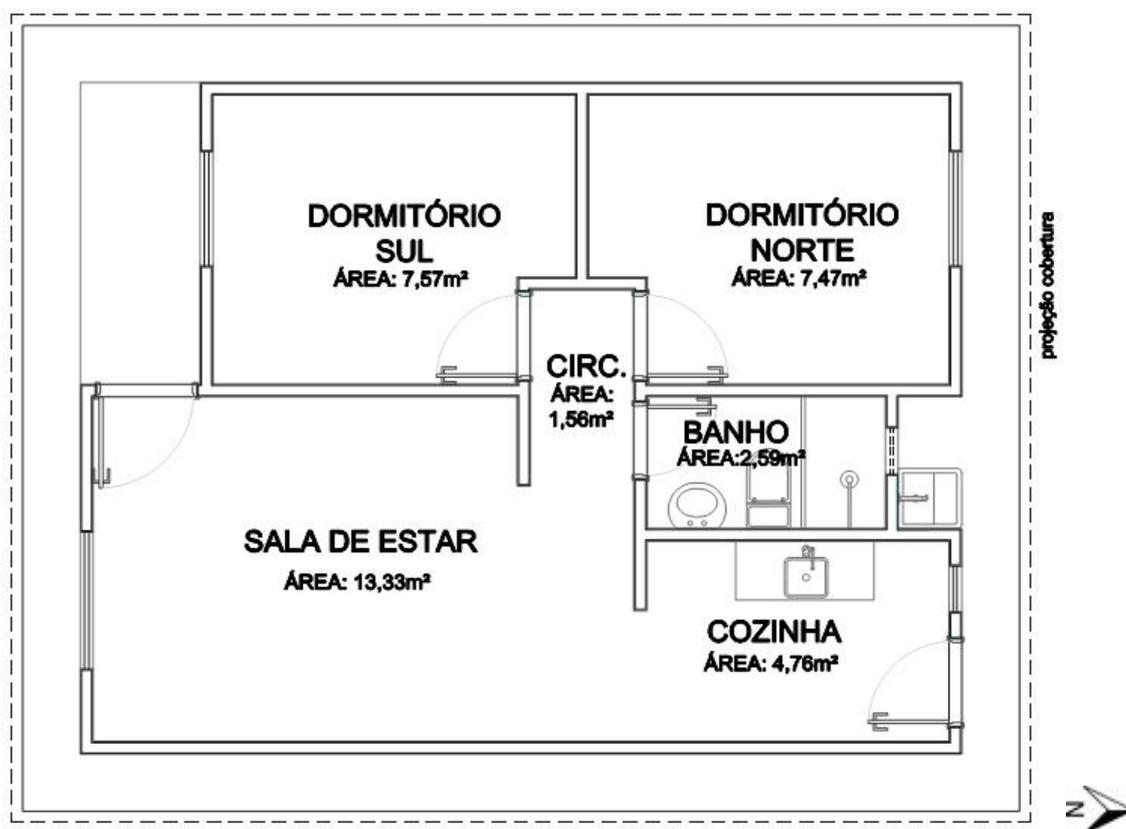
Cabe ressaltar, por fim, que alguns sub itens são reapresentados parcialmente e outros não são reapresentados, para se atingir um texto mais objetivo, uma vez que seus conteúdos são parcialmente ou totalmente idênticos para o estudo piloto, assim como para o estudo de caso.

5.2.1 Geometria do modelo

O modelo utilizado para as simulações do estudo de caso consiste em uma HUPP, com 37,3 m², contendo dois dormitórios, uma sala de estar integrada com cozinha (sem divisão interna por paredes entre estas), uma área de circulação e um banheiro (Figura 118), também presente na dissertação de mestrado de Passos (2016).

Este modelo, desta forma, buscou reproduzir o estudo piloto de forma mais detalhada, apresentando assim todas as subdivisões internas, e características geométricas internas e externas.

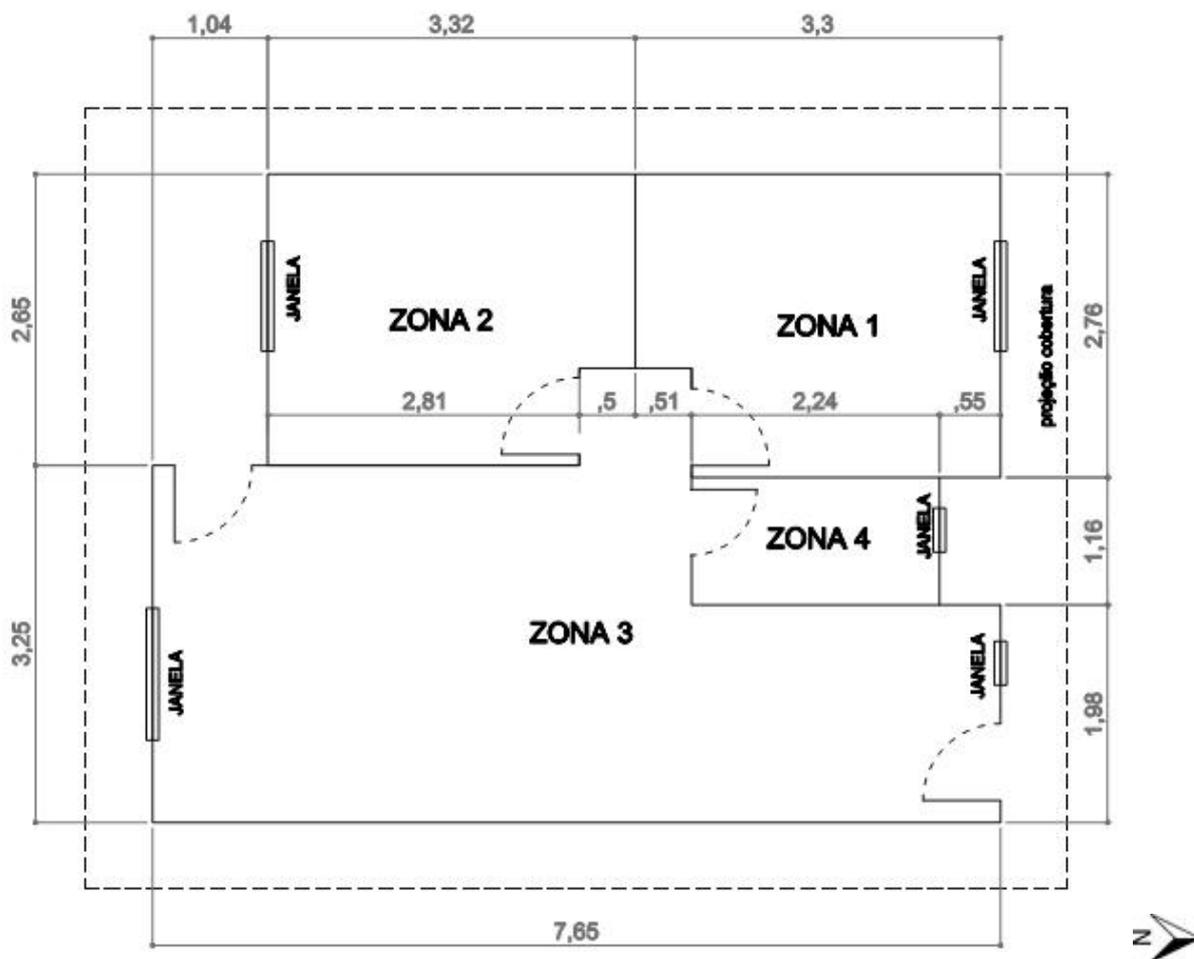
Figura 118- Planta baixa da edificação simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a simulação computacional, o modelo foi dividido em zonas. Cada uma destas zonas representando uma das subdivisões internas, conforme é possível verificar na Figura 119, tem como foco reproduzir o volume de cada ambiente, tal como as áreas de fechamento vertical e aberturas das mesmas.

Figura 119 - Zoneamento térmico da edificação simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

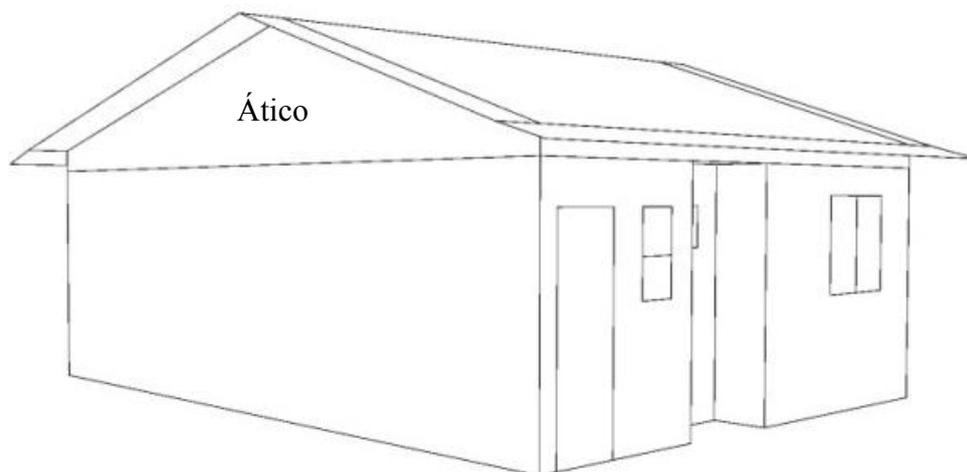
Quanto às aberturas do modelo, em ambos os dormitórios, zonas 1 e 2, estão presentes janelas com $1,44 \text{ m}^2$ de área, voltadas para o exterior da edificação, que permite a troca de ar através 50% de sua área (Figura 120 e Figura 121).

Junto à circulação, os ambientes apresentam portas em madeira que permitem a ventilação cruzada.

A sala, região sul da zona 3, apresenta janela com duas folhas de correr, em vidro e com $1,44 \text{ m}^2$, além de porta em madeira que permite o acesso ao exterior da edificação, tal como a ventilação (Figura 120 e Figura 121).

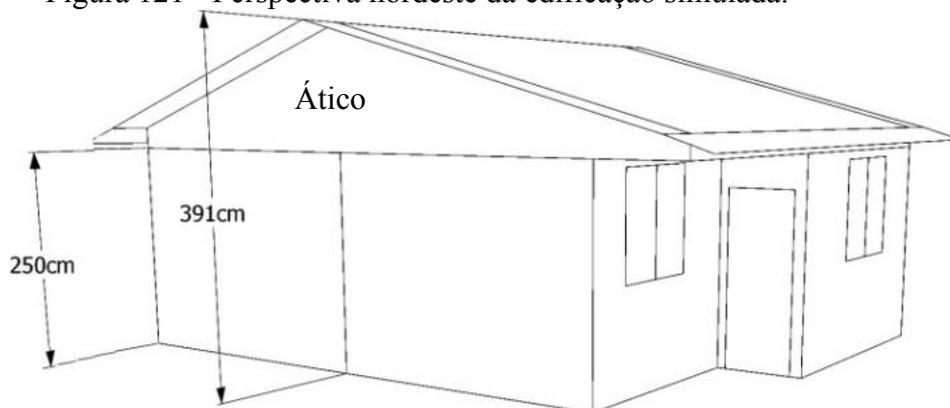
A cozinha, situada na área norte desta mesma zona, apresenta janela máximo-ar em vidro com $0,32 \text{ m}^2$, assim como porta de acesso ao exterior da edificação, que também permite a ventilação. O banheiro, zona 4 do modelo, conta com uma porta de acesso junto à sala e uma janela máximo-ar em vidro com $0,16 \text{ m}^2$ de área (Figura 120).

Figura 120- Perspectiva sudoeste da edificação simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

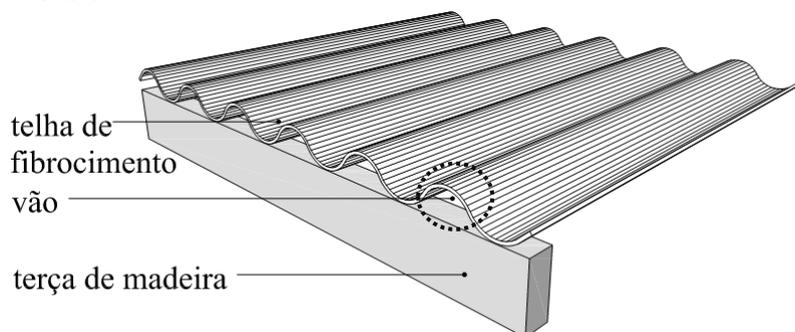
Figura 121 - Perspectiva nordeste da edificação simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, cabe frisar, que há um ático entre a laje e o telhado, caracterizando uma quinta zona do modelo, sendo esta considerada como uma área sem carga térmica interna, sem ocupação humana, preenchida somente de ar e ventilado por meio do vão entre a telha de fibrocimento e a terça de sustentação (Figura 122), tal como apontado por Lamberts (1988).

Figura 122 -Detalhe da cobertura, em destaque o vão entre a telha de fibrocimento e a terço que a sustenta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Cargas Térmicas internas

Os padrões de ocupação aplicados no modelo do estudo de caso são idênticos ao utilizado no estudo piloto, já apresentado no item 3.2.2. A única diferença entre os mesmos, é que por o estudo de caso constituir cinco zonas térmicas, sendo destas três de permanência prolongada (dormitórios e sala/cozinha), as cargas internas e padrões de uso foram utilizados de forma discriminada, tal como a NBR15575 (ABNT, 2021) recomenda e que pode ser consultada no item já citado.

5.2.3 Regime de ventilação

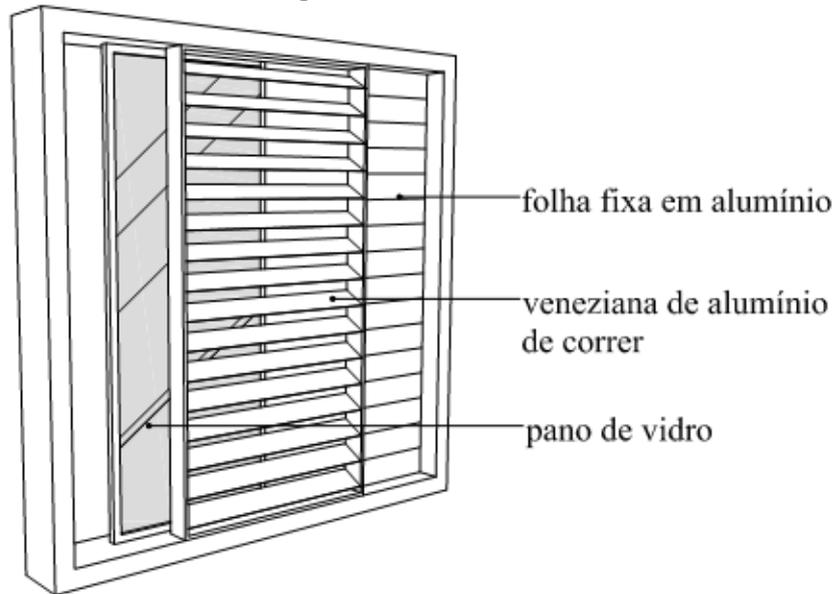
Os padrões do regime de ventilação adotados no estudo de caso seguiram o utilizado no estudo piloto, e que é apresentado no item 3.2.3, sendo estes utilizados em todos ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala/cozinha), se dando por meio das aberturas, considerando as trocas ocorridas por esta e que ocorrem a partir das condições de vento e temperatura, ao invés de adotar-se a taxa de 1 troca de ar por hora, conforme no estudo piloto.

5.2.4 Regime de proteção solar em esquadrias

No modelo utilizado nas simulações computacionais do estudo de caso foi considerado proteção solar para as janelas dos dormitórios, com o intuito de evitar o excessivo ganho de calor por meio da radiação solar nestes ambientes.

Estas, aplicadas de duas formas, sendo a primeira constituída por uma folha fixa em alumínio, que não permite a incidência de radiação solar direta e nem ventilação; e a segunda por uma veneziana de alumínio de correr que permite a ventilação ao mesmo tempo em que gera proteção contra a radiação solar (Figura 123), sendo acionada sempre que a radiação solar incidente tenha um valor igual ou superior a 300 W/m^2 .

Figura 123- Modelo de esquadria considerado no modelo do estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.5 Casos estudados

No estudo de caso, somando-se às três configurações de envoltórias já estudadas no estudo piloto, foi considerado um quarto caso com a vedação em *drywall* associado à uma chapa de concreto (paredes e cobertura), desta forma em uma composição dotada de maior capacidade térmica com espessura equivalente ao gesso somado ao PCM, no Caso 3. Este último caso foi considerado com o intuito de se estabelecer uma comparação, evidenciando assim a eficácia, ou não, na adoção do PCM em estabelecer melhores condições térmicas ao ambiente interno (Tabela 24).

Tabela 24 – Composição do Caso 4.

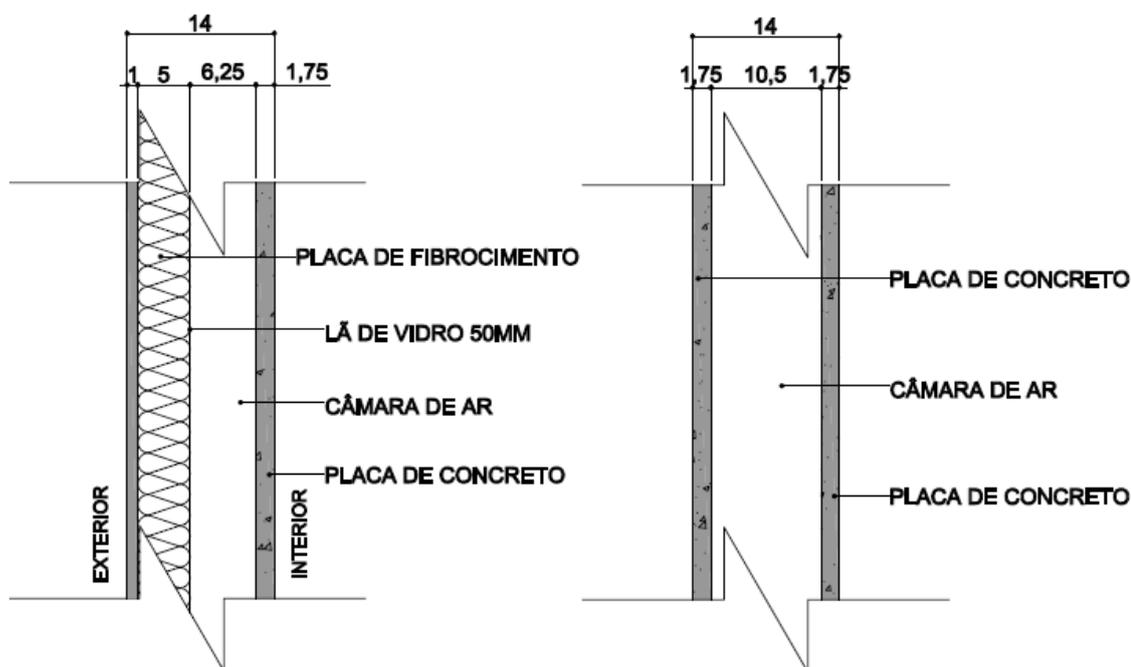
Caso	Paredes externas	Paredes internas	Teto	Telhado
4	Drywall isolado + camada em concreto	Drywall isolado + camada em concreto	Laje de concreto	Telha de fibrocimento + isolante térmico (lã de vidro)

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.6 Configurações de envoltória do estudo de caso

O Caso 4 foi caracterizado sob duas diferentes composições de paredes, sendo uma externa e outra interna. Desta forma, este caso apresenta a parede externa contendo, placa de fechamento em fibrocimento e concreto, uma câmara de ar e camada de lã de vidro. Já as paredes internas são caracterizadas por uma câmara de ar envolta por duas placas de concreto (Figura 124).

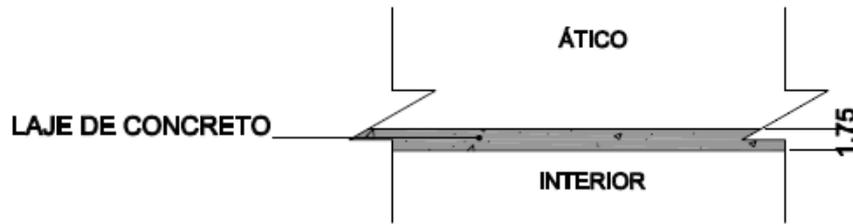
Figura 124 - Configurações de paredes em *drywall* associado a placas de concreto: à esquerda, paredes externas, à direita paredes internas).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teto da habitação foi considerado em laje de concreto, conforme é possível ver na Figura 125.

Figura 125 – Configuração de laje em concreto com isolante térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.7 Materiais construtivos

Para as simulações dos estudos de foram adotadas as características físicas de cada um dos materiais conforme já especificados no item 3.2.7, somados aos componentes adotados no Caso 4 (Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29).

Tabela 25 - Propriedades físicas dos materiais empregados no modelo no Caso 4.

Materiais	Espessura (m)	λ (W/m.K)	R_t (m ² .K/W)	c (kJ/(kg.K))	ρ (kg/m ³)	C_t (kJ/(m ² .K))	α
placa de concreto	0,0175	1,75	0,01	1,00	2200	38,5	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26- Propriedades físicas das paredes empregada no modelo no Caso 4.

Parede	RT [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	CT [kJ/m ² .K]
Drywall+ Concreto (interna)	0,35	2,86	77
Drywall+ Concreto (externa)	1,55	0,65	55,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27- Propriedades físicas da cobertura empregada no modelo no Caso 4.

Cobertura	RT [m ² .K/W]	U [W/m ² .K]	CT [kJ/m ² .K]
Drywall+ Concreto	1,42	0,704225	49,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28– Composição das paredes empregadas no modelo no Caso 4.

Elemento construtivo	Parede externa Drywall+ Concreto	Parede interna Drywall+ Concreto
Camada externa	Placa Fibrocimento	Placa de concreto
Camada 2	Lã de Vidro 50mm	Câmara de ar
Camada 3	Câmara de ar	Placa de concreto
Camada 4	Placa de concreto	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29– Composição da cobertura empregadas no modelo no Caso 4.

Elemento construtivo	Cobertura Drywall+ Concreto
Camada externa	Telha fibrocimento
Camada 2	Lã de Vidro 50mm
Camada 3	Câmara de ar
Camada 4	Laje de concreto

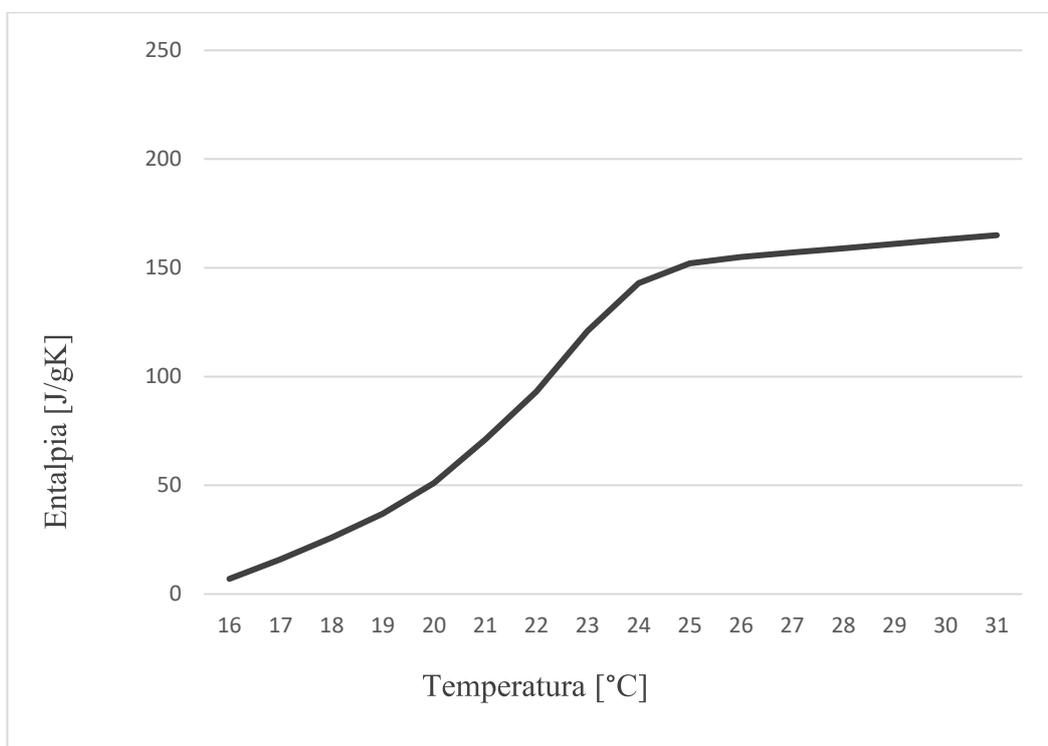
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.7.1 PCM's utilizados nos Estudos de Caso

Para os estudos de caso, além dos PCM's adotados no estudo piloto (item 3.2.7.1), que voltam a ser considerados para as condições climáticas de Brasília e Goiânia, foram também adotados três novos materiais, que se adequam mais, conforme a revisão de bibliografia e de acordo com os estudos previamente elaborado, às condições térmicas às quais são submetidos.

Na cidade de Santa Maria, para a escolha do PCM foram adotadas duas estratégias. A primeira, considerando a temperatura média ao longo do ano, assumindo o PCM como uma estratégia de resfriamento e aquecimento, desta forma seguindo a indicação de adoção de um material com temperatura de fusão 1 a 3 °C acima da temperatura média do ambiente sem o uso do material, tal como feito nos demais estudos de caso, conforme a indicação de Peippo, Kauranen e Lund (1991). Como a média de temperatura se apresentou em 21,2°C, foi adotado um PCM com temperatura de fusão em 24°C (Figura 126).

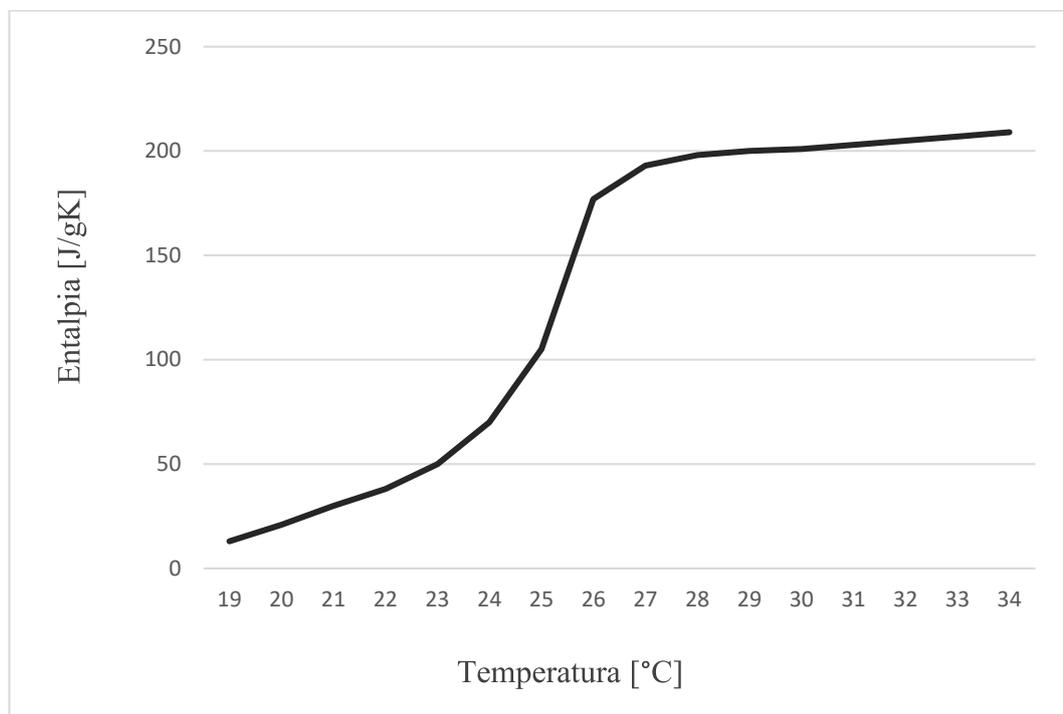
Figura 126- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 24°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em catálogo fornecido pelo fabricante.

A segunda estratégia considerou a temperatura média da habitação somente nos meses mais quentes (outubro a março), assumindo o PCM como uma estratégia de resfriamento. Desta forma, como a média se apresentou em 24,1°C, foi adotado um material de temperatura de fusão em 26°C (Figura 127).

Figura 127- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo de caso com temperatura de fusão em 26°C.

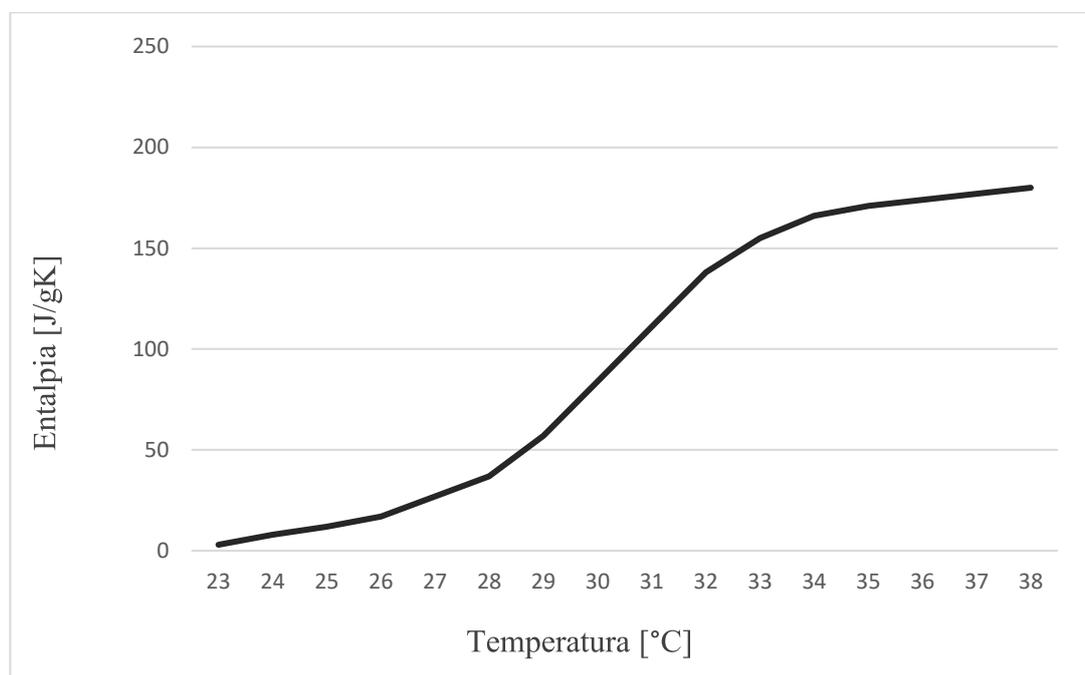


Fonte: Elaborado pelo autor, com base em catálogo fornecido pelo fabricante.

Esta segunda estratégia se fez necessária, pois há, na cidade de Santa Maria, uma maior amplitude térmica anual, e sendo assim, propiciando uma maior dificuldade em o PCM completar o seu ciclo ao longo do ano.

Na cidade de Teresina foi adotado o material seguindo a metodologia de Peippo, Kauranen e Lund (1991), considerando a temperatura média ao longo do ano, assumindo o PCM como uma estratégia de resfriamento e aquecimento. Considerando a média de 28,7°C na habitação ao longo do ano, foi adotado um PCM com temperatura de fusão de 31°C (Figura 128).

Figura 128- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 31°C.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em catálogo fornecido pelo fabricante.

5.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O método de avaliação dos resultados do estudo de caso foi considerado igual ao do estudo piloto, tendo como única diferença a não análise de balanço térmico, que somente foi utilizado anteriormente, com o objetivo de demonstrar as fontes de ganho e perda de calor através da envoltória, e assim dar suporte na elaboração do estudo de caso.

6 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

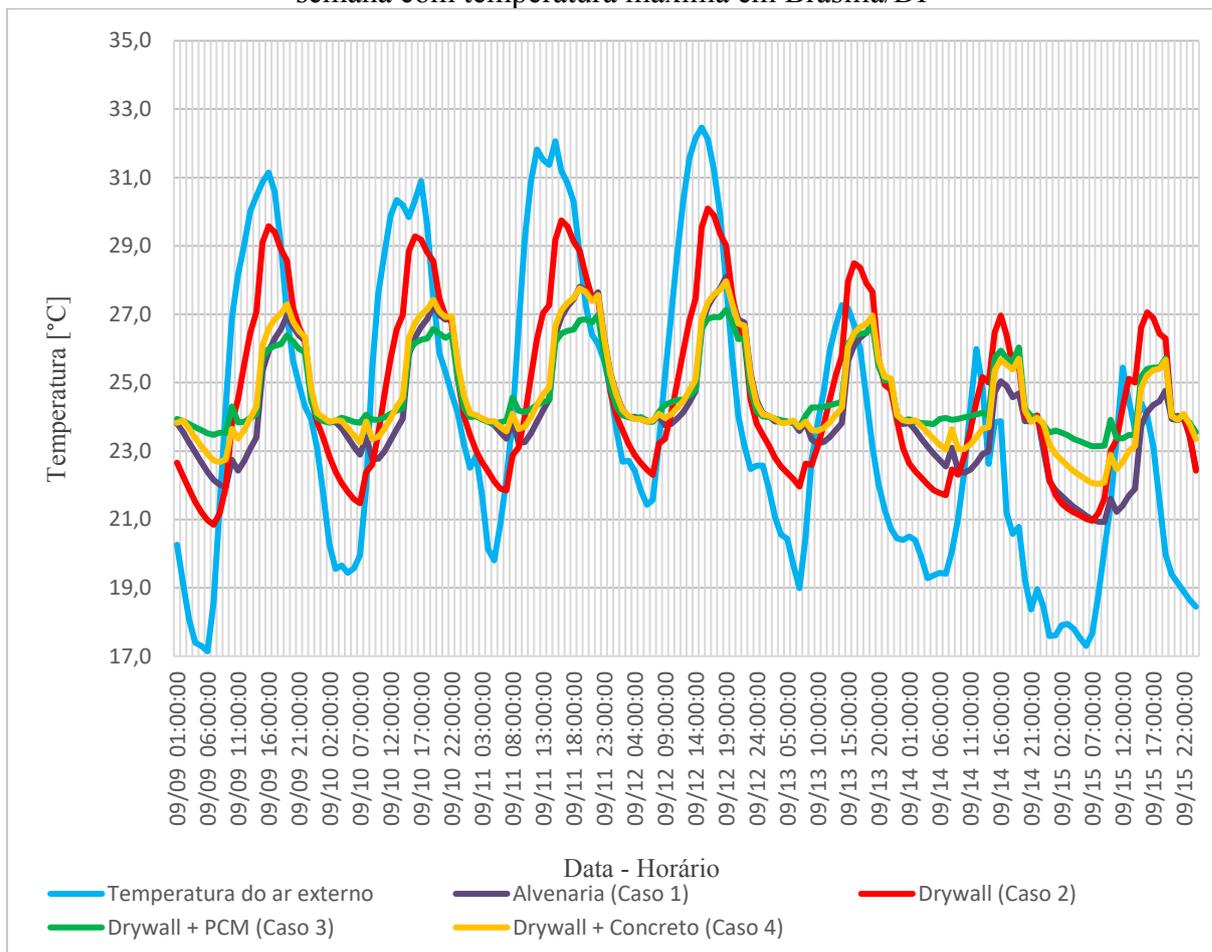
6.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM BRASÍLIA

Na cidade de Brasília, o modelo completo da HUPP, tal como o estudo piloto, apresentou resultados positivos quanto à utilização do PCM. Na semana na qual se apresentam as temperaturas mais altas ao longo do ano (Figura 129), o modelo utilizando o material associado ao sistema leve de construção foi aquele que apresentou as maiores reduções de temperatura nos horários mais críticos.

Desta forma, é possível também verificar, que a adoção do PCM trouxe um enorme benefício às condições térmicas internas, uma vez que o modelo em *drywall* (Caso 2), cuja formatação de envoltória é idêntica, com exceção à não adoção do material, foi a que apresentou as maiores temperaturas, assim como as maiores amplitudes térmicas internas durante o período.

O PCM ao passar pela sua mudança de fase, que se dá próximo aos 25°C, faz com que a temperatura no interior do modelo não avance muito além desta, criando assim um platô no gráfico.

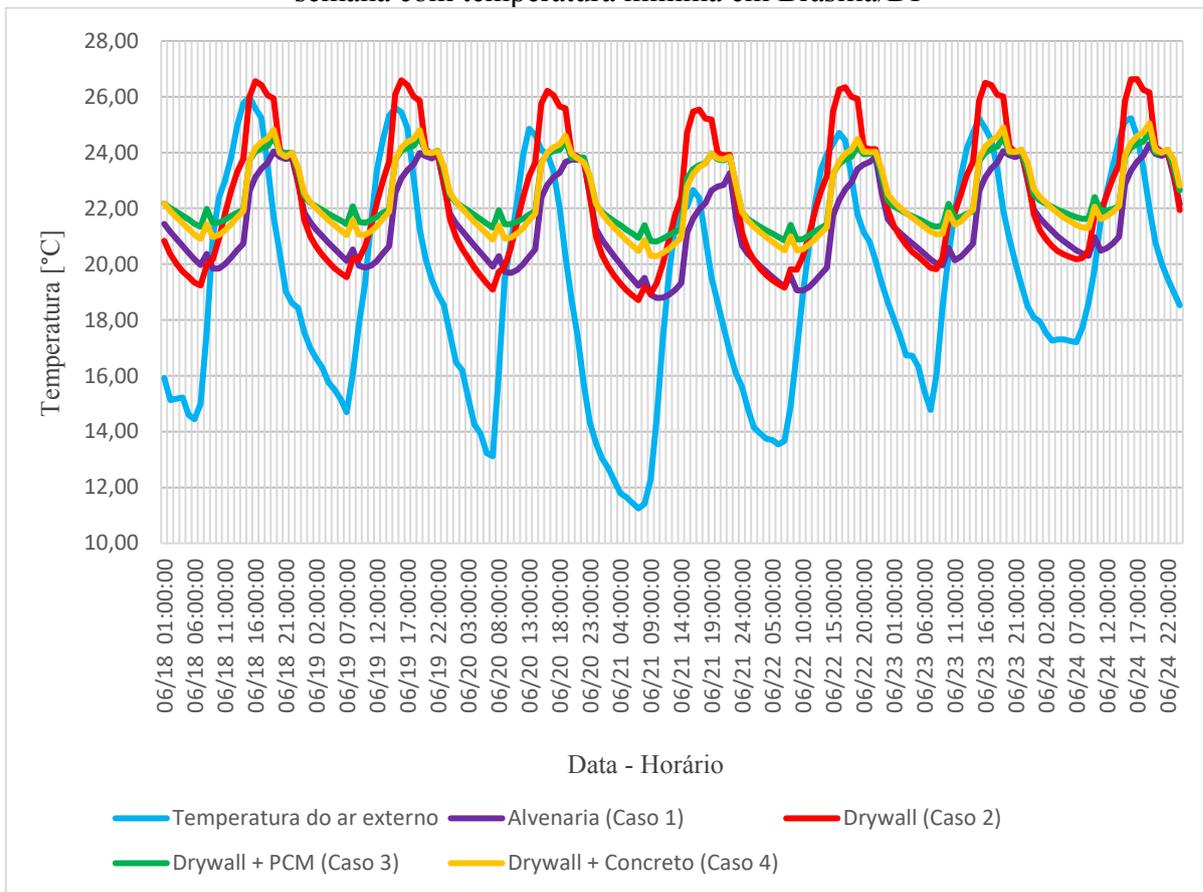
Figura 129- Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima em Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando submetido às condições de temperaturas mais amenas, como é o caso do período mais frio na cidade Brasília (Figura 130), o material também se apresenta extremamente benéfico, por resultar em maiores temperaturas nos horários mais frios, e menor amplitude térmica.

Figura 130- Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima em Brasília/DF

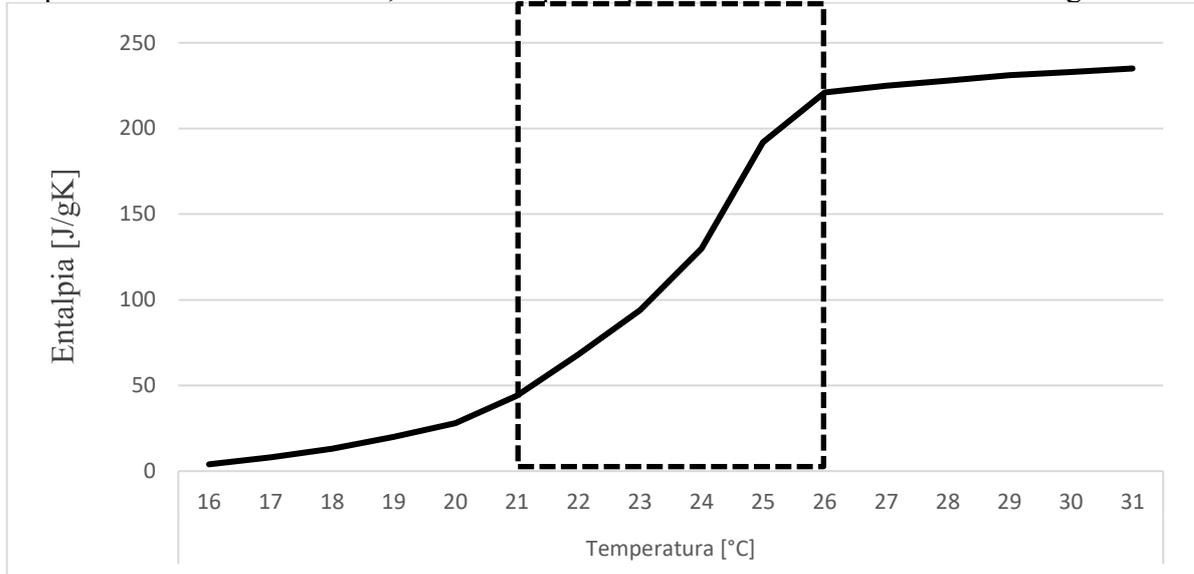


Fonte: Elaborado pelo autor

Um importante dado a ser analisado, é que em Brasília, em ambos os períodos, a temperatura do ar tem uma variação suficiente para que o material cumpra com seu ciclo de mudança de fase.

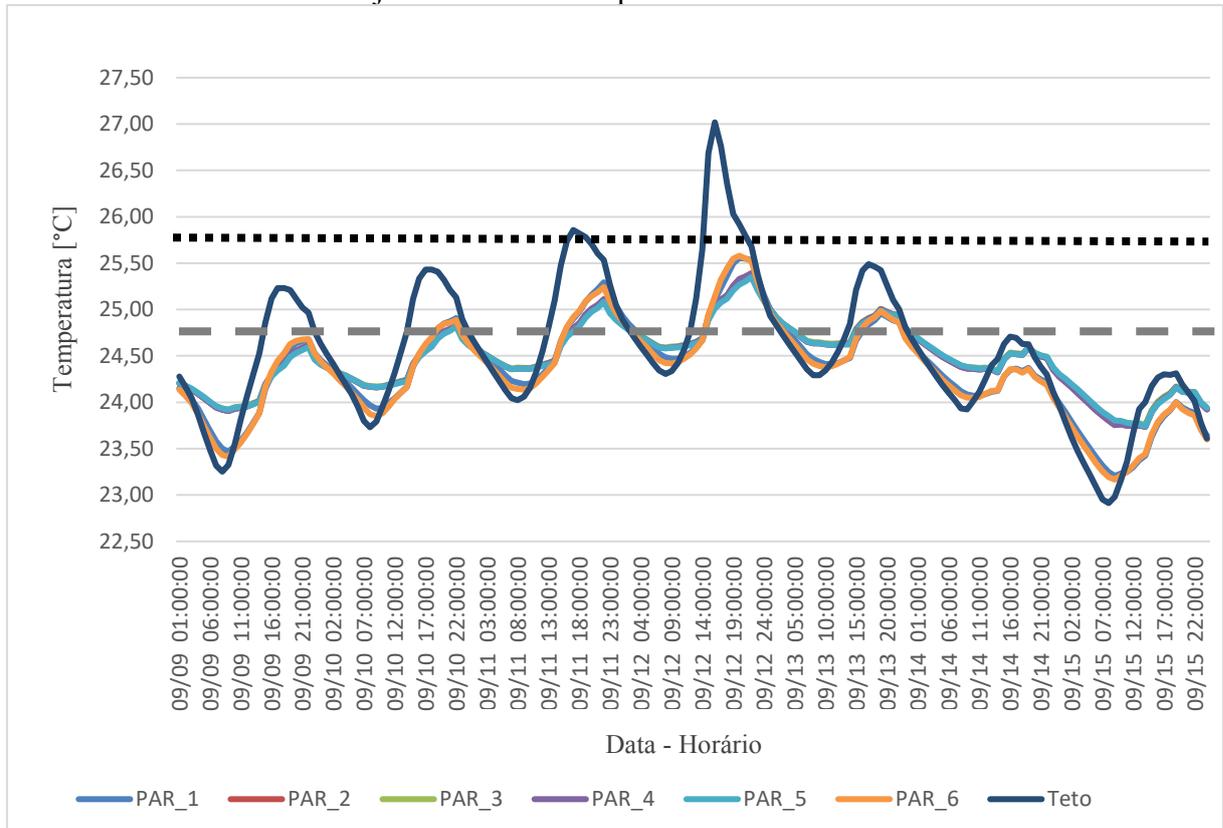
O PCM utilizado, apesar de ter seu ponto de fusão estabelecido na temperatura de 25°C, o maior acúmulo de energia latente se dá de forma mais distribuída entre as temperaturas de 21 à 26°C (Figura 131). Desta forma, mesmo quando a temperatura da superfície no qual o material está aplicado não se encontra exatamente em 25°C (Figura 132), a envoltória cumpre a sua função, armazenando calor, tornando assim o ambiente interno menos propício a ocorrências de temperaturas e amplitudes térmicas muito elevadas.

Figura 131 - Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 25°C, com destaque ao período de maior acúmulo de energia latente.



Fonte: Elaborado pelo autor

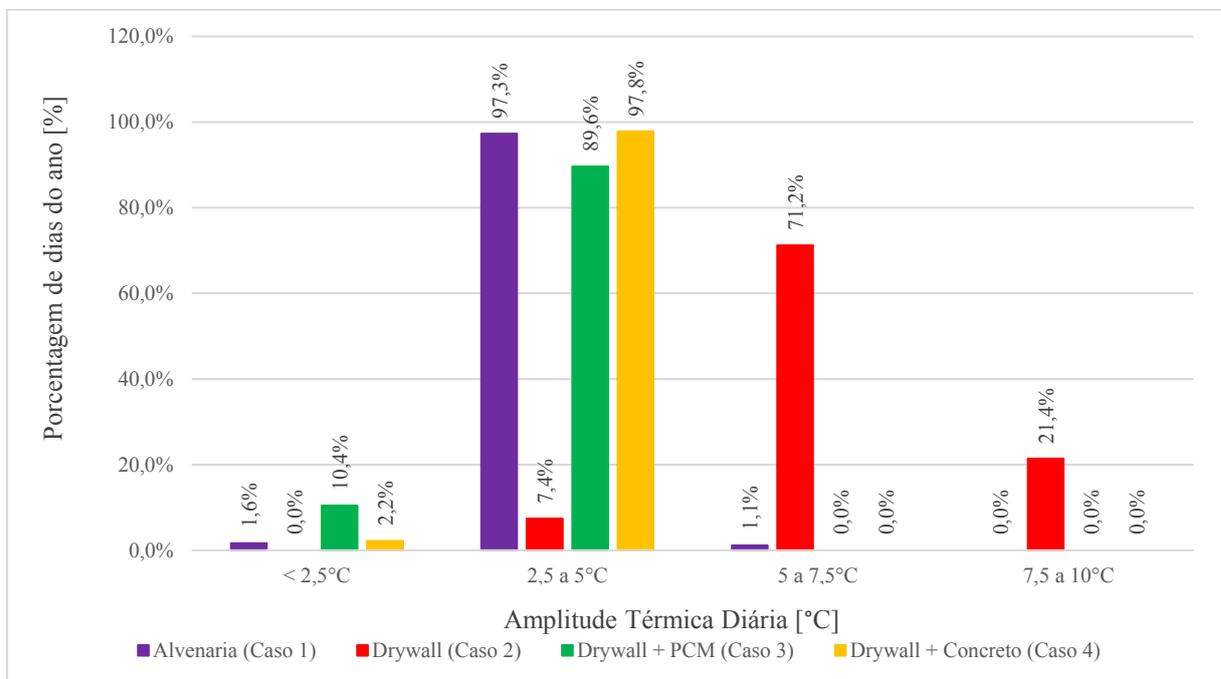
Figura 132- Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em *drywall* somado ao PCM na semana com temperatura máxima para Brasília/DF. Linha pontilhada em preto: limite superior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa ação do PCM trouxe também, como consequência, uma grande redução na amplitude térmica diária dentro do modelo, principalmente se comparado ao caso em *drywall* (Figura 133). Esta, dentre todas as formulações de envoltória, foi a que apresentou maior porcentagem de dias com variações abaixo de 2,5°C, enquanto o Caso 2 foi o que apresentou mais ocorrência de variações diárias de 5 à 7,5°C, e de 7,5 à 10°C.

Figura 133 - Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor

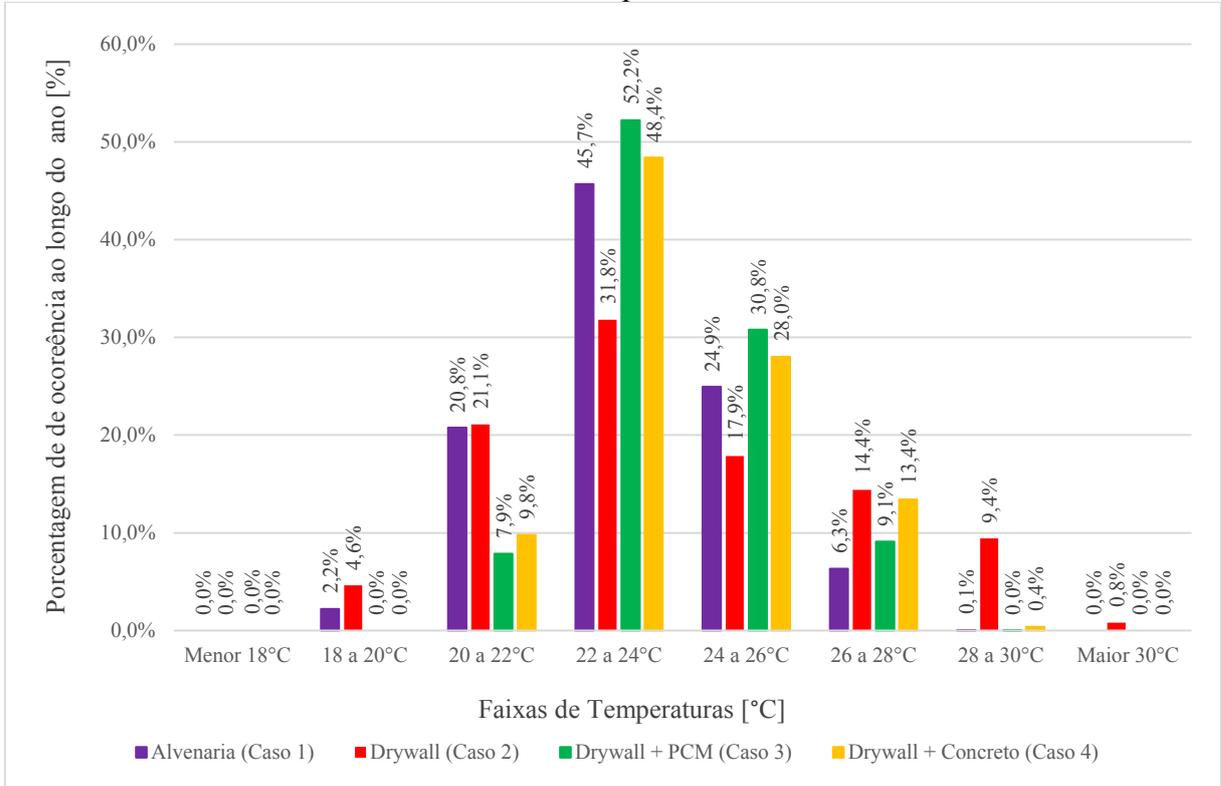
As mesmas faixas de temperaturas às quais o PCM apresenta maior acúmulo de energia latente também são aquelas que se apresentam com maior frequência no modelo, uma vez que em mais de três quartos do ano ocorrem temperaturas entre os 22 e 26°C (Figura 134).

Essa maior ocorrência de temperatura neste intervalo, colabora, de forma incisiva, para que haja maior condição de conforto térmico no interior da edificação (Figura 135), uma vez que esta configuração de envelope apresenta melhores índices nesse quesito.

O Caso 1, dotado de maior capacidade térmica, e o Caso 4, dotado de uma placa de concreto com espessura equivalente à do PCM agregado ao gesso presente na face interna do

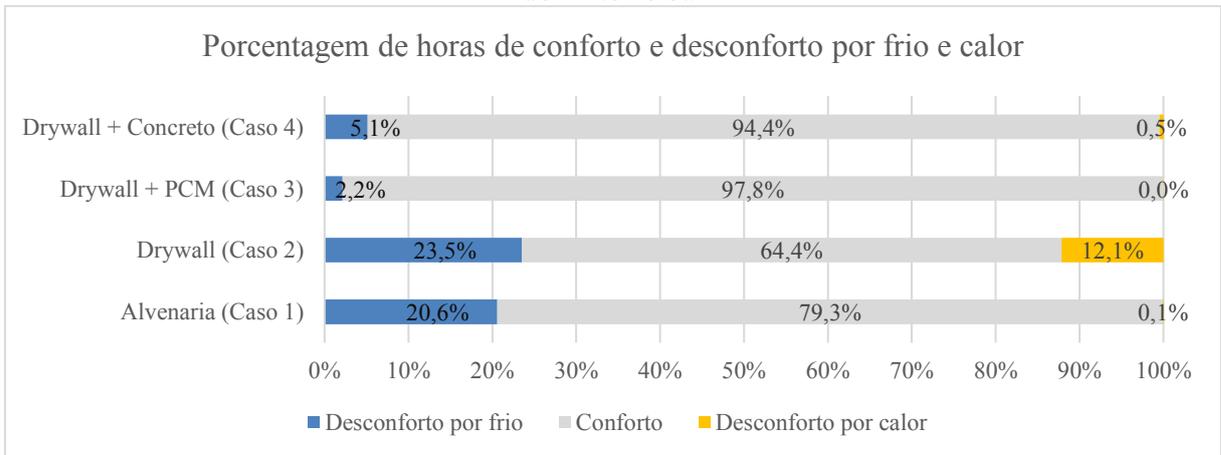
Caso 3, obtiveram resultados não tão positivos quanto o modelo em *drywall* somado ao PCM, demonstrando assim a aplicabilidade deste último às condições climáticas de Brasília.

Figura 134 - Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Brasília/DF



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 135– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul



Fonte: Elaborado pelo autor

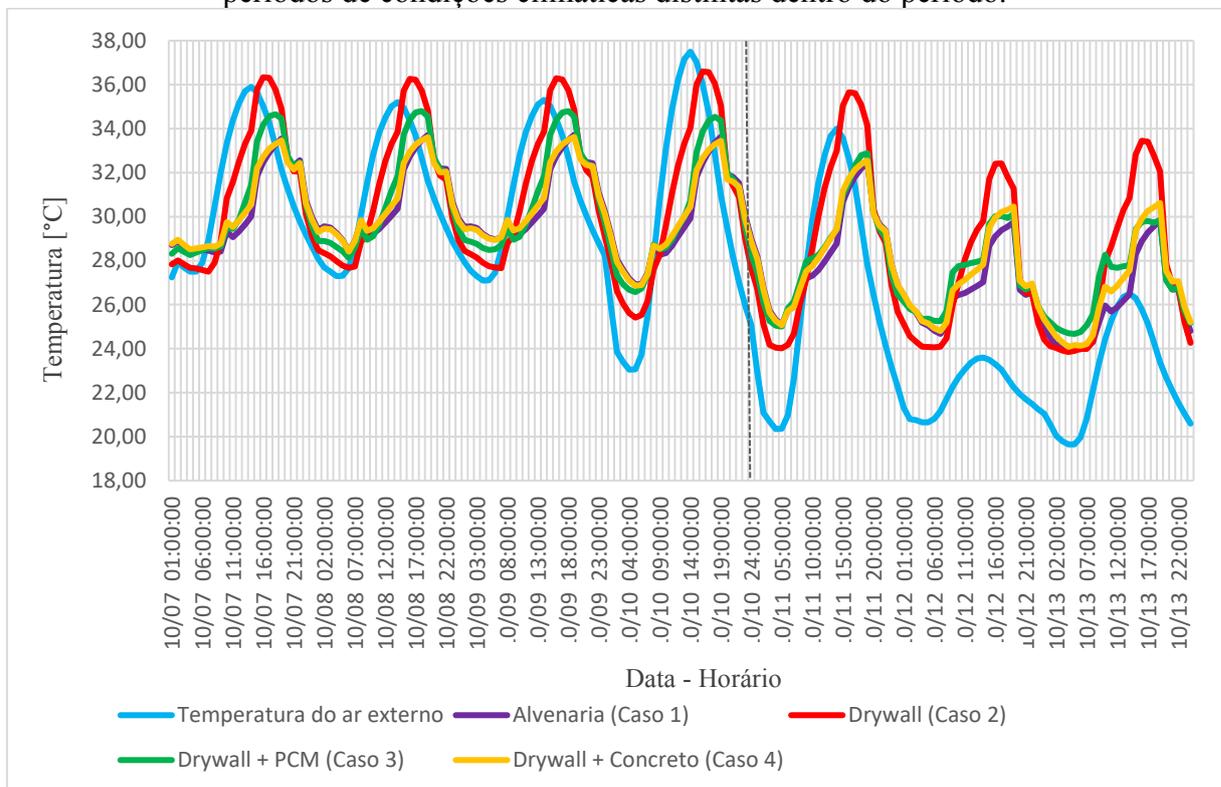
6.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA

As condições climáticas de Goiânia, sobretudo na semana com temperatura máxima, trazem um bom panorama dos limites quanto à utilização do PCM associado ao *drywall*. Nesse período, ilustrado na Figura 136, é possível verificar dois momentos bem distintos: o primeiro, em que há uma menor amplitude térmica diária e no segundo em que a amplitude térmica se apresenta maior.

Nos quatro primeiros dias, é possível verificar que o modelo no qual a envoltória é composta por *drywall* associado ao PCM não apresenta grandes benefícios às condições térmicas internas, apresentando temperaturas e amplitudes térmicas diárias mais elevadas do que os modelos em alvenaria e *drywall* associado a elementos de vedação em concreto.

Nos três últimos dias, o Caso 3 se apresenta como aquele cujas amplitudes térmicas internas são as mais reduzidas e as temperaturas no período mais quente do dia são similares aos Casos 1 e 4 (maior massa), e inferiores ao Caso 2 (menor massa).

Figura 136-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima em Goiânia/GO. Em tracejado a divisão entre os dois períodos de condições climáticas distintas dentro do período.



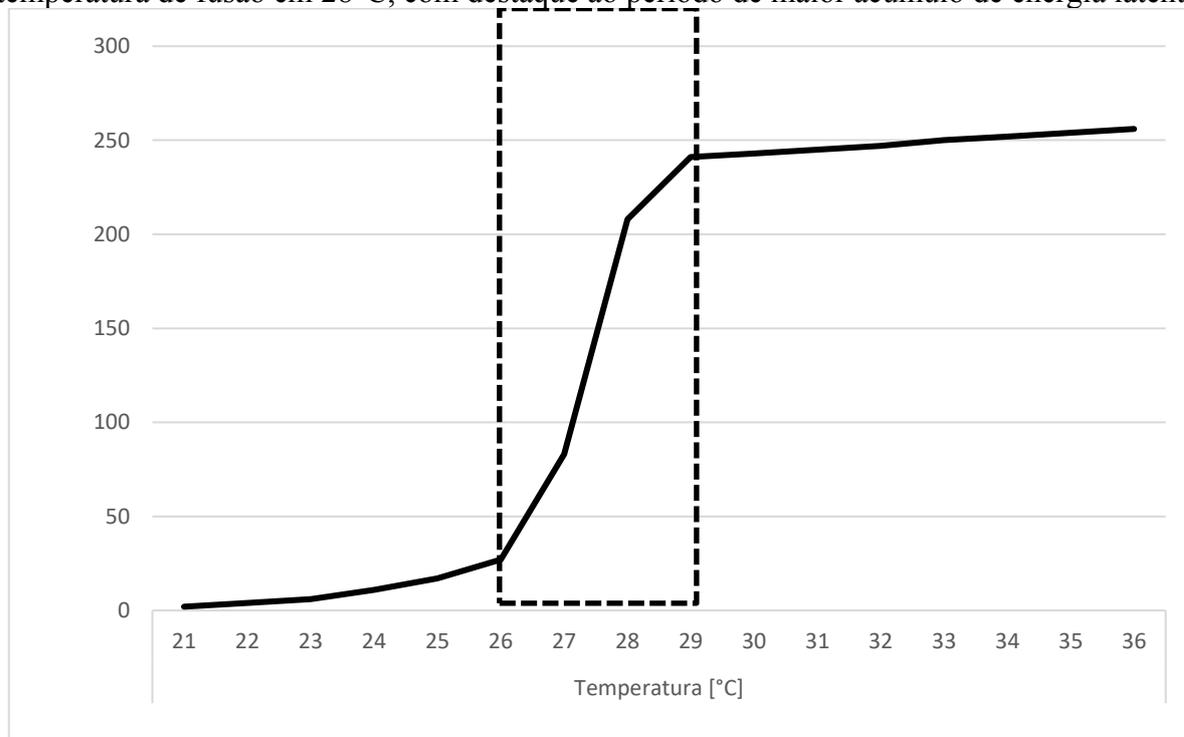
Fonte: Elaborado pelo autor

Este comportamento da envoltória em PCM associado ao *drywall* evidencia a necessidade de o material passar por seu ciclo de maior acúmulo de energia latente, para que gere benefícios térmicos ao ambiente interno.

Uma vez que a opção de PCM utilizada no modelo apresenta maior acúmulo de calor latente entre as temperaturas de 26 à 29°C (Figura 137), e as temperaturas superficiais internas (Figura 138), no primeiro período, se apresentam com enorme frequência acima deste intervalo, pode-se concluir que o material raramente entra no processo de alteração de fase, o que faz com que perca totalmente sua eficácia. Em outras palavras, neste período, o material está praticamente o tempo todo em estado líquido, passando, em raros momentos, por um processo de solidificação.

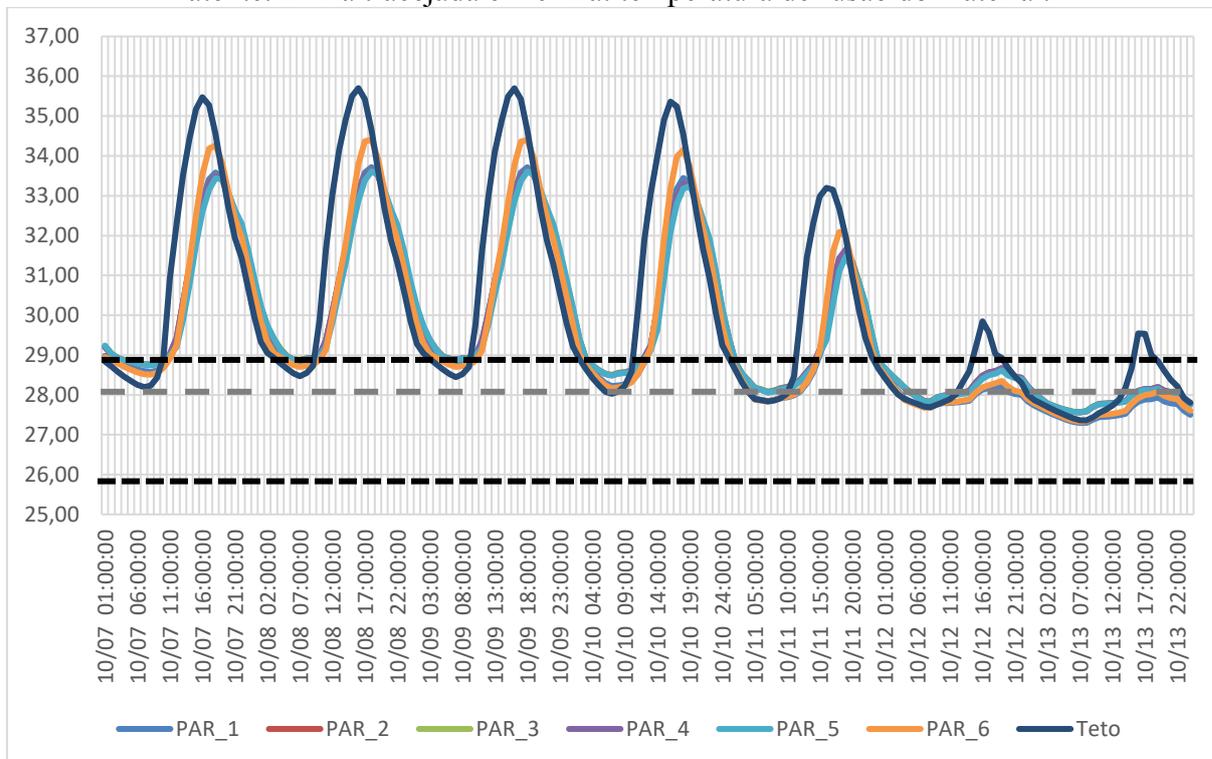
No segundo período, por outro lado, por as temperaturas superficiais se apresentarem com grande frequência no intervalo já citado, o material se apresenta muito mais eficaz no acúmulo de calor latente e, conseqüentemente, na redução da amplitude térmica e da temperatura máxima interna no modelo no qual é adotado.

Figura 137- Curva de entalpia do PCM selecionado para o estudo piloto com temperatura de fusão em 28°C, com destaque ao período de maior acúmulo de energia latente.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 138 - Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em *drywall* somado ao PCM na semana com temperatura máxima para Goiânia/GO. Linha pontilhada em preto: limite superior e inferior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.

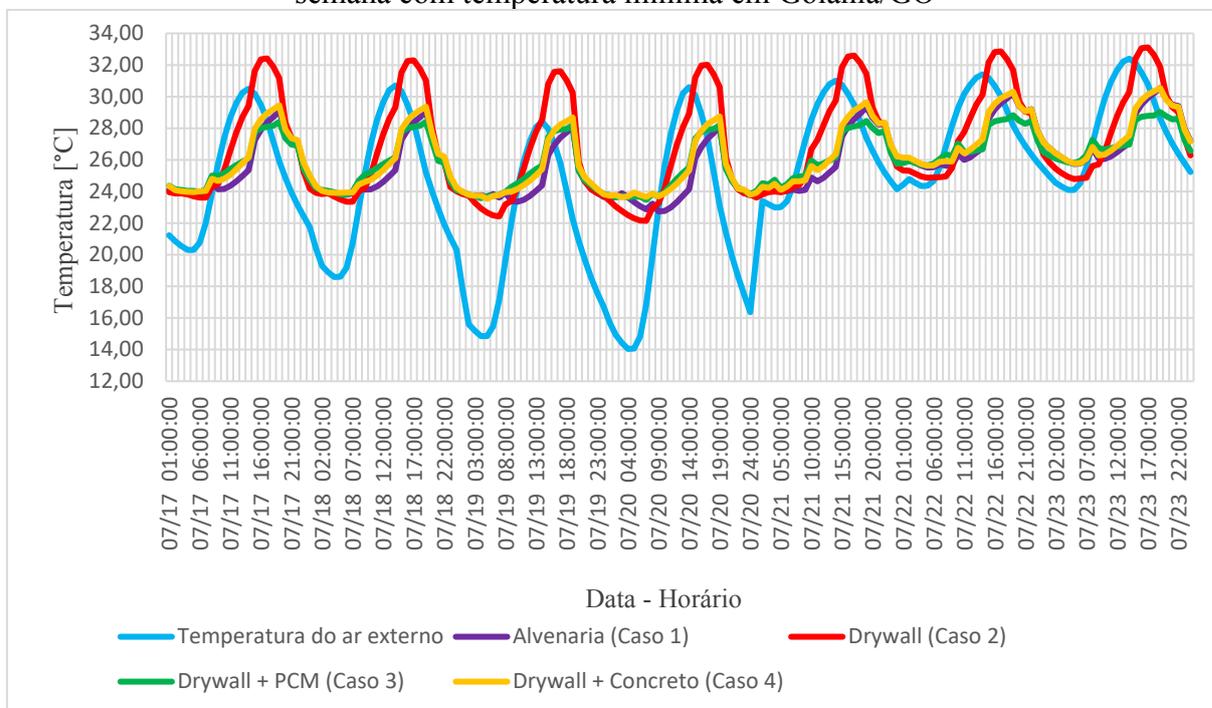


Fonte: Elaborado pelo autor

No período que se estende de 17 à 23 de julho, quando se encontra a temperatura mais baixa registrada no arquivo climático de Goiânia, PCM somado ao *drywall* mostra-se eficaz em reduzir as amplitudes térmicas e temperaturas máximas internas ao longo de todo o intervalo de tempo (Figura 139).

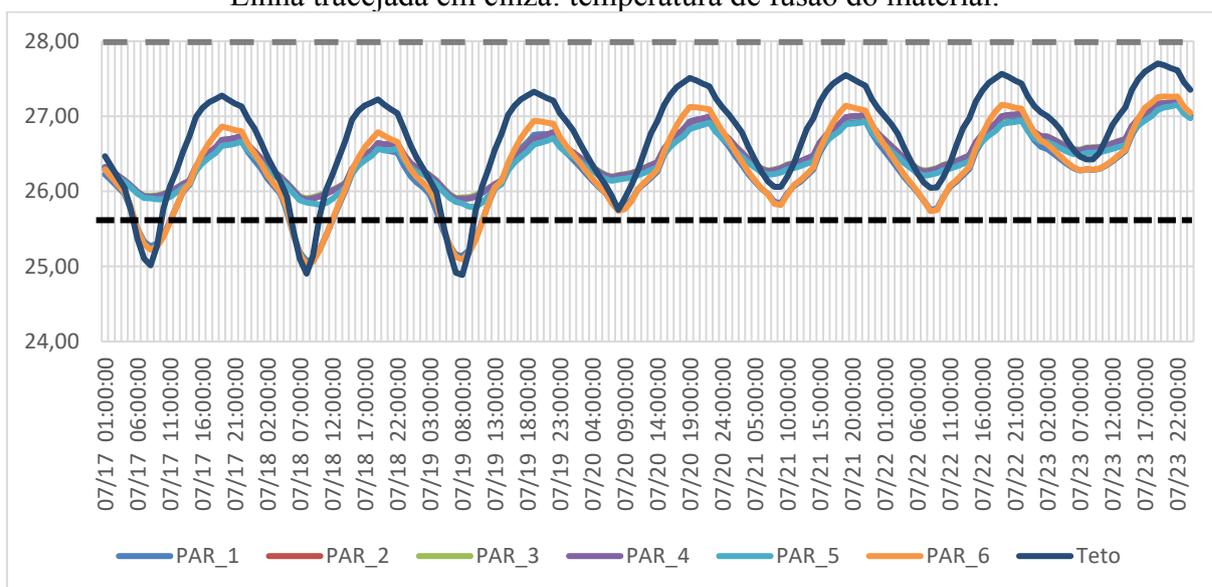
Apesar de, também nesse caso, haver dois períodos bastante distintos, no qual o primeiro apresenta maior variação de temperatura ao longo de um mesmo dia se comparado ao segundo, a eficácia do PCM se mantém igual. Desta forma, demonstra-se assim que a amplitude térmica é importante, desde que aconteça dentro da faixa na qual há maior acúmulo de calor latente no material, e no qual ocorre processo de mudança de fase (Figura 140).

Figura 139-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima em Goiânia/GO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 140- Perfil de temperatura das superfícies internas no dormitório sul do modelo em *drywall* somado ao PCM na semana com temperatura mínima para Goiânia/GO. Linha pontilhada em preto: limite inferior do período de maior acúmulo de energia latente. Linha tracejada em cinza: temperatura de fusão do material.

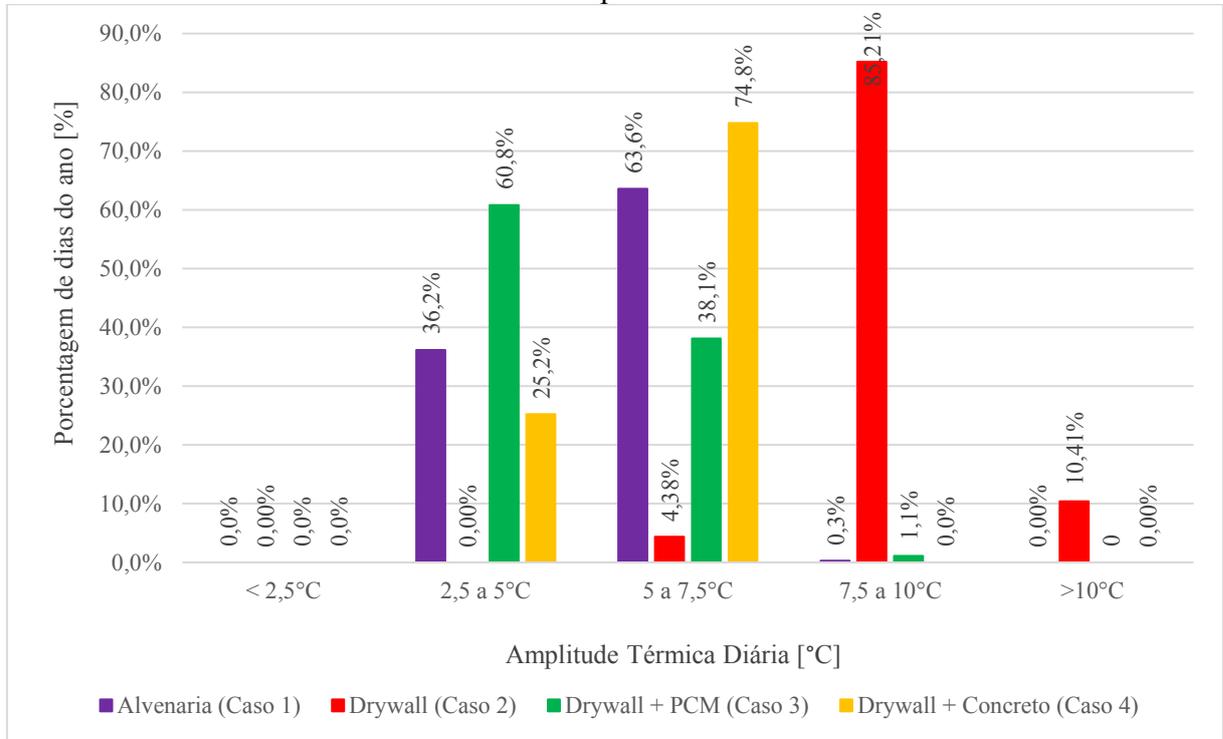


Fonte: Elaborado pelo autor

Quando se analisa a ocorrência das amplitudes térmicas diárias no interior dos modelos ao longo do ano, fica claro o efeito que a adoção do material proporciona à HUPP, uma vez que este caso é aquele que apresenta menor variação, tendo em mais da metade do ano, oscilações inferiores ou iguais a 5°C ao longo de um dia em seu interior (Figura 141).

Desta forma, mesmo que em uma pequena parte das ocasiões o material não passe por seu processo de alteração de fase, o sistema é capaz de proporcionar um grande benefício ao ambiente construído ao longo do ano.

Figura 141- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Goiânia/GO

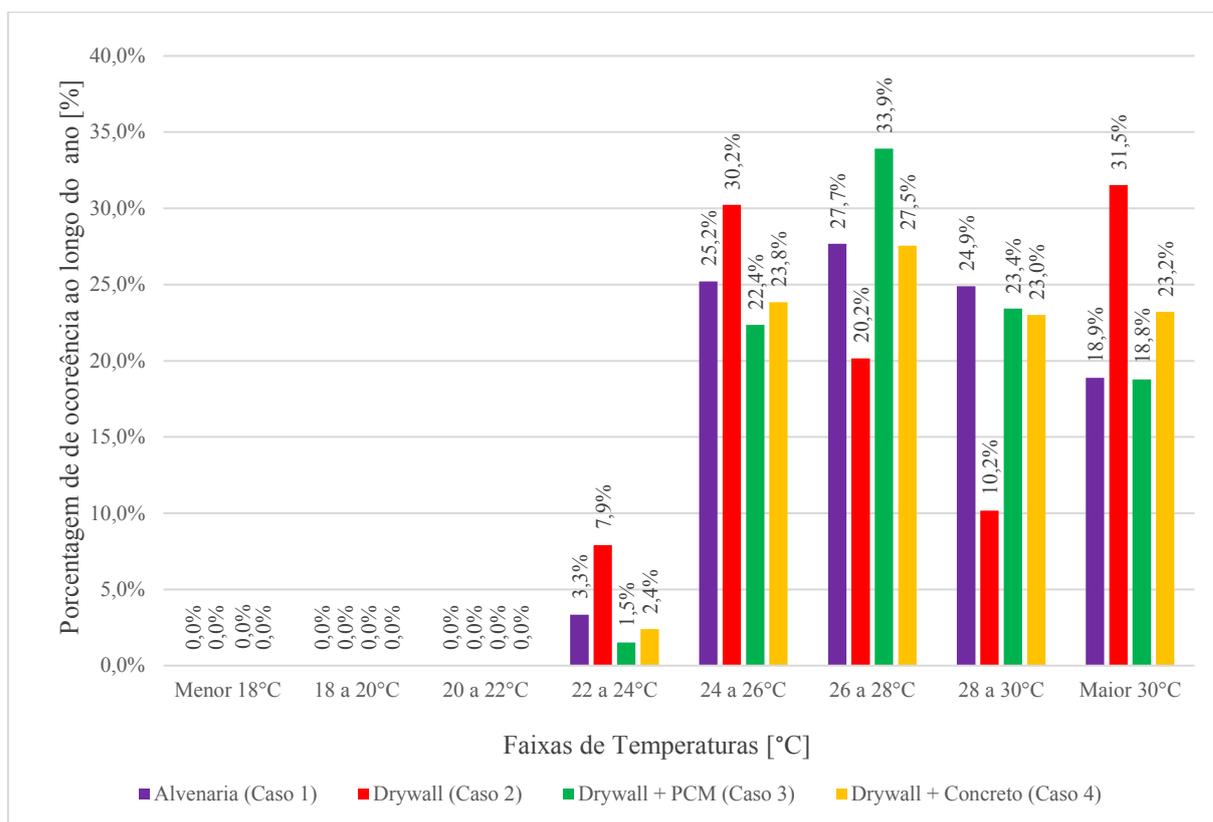


Fonte: Elaborado pelo autor

Tal como ocorrera nas condições climáticas de Brasília, a maior frequência de temperaturas dentro do modelo no qual é adotado o PCM junto ao *drywall* em Goiânia, se dá próximo à temperatura de fusão do material (28°C) assim como de maior acúmulo de calor latente (Figura 142). Sendo assim, torna-se ainda mais clara a estabilização das temperaturas quando o material é exposto às temperaturas corretas.

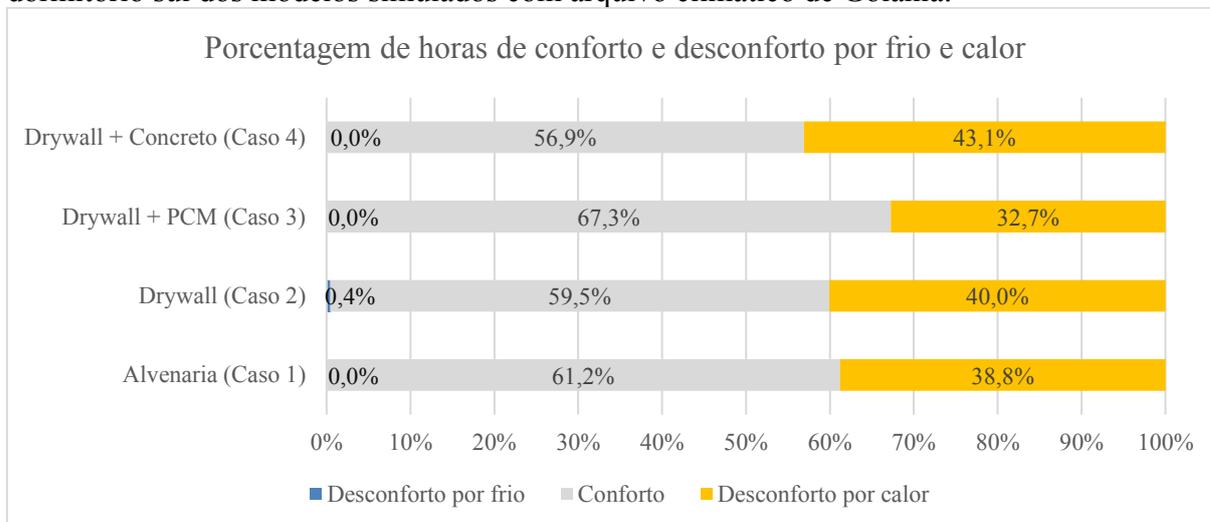
Esta maior estabilidade e menor amplitude térmica diária dentro do modelo, contribuem de forma bastante incisiva para a ocorrência de maior conforto térmico aos usuários (Figura 143).

Figura 142- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Goiânia/GO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 143 – Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul dos modelos simulados com arquivo climático de Goiânia.



Fonte: Elaborado pelo autor

6.3 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM SANTA MARIA

Em Santa Maria, a envoltória em *Drywall* (Caso 2) é a que traz maior amplitude térmica ao ambiente interno do modelo (Figura 146), assim como no período mais crítico de frio (dias 12 e 13 de julho) e de calor (dias 10 e 11 de novembro), quando também são constatadas as maiores variações de temperatura no meio externo (Figura 144 e Figura 145). Isso comprova a desvantagem na utilização de um sistema construtivo sem grande capacidade térmica sob essas condições climáticas em HUPP's naturalmente ventiladas.

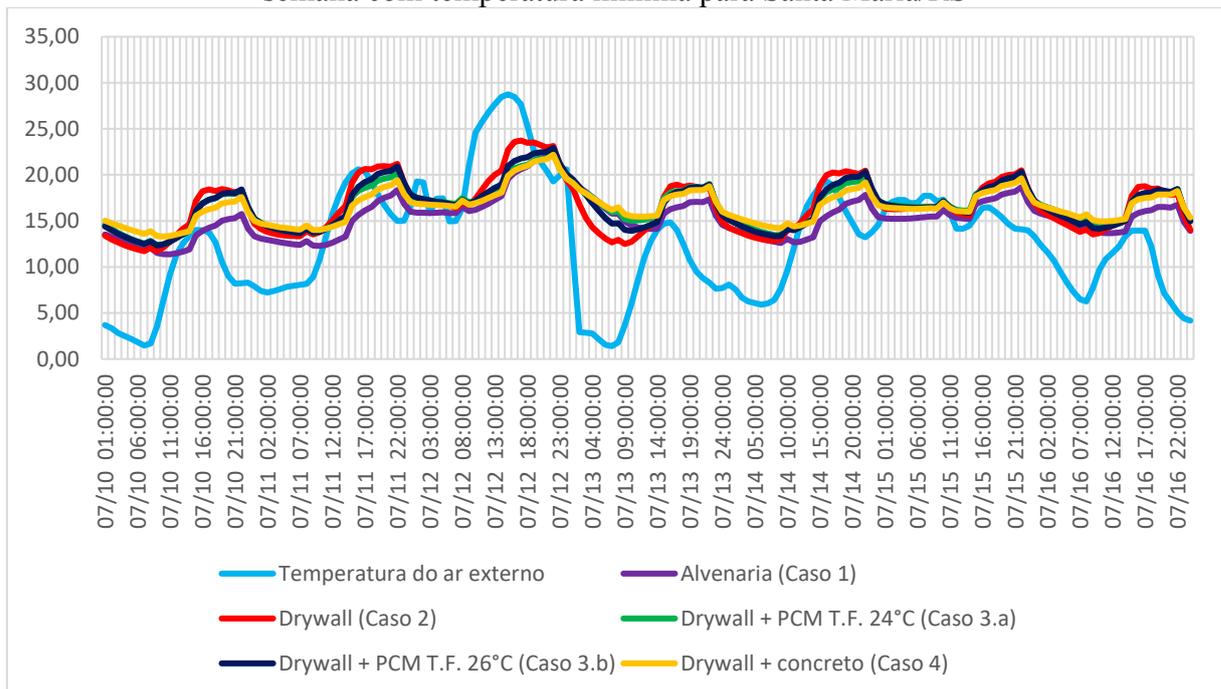
A adoção dos PCM's em ambas temperaturas de fusão (Caso 3.a e 3.b), da placa de concreto somado ao *Drywall* (Caso 4) e da alvenaria (Caso 1), conferem ao modelo uma maior capacidade de armazenamento de calor, e desta forma menor variação de temperatura interna se comparado ao Caso 2, seja ao longo de todo o ano (Figura 146), ou nos dois períodos extremos (Figura 144 e Figura 145), o que ratifica a afirmação anterior.

Ao se analisar os gráficos de perfil de temperaturas, fica clara a diferença de comportamento térmico dos modelos sob os dois tipos de PCM's utilizados. No Caso 3.a o PCM possui temperatura de fusão mais baixa e por isso resulta em menor variação de temperatura no modelo no período mais frio (Figura 144). Cabe ressaltar, no entanto, que ambos os materiais (PCM's com temperatura de fusão 24°C e 26°C), nesse intervalo de tempo, não passam por seu processo completo de troca de fase.

O Caso 3.b, com PCM de temperatura de fusão mais elevada, por sua vez, apresenta-se muito mais eficaz na redução de amplitude térmica no modelo durante a semana com temperatura máxima (Figura 145). Um exemplo claro do comportamento do material é o platô de temperatura, entre 26 e 28°C, que surge no gráfico do dia 11 de novembro. O material aplicado neste caso, ao atingir a sua temperatura de fusão, aumenta consideravelmente sua eficácia, enquanto que o material aplicado no Caso 3.a, passa boa parte deste intervalo de tempo em seu estado líquido, tornando-o menos eficiente, contribuindo no aumento de temperatura interna.

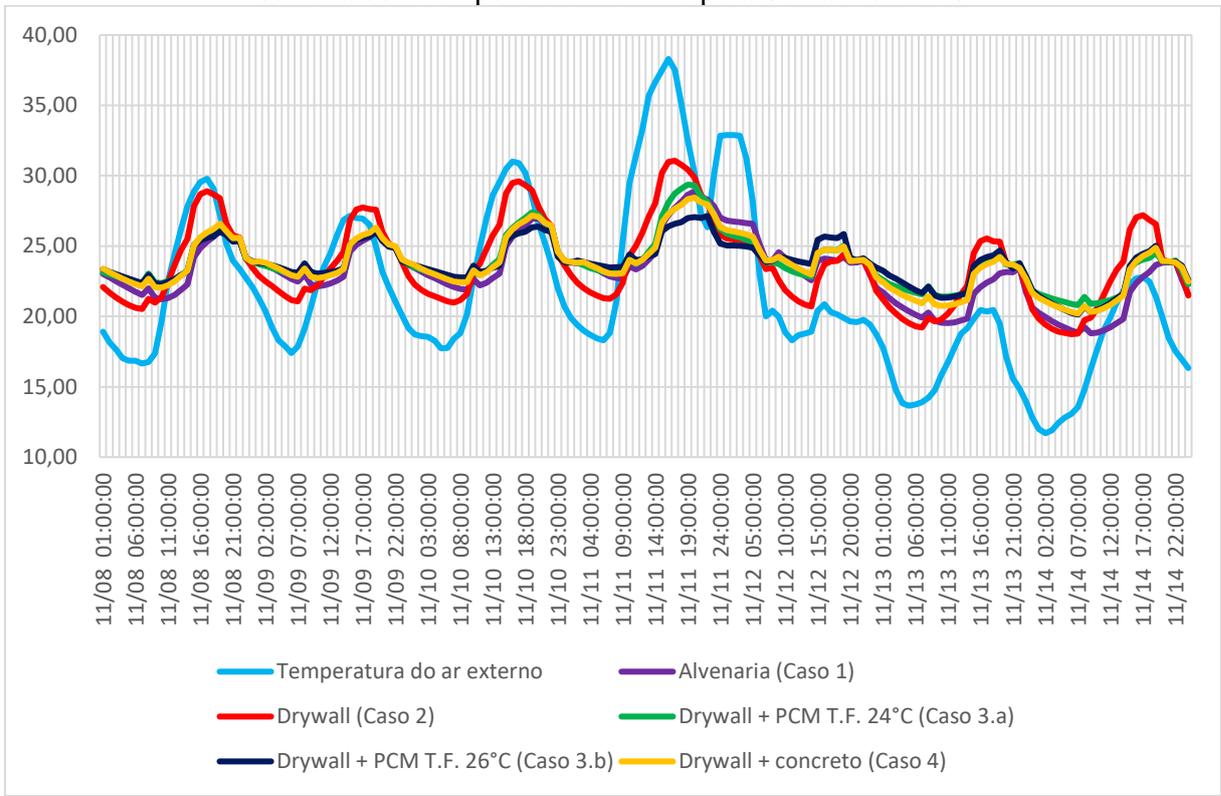
Por fim, ao se comparar o Caso 3.b com o Caso 1, fica claro também o benefício da adoção do material como um sistema de resfriamento passivo. Já o PCM aplicado no Caso 3.a apresenta benefícios mais discretos quando é adotado como uma estratégia para aquecimento, sob as condições climáticas de Santa Maria, se comparada à envoltória em alvenaria (Figura 144 e Figura 145).

Figura 144-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima para Santa Maria/RS



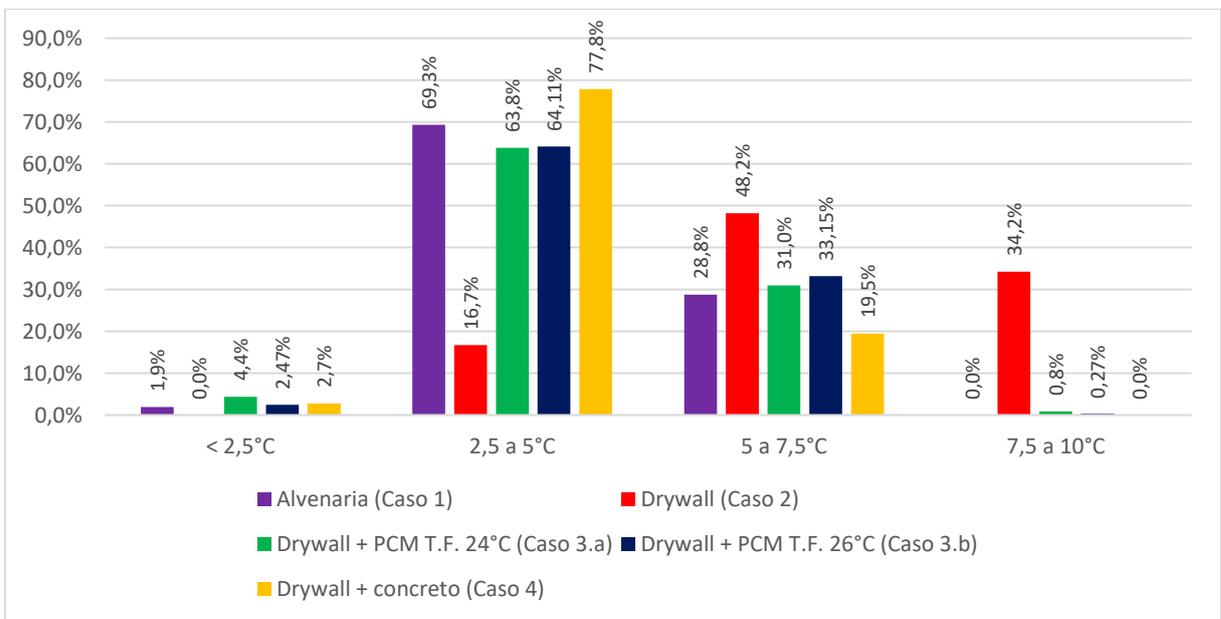
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 145-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima para Santa Maria/RS



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 146 - Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Santa Maria/RS



Fonte: Elaborado pelo autor

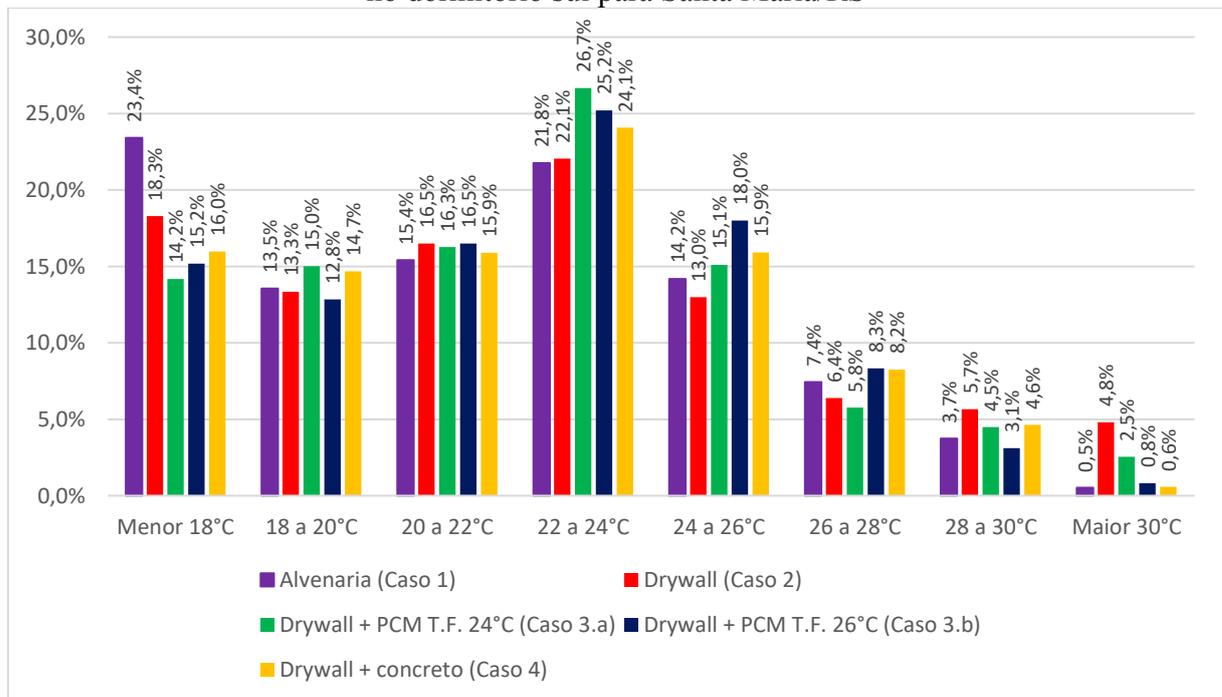
Ao se analisar o gráfico de frequência de ocorrência de temperaturas no ambiente interno (Figura 147), fica claro que sob as condições climáticas de Santa Maria, o modelo em alvenaria (Caso 1) é aquele que apresenta maior porcentagem de horas com temperaturas abaixo de 18°C, e que o modelo em *drywall* (Caso 2) é o que apresenta maior frequência de temperaturas acima de 28°C, e que conseqüentemente, faz com que o primeiro gere maior quantidade de horas de desconforto por frio, e o segundo a maior quantidade de horas de desconforto por calor (Figura 148).

O Caso 3, independente do PCM utilizado, apresenta os maiores índices de conforto térmico dentre as configurações estudadas. Cabe ressaltar que no Caso 3.b, com temperatura de fusão mais elevada, o PCM completa o ciclo de troca de fase no período mais quente do ano com maior frequência, tornando-o mais eficaz.

Ambas envoltórias consideradas com a adoção do PCM apresentam concentração de ocorrência de temperaturas próxima às temperaturas de fusão de cada um dos materiais adotados.

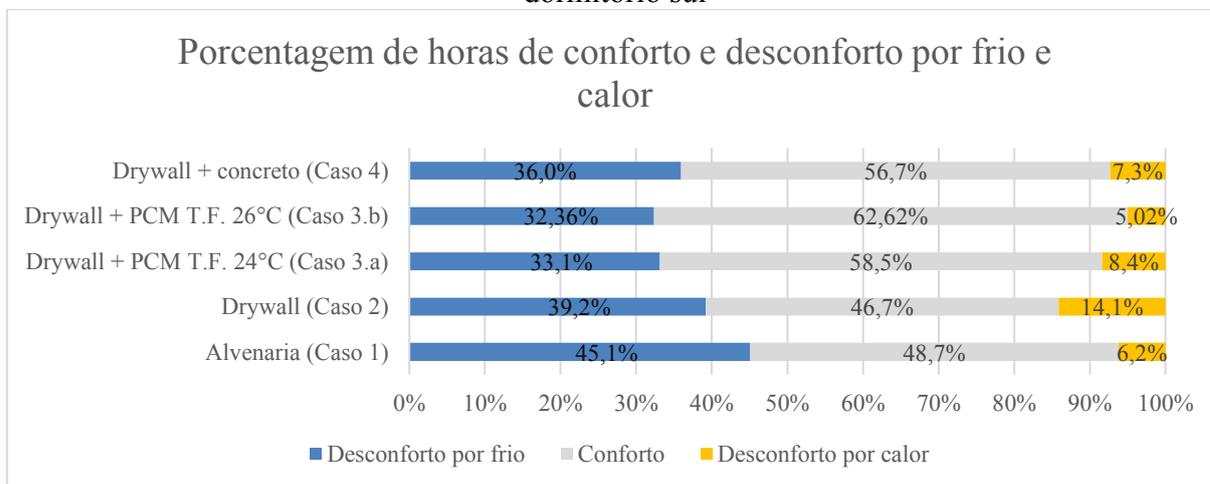
O Caso 4 (*drywall* + placa de concreto) tem como êxito, a redução da amplitude térmica diária dentro da HUPP (Figura 146), no entanto, como é possível verificar na Figura 148, isto não o torna mais confortável do ponto de vista térmico, uma vez que esta menor variação se dá, em certa parcela, fora da zona de conforto térmico adaptativo.

Figura 147- Frequência de temperaturas no ambiente interno de cada um dos casos no dormitório sul para Santa Maria/RS



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 148– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul



6.4 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO EM TERESINA

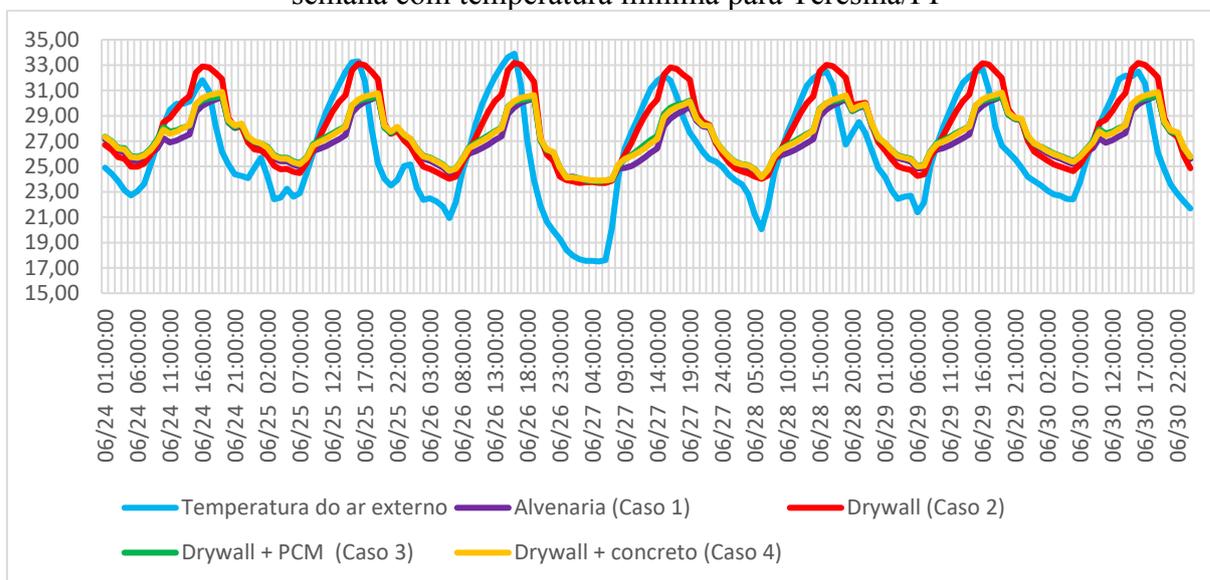
Em Teresina, o Caso 2, em *drywall*, tal como apresentado nas demais condições climáticas abordadas nesse documento, foi a configuração de envoltória que gerou maior amplitude térmica diária nos períodos mais crítico de calor e frio (Figura 149 e Figura 150), assim como ao longo de todo ano no interior do modelo (Figura 151). Os Casos 1, 3 e 4, com maior capacidade de armazenamento de calor, foram os que apresentaram as menores amplitudes.

Ressalta-se, dentre estes últimos casos, o Caso 3 (*drywall* somado ao PCM), que em mais de 40% dos dias apresentou variação de temperatura inferior à 5°C, e não apresentou variação superior à 7,5°C no interior do modelo, contribuindo, assim, para uma ocorrência de temperaturas menos elevadas, sobretudo na semana com temperatura máxima. Nesse período, tal como em outros climas mostrados anteriormente, observa-se um platô de temperatura no ambiente interno próximo à temperatura de fusão.

Os Casos 1 e 4, em alvenaria e *drywall* somado à uma placa de concreto, apresentam resultados semelhantes, possuindo uma capacidade de redução da amplitude térmica diária no interior do modelo maior que o Caso 2, mas não tão eficaz, se comparado ao Caso 3. É na

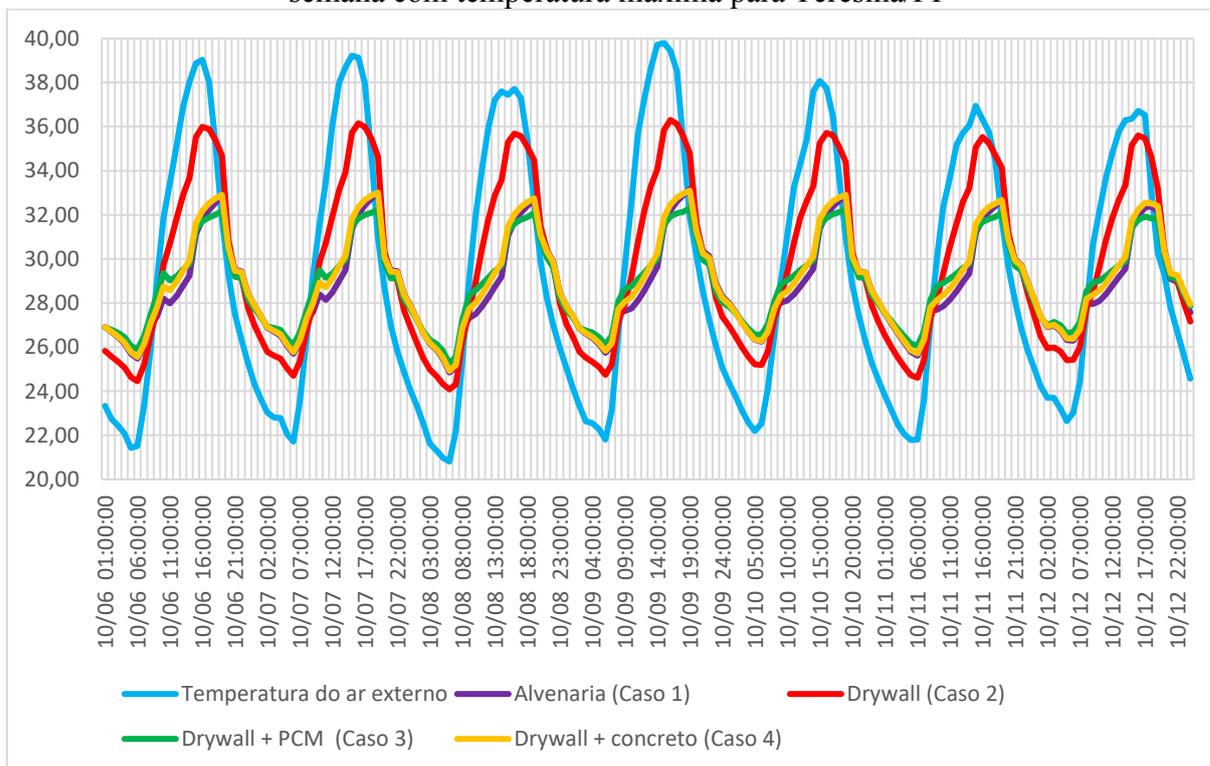
semana de temperatura máxima que fica clara a diferença entre estes e o terceiro caso, uma vez que a temperatura máxima no interior destes se apresentam mais elevadas.

Figura 149-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura mínima para Teresina/PI



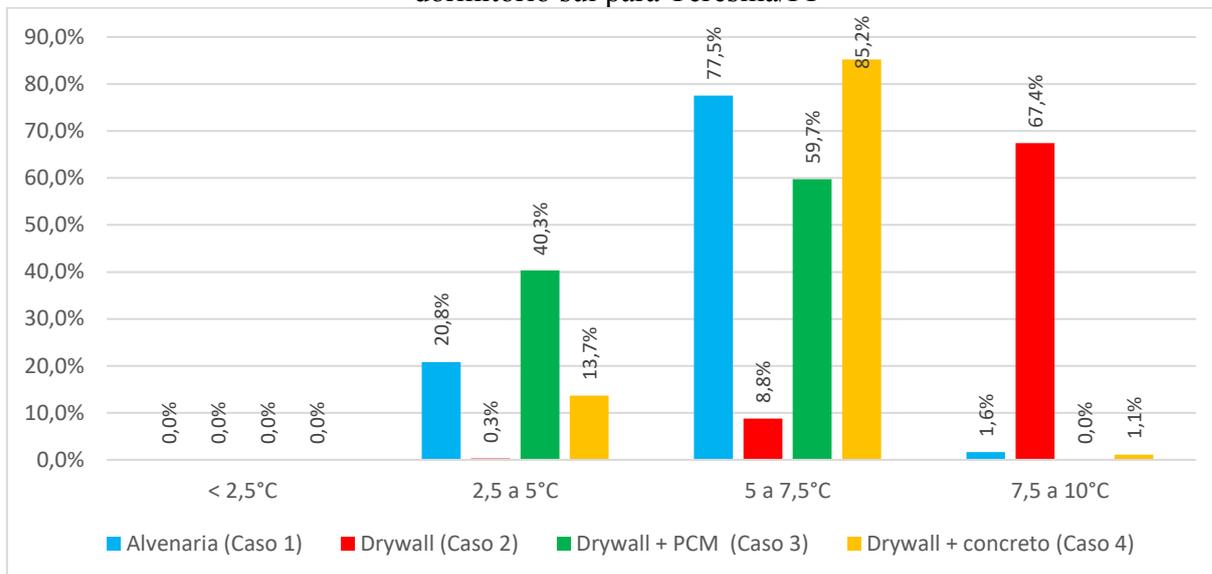
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 150-Perfil de temperatura do ar interno no dormitório sul dos modelos na semana com temperatura máxima para Teresina/PI



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 151- Frequência de amplitude térmica diária em cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI



Fonte: Elaborado pelo autor

Contrariamente ao que ocorreria nas condições climáticas analisadas anteriormente, a redução na amplitude térmica diária interna não trouxe consigo a melhora no conforto térmico dos modelos, como pode-se ver no gráfico de porcentagem de horas de conforto e desconforto (Figura 152).

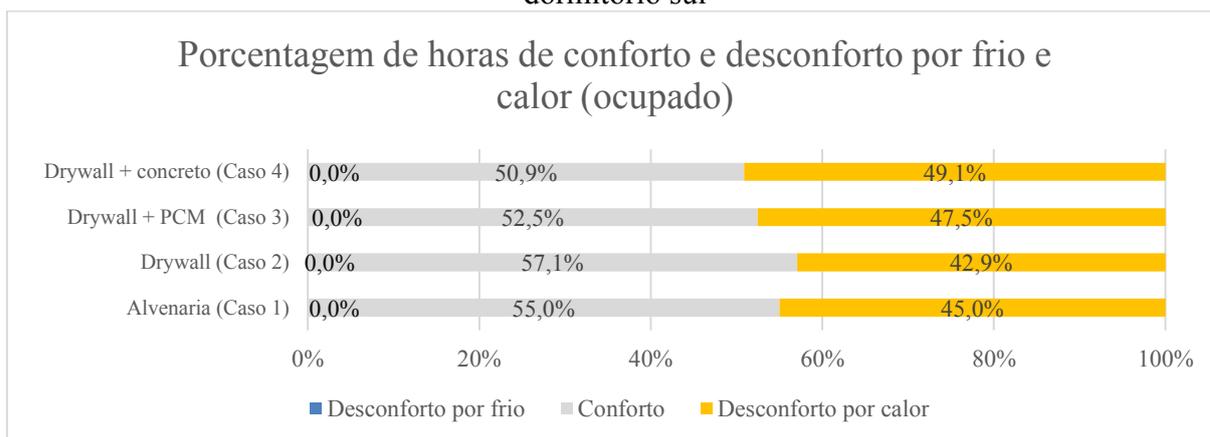
O Caso 2, em *drywall*, é aquele que apresenta as melhores condições de conforto, sobretudo, por reduzir, de forma mais eficaz, o desconforto por calor, enquanto os modelos com maior capacidade de armazenamento de calor obtiveram os piores resultados.

A melhor resposta do *drywall*, sob estas condições climáticas, se dá devido ao fato de a porcentagem de horas de conforto e desconforto ocorrer, como já apresentado no item 3.3.4, nas horas em que a habitação é ocupada, e que se dá, predominantemente, no período noturno. Desta forma, por esta configuração de envoltória apresentar menor capacidade de armazenamento de calor, e a temperatura na cidade de Teresina se apresentar drasticamente mais baixa ao longo deste período do dia, ocorrem temperaturas mais baixas que o modelo sob as demais condições de envoltória.

Os Casos 3 e 4, que ao unirem uma maior aptidão para armazenar calor e uma menor transmitância térmica dada pelo isolamento térmico, as tornam menos confortáveis nos horários na qual a habitação é ocupada. Conforme apresentado por Passos (2016), a adoção de isolantes térmicos em paredes dificulta a dissipação de calor em HUPP's.

O Caso 1, apesar de ter uma maior capacidade de armazenamento de calor que o Caso 2, apresenta resultados não muito piores, pois o mesmo tem uma transmitância térmica mais elevada, contribuindo assim, para que esse calor armazenado se perca de forma mais rápida, se comparado aos Casos 3 e 4.

Figura 152– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul

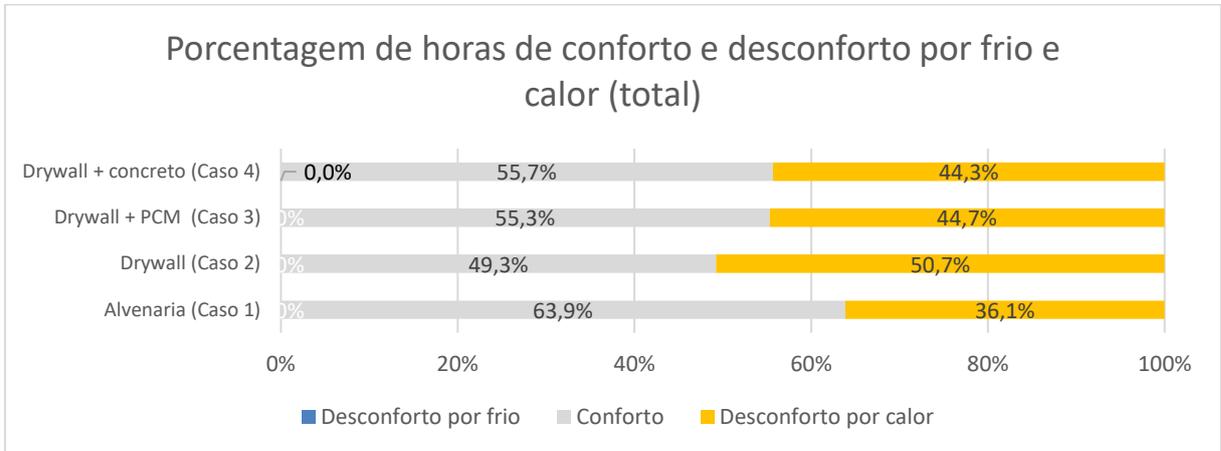


No caso de Teresina a menor amplitude térmica diária se torna um inimigo na hora de promover maior conforto térmico ao usuário na HUPP no período em que é ocupado.

Pode-se ver, quando se analisa o mesmo gráfico, só que considerando o total de horas do ano (Figura 153), que o modelo em *drywall* se torna aquele que apresenta os piores resultados, por o mesmo acompanhar de forma mais próxima as temperaturas do ar externo.

Ressalta-se nesse mesmo gráfico, que o PCM somado ao *drywall* traria grandes benefícios térmicos à habitação quando considerando o total de horas ao longo do ano, tendo resultados similares ao Caso 4, mas inferiores à habitação em alvenaria.

Figura 153– Porcentagem de horas de conforto e desconforto por frio e calor no dormitório sul

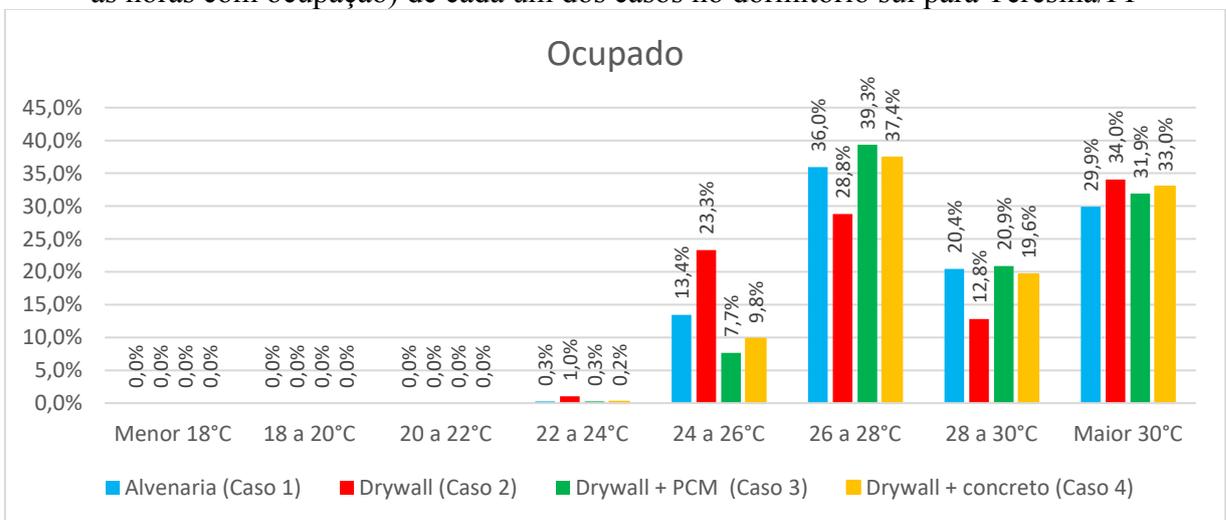


Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico de frequência de temperaturas no ambiente interno ajuda a entender o que ocorre quando consideramos o ambiente ocupado ou não. O Caso 2, apresenta, quando ocupado (Figura 154), uma muito mais elevada frequência de temperaturas abaixo de 30°C, se comparado com o mesmo caso considerando o total de horas do ano (Figura 155).

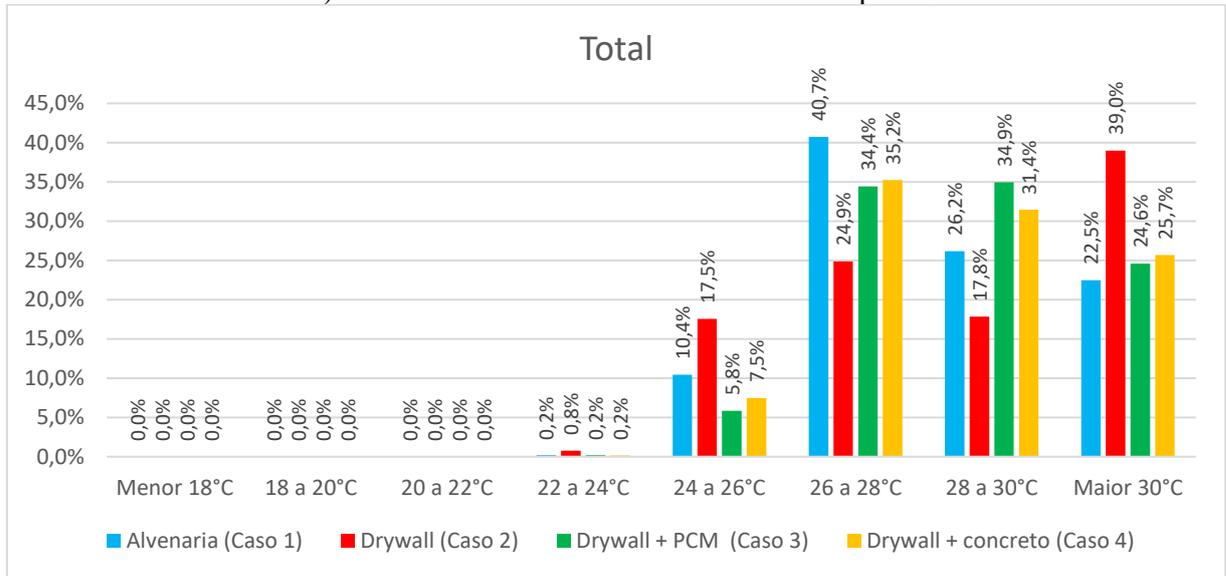
Já os Caso 3 e 4, quando considerados ocupados (Figura 154), a frequência de temperaturas acima dos 30°C é mais acentuada, do que os mesmos casos quando considerado o total de horas do ano dentro da HUPP (Figura 155).

Figura 154 - Frequência de temperaturas no ambiente interno (considerando apenas as horas com ocupação) de cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 155- Frequência de temperaturas no ambiente interno (considerando todas as horas do ano) de cada um dos casos no dormitório sul para Teresina/PI



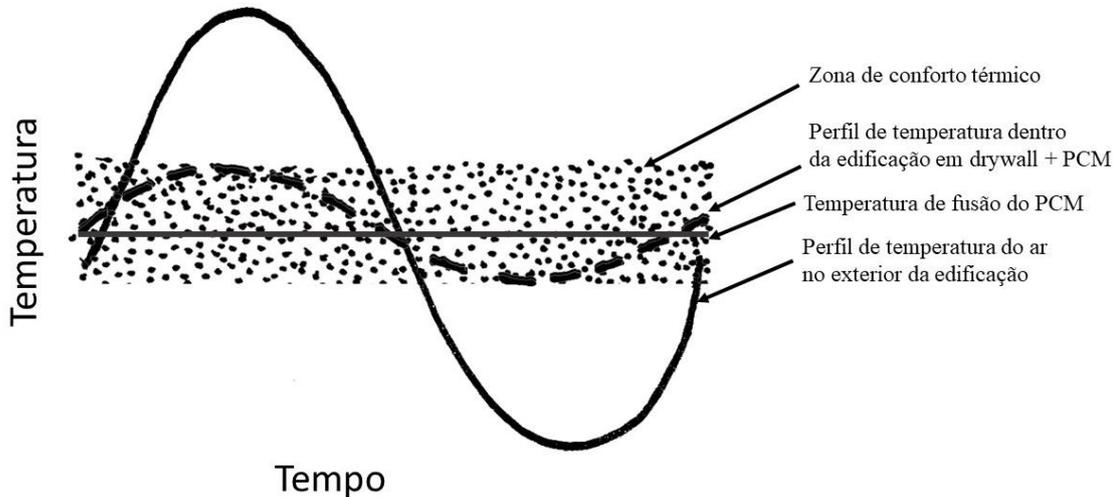
Fonte: Elaborado pelo autor

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO ESTUDO DE CASO

A adoção do PCM associado ao sistema construtivo em drywall revelou-se benéfica para as condições térmicas internas em modelos construídos em Brasília e Goiânia. Essa abordagem resultou na redução das horas de desconforto térmico, amplitude térmica e frequência de temperaturas extremas, superando sistemas construtivos com maior inércia térmica.

Nos estudos de caso realizados nessas condições climáticas, tornou-se evidente que a eficácia do PCM está intimamente ligada à frequência do processo de mudança de fase. Em locais cujas condições climáticas apresentem amplitude térmica diária suficiente para gerar condições de conforto e desconforto de forma equilibrada ao longo de um mesmo dia, e também de provocar, com maior frequência, o processo de mudança de fase do material tornam a eficácia do PCM em gerar conforto térmico ainda maior (Figura 159).

Figura 156- Ilustração do comportamento da temperatura do ar externo (linha preta contínua), do ar interno na edificação com o PCM associado ao *drywall* (linha preta tracejada), relacionando com a zona de conforto térmico (área pontilhada) e a temperatura de fusão do PCM adotado (linha cinza contínua).



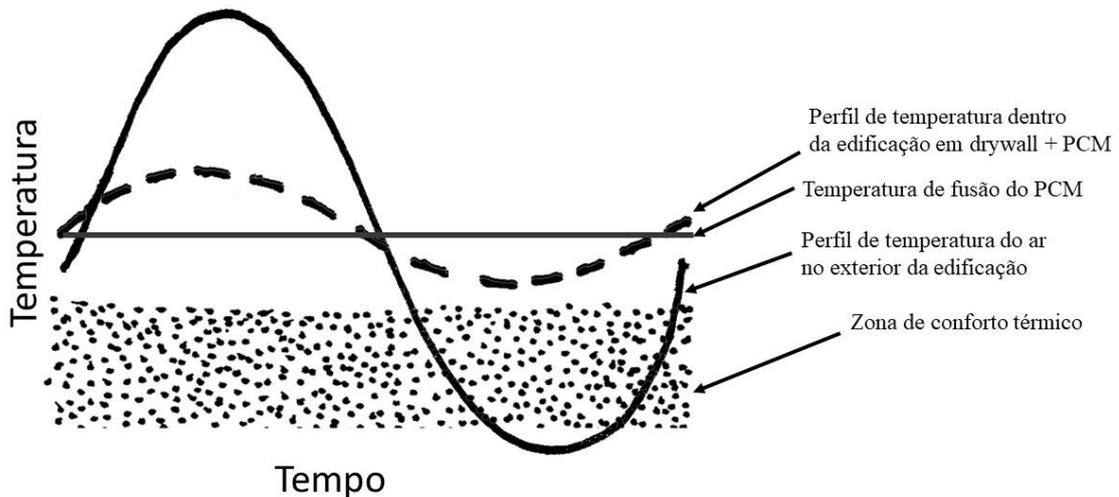
Fonte: Elaborado pelo autor

Resultados de simulações em Teresina e Santa Maria destacaram algumas limitações na utilização do PCM para promover conforto térmico em HUPP's com sistema leve de construção. Desta forma, em condições climáticas na qual a temperatura do ar esteja quase sempre acima da zona de conforto térmico o PCM associado ao *Drywall* tende a gerar maior desconforto ao usuário, por estabilizar a temperatura dentro ambiente interno, total ou parcialmente fora da zona de conforto térmico (Figura 157).

Cabe ressaltar que, sob essas condições climáticas, a adoção de um PCM que tenha sua temperatura de fusão dentro da zona de conforto, proporcionaria ao material raras oportunidade de passar por seu ciclo completo de troca de fase, o que diminui a sua eficácia, tornando o material inútil para se atingir maior conforto térmico dentro da edificação.

Neste cenário, a redução de amplitude térmica diária no interior do modelo proporcionada pelo PCM não necessariamente se torna benéfica às condições térmicas da habitação, pois em condições climáticas nas quais há uma elevada variação de temperatura ao longo do dia, e onde a ocupação do ambiente se dá somente no período noturno, a temperatura do ar interno pode se apresentar acima da margem superior da zona de conforto pois o material reduz a perda de calor do meio interno para o meio externo.

Figura 157- Ilustração do comportamento da temperatura do ar externo (linha preta contínua), do ar interno na edificação com o PCM associado ao *drywall* (linha preta tracejada), relacionando com a zona de conforto térmico (área pontilhada) e a temperatura de fusão do PCM adotado (linha cinza contínua).

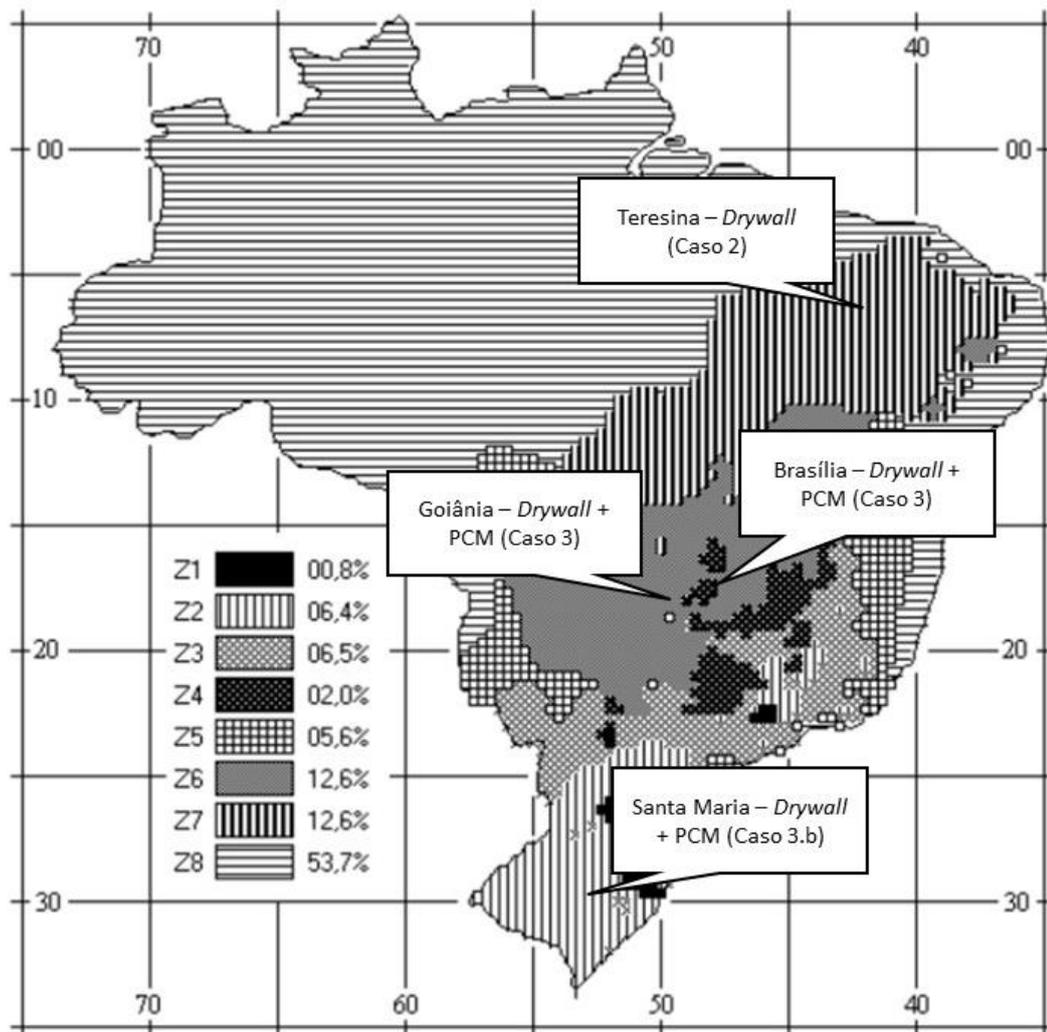


Fonte: Elaborado pelo autor

Embora a indicação seja adotar PCM's com temperatura de fusão 1 a 3 °C acima da média anual do ambiente, a eficácia do material varia conforme as condições climáticas. Em climas com amplitude térmica anual significativa, a aplicação do PCM durante o período mais quente demonstrou ser mais eficiente. No entanto, em comparação com sistemas em alvenaria, o PCM associado ao *drywall* mostrou-se menos eficaz, mesmo considerando o dia como um todo.

Em síntese, pode-se afirmar que a utilização do PCM, quando associado ao sistema leve de construção, pode trazer consigo uma melhora no desempenho térmico de HUPP's em algumas regiões do Brasil, podendo até, sob algumas condições climáticas, apresentar resultados mais benéficos que sistemas construtivos já amplamente utilizados no país e cuja performance é ratificada por normativas (Figura 158 e Figura 159).

Figura 158- Mapa do Brasil e suas respectivas zonas bioclimáticas, tendo em destaque a localidade, e qual o modelo de envoltória proporcionou maior conforto térmico aos usuários nos períodos nos quais a edificação estudada estava ocupada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 159- Tabela relacionando as zonas bioclimáticas estudadas e a porcentagem de horas de conforto térmico atingidas pelo modelo sob cada uma das configurações de envoltória.

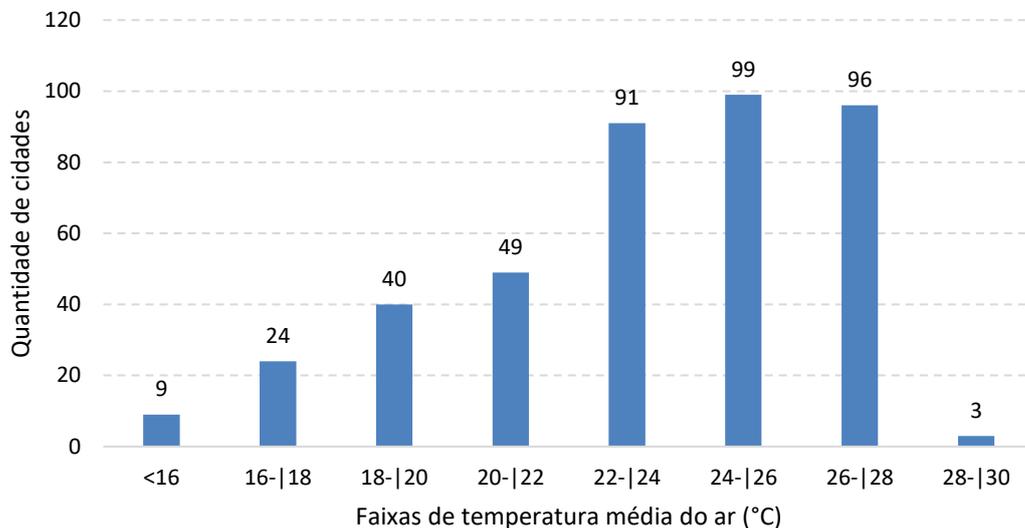
Conforto Térmico					
	Alvenaria (Caso 1)	<i>Drywall</i> (Caso 2)	Drywall + PCM (Caso 3 (.a))	Drywall + PCM (Caso 3.b)	Drywall + Concreto (Caso 4)
ZB2	48,7%	46,7%	58,5%	62,6%	56,7%
ZB4	79,3%	64,4%	97,8%	-	94,4%
ZB6	61,2%	59,5%	67,3%	-	56,9%
ZB7	55,0%	57,1%	52,5%	-	50,9%

Fonte: Elaborado pelo autor

Cabe, no entanto, ressaltar que a utilização do material junto a sistemas construtivos com essa característica não garante por si só os benefícios já citados. A ventilação noturna, aliada a baixas cargas térmicas, é fundamental para otimizar o desempenho do PCM, dissipando o calor latente acumulado e evitando o superaquecimento durante a ocupação.

Na análise das cidades consideradas nesta etapa do estudo, observa-se uma tendência marcante nas condições climáticas do Brasil. Notavelmente, cerca de um quarto dessas localidades apresenta uma temperatura média superior a 26°C. Além disso, aproximadamente metade das cidades analisadas registram temperaturas médias acima de 24°C. É relevante ressaltar que mais de 80% dessas áreas apresentam temperatura anual média superior a 20°C. Esses dados fornecem subsídios valiosos para a compreensão do panorama climático do país, contribuindo para a contextualização e interpretação dos padrões térmicos predominantes em diferentes regiões (Figura 161).

Figura 161- Relação dos arquivos climáticos analisados pela faixa de temperatura média do ar local.



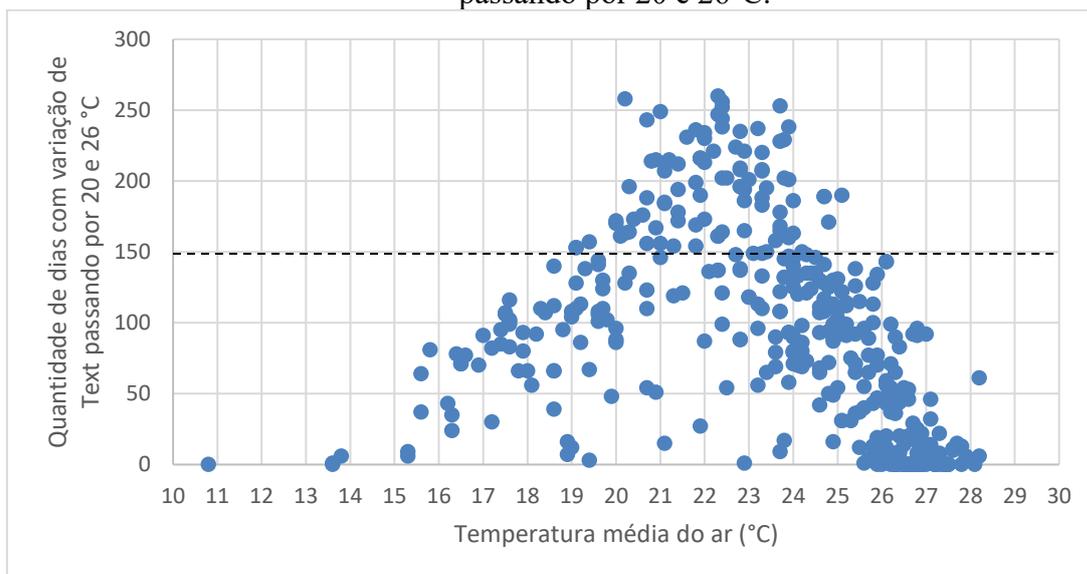
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao examinarmos os registros climáticos e a frequência de dias nos quais se verifica uma variação de temperatura situada entre 20 e 26 °C, é possível identificar uma correlação com as médias anuais de temperatura nos respectivos locais (Figura 162). Desta forma, observa-se que a incidência mais expressiva desses dias ocorre em regiões onde as temperaturas médias anuais se situam nesse mesmo intervalo.

Esse padrão revela uma associação entre as variações diárias específicas e o clima médio anual das localidades em questão. A predominância de dias com temperaturas entre 20 e 26 °C parece estar diretamente relacionada à tendência climática dessas áreas, destacando uma coerência notável entre as oscilações diárias e os valores médios ao longo do ano.

Dessa forma, a análise desses dados climáticos não apenas evidencia a frequência da variação térmica em questão, mas também realça a relevância de considerar as temperaturas médias anuais como um indicador-chave para compreender a distribuição e a prevalência desses eventos climáticos específicos.

Figura 162 – Quantidade de dias com variação de temperatura de externa (Text) passando por 20 e 26°C.



Fonte: Elaborado pelo autor

7.2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS NO CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO

Na análise dos resultados, diferentemente do que ocorreu nas etapas anteriores, estabeleceu-se uma faixa de temperatura ótima para o ambiente interno, com a finalidade de se encontrar uma correlação entre os resultados obtidos e as condições climáticas, de forma mais simples possível. Essa delimitação considerou a temperatura de ativação do sistema de aquecimento e resfriamento, conforme prescrito pela norma EN 16798-1 (CEN, 2015).

A norma incorpora variáveis, tais como a utilização da edificação, a atividade metabólica e a taxa de conforto, seguindo o modelo PPD/PMV. Dessa forma, adotou-se o valor base do PMV dentro da faixa de -0.5 a +0.5, com uma margem de 10% para desconforto no PPD.

Considerando que a edificação em questão possui características residenciais, com ocupantes envolvidos em atividades predominantemente sedentárias, definiu-se a faixa de temperatura ideal entre 20 a 26°C. Cabe ressaltar que essa metodologia também foi empregada por van Dijk (2021) em seu relatório acerca da aplicação da EN ISO 52016-1 (ISO, 2017).

Figura 163- Valores de temperatura operacional recomendados no ambiente interno no inverno e no verão para edifícios com sistemas de condicionamento térmico artificial com destaque a categoria ao qual a HUPP se qualifica.

Tipo de edificação	Categoria	Temperatura Operativa °C	
		Mínimo para aquecimento (inverno), ~1,0 clo	Máximo para resfriamento (verão), ~ 0,5clo
Edificações residenciais, ambientes de estar (salas, dormitórios, cozinhas, etc.) Atividade sedentária ~ 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0

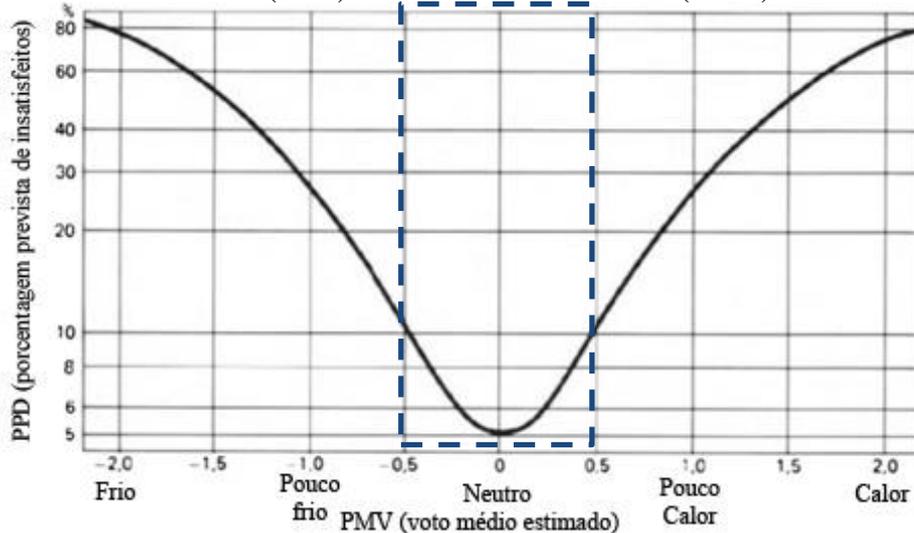
Fonte: CEN, 2015.

Figura 164 - Categorias recomendadas para projeto de edifícios aquecidos e resfriados artificialmente com destaque a categoria ao qual a HUPP se qualifica.

Categoria	Estado térmico do corpo como um todo	
	PPD %	Voto médio estimado
I	< 6	$-0.2 < PMV < + 0.2$
II	< 10	$-0.5 < PMV < + 0.5$
III	< 15	$-0.7 < PMV < + 0.7$
III	< 25	$-1.0 < PMV < + 1.0$

Fonte: CEN, 2015.

Figura 165 – Correlação entre a porcentagem prevista de insatisfeitos com o ambiente térmico (PPD) e o voto médio estimado (PMV).



Fonte: CEN, 2015.

7.3 RESULTADOS PARA O CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO

7.3.1 Características térmicas: explorando a temperatura de mudança de fase dos PCM's

Na análise dos diversos Materiais de Mudança de Fase (PCMs) examinados nesta pesquisa, destaca-se aquele cuja temperatura de fusão ocorre em torno de 25°C, evidenciando resultados mais promissores ao proporcionar uma maior quantidade de horas na faixa de 20 a 26°C sob as diferentes temperaturas médias do ar nas diversas condições climáticas analisadas (Figura 166 e Figura 167).

Os PCMs com temperaturas de fusão mais elevadas (28 e 31°C) revelam uma disparidade significativa em relação ao sistema construtivo de referência, apresentando desempenho inferior em praticamente todas as condições climáticas simuladas, ao proporcionar uma maior quantidade de horas acima de 26°C e uma menor quantidade de horas dentro da faixa.

Os demais PCMs, com temperaturas de fusão em 24°C e 26°C, apresentam maior semelhança com o material de referência.

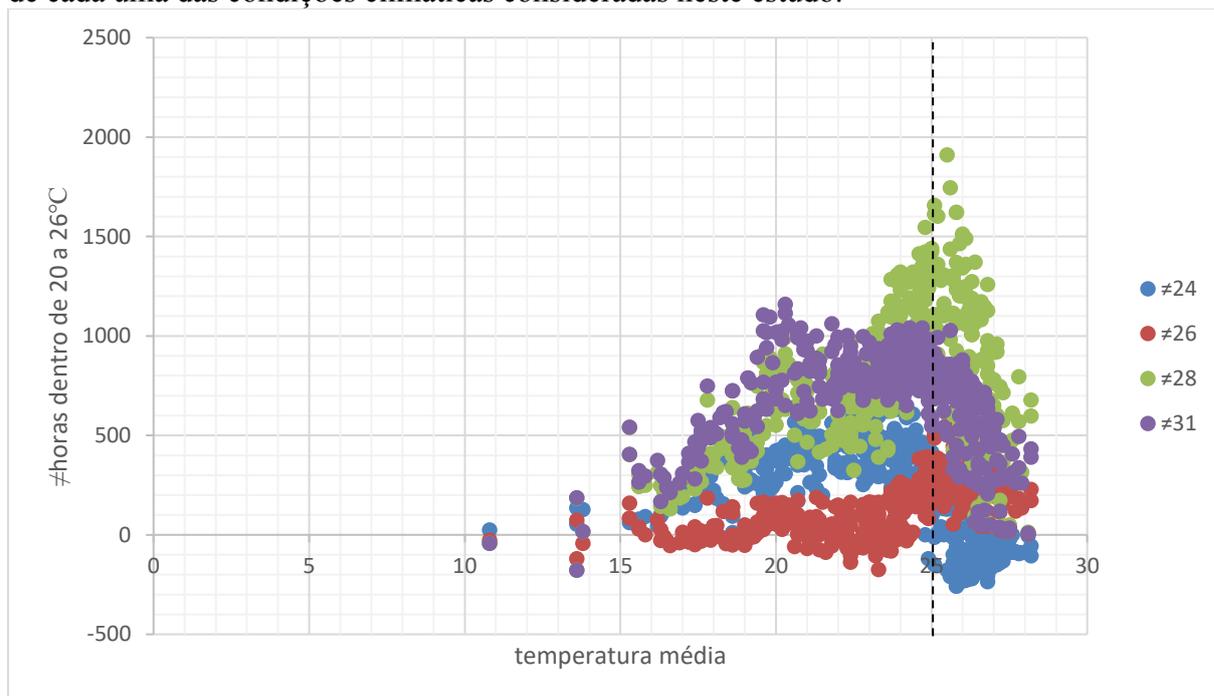
O PCM com temperatura de fusão em 24°C revela uma similaridade significativa nas horas desejadas quando a temperatura média do ar externo se aproxima de 25°C. Para condições climáticas com temperaturas médias mais baixas, mais comuns neste estudo, a incorporação do PCM com temperatura de fusão em 25°C proporciona benefícios mais expressivos à envoltória, com menor quantidade de horas com temperatura superior a 26°C, e maior quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C.

O PCM com temperatura de fusão em 26°C, apesar de apresentar, sob determinadas situações, uma menor quantidade de horas acima da faixa desejada e uma maior quantidade de horas dentro desta, no geral, demonstra um desempenho térmico inferior ao PCM com temperatura de fusão em 25°C.

Por fim, ao se analisar a quantidade de horas abaixo dos 20°C, fica claro o benefício do PCM com temperatura de fusão em 25°C, pois o mesmo, com poucas exceções, apresenta um menor índice quando confrontado com os demais. Cabe destacar que o PCM com temperatura de fusão em 24°C é aquele que apresenta resultados mais próximos a este, principalmente em temperaturas médias próximas aos 20°C (Figura 168).

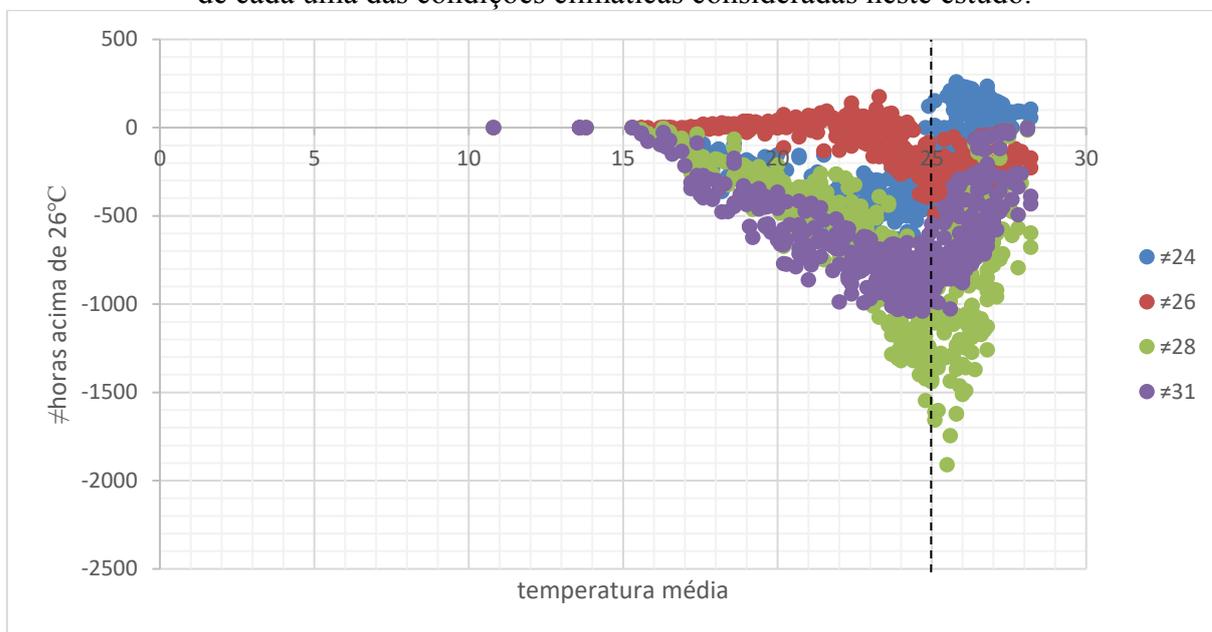
Desta forma, foi escolhido o PCM de 25°C para a análise comparativa da configuração de envoltória no qual o material é adotado, frente as demais.

Figura 166– Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



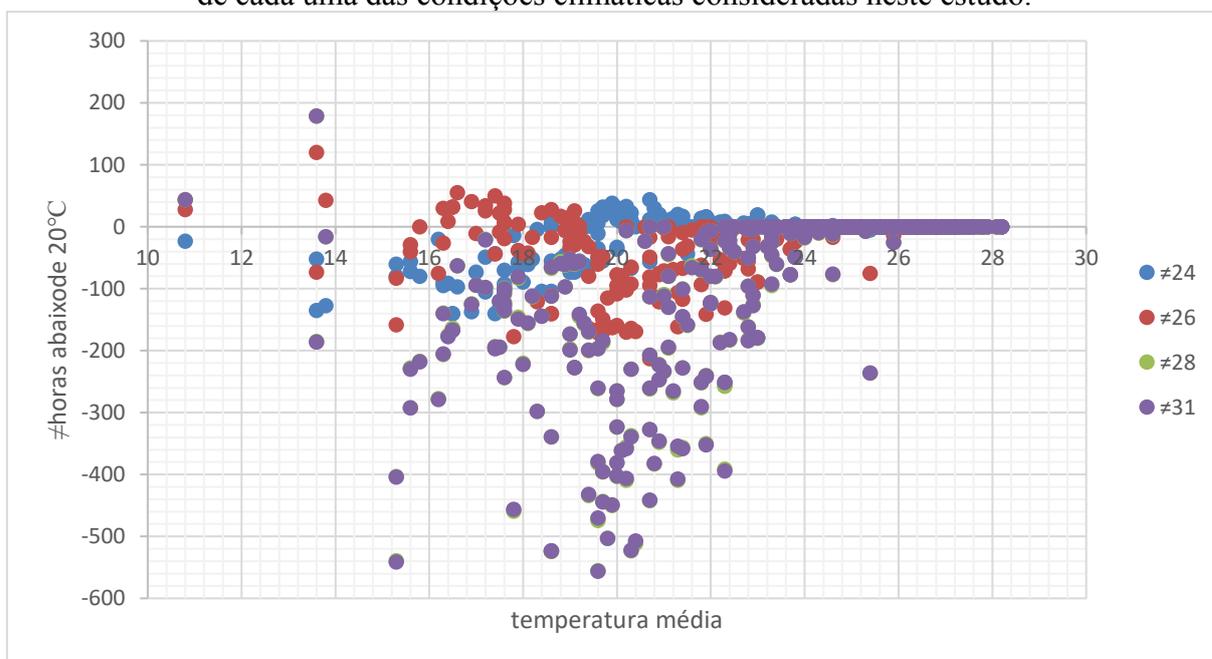
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 167– Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 168– Diferença da quantidade de horas abaixo de 20°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C para a mesma configuração com os PCM's com temperatura de fusão de 24, 26, 28 e 31°C, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.

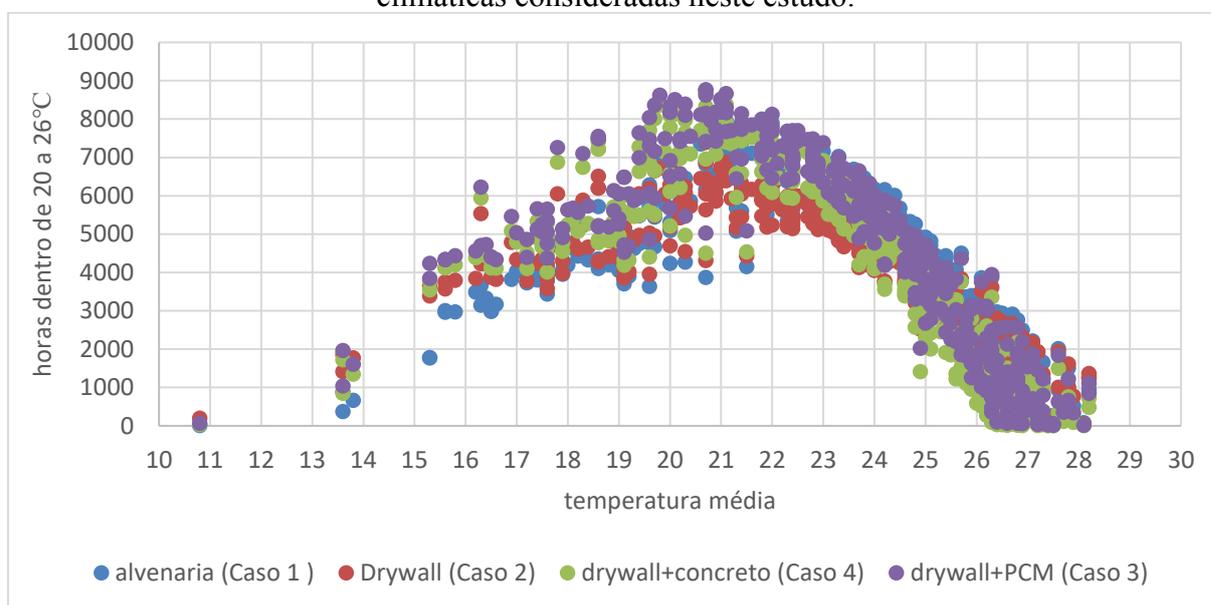


Fonte: Elaborado pelo autor

7.3.2 Integração do drywall com PCM: explorando o potencial para aplicações termorreguladoras

Inicialmente, ao se comparar a quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C ocorridas no interior do modelo com a temperatura média do ar externo local, é possível notar que o *drywall* com PCM (Caso 3) é capaz de trazer melhores resultados (mais horas dentro da faixa) do que todas as demais configurações de envoltória em uma parcela significativa das condições climáticas (Figura 169). Entre os 411 arquivos climáticos simulados, o *drywall* com PCM trouxe melhor desempenho térmico frente aos demais sistemas construtivos em 168 cidades. A alvenaria foi melhor em 215 localidades e o *drywall* sem PCM foi o melhor sistema em apenas 28 das 411 cidades avaliadas.

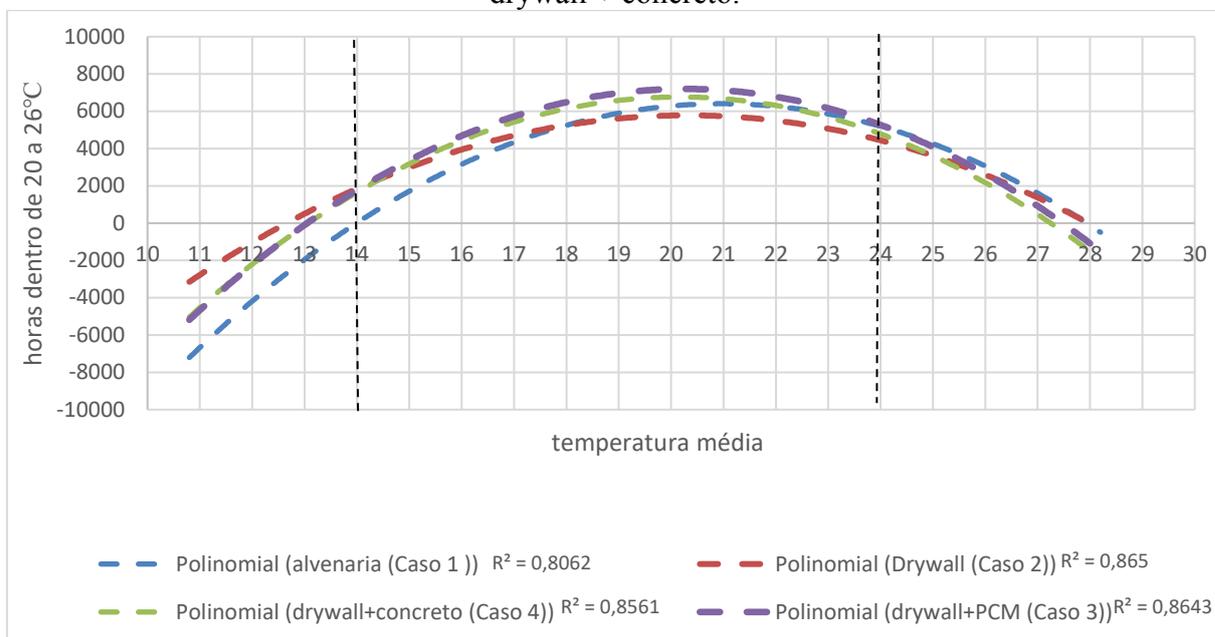
Figura 169 - Quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C para as envoltórias em alvenaria (Caso 1), drywall (Caso 2) drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e drywall + concreto, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma mais simplificada, ao se reduzir os casos a curvas de tendência, é notável que essa configuração traga potenciais benefícios nos locais que apresentam temperaturas médias entre 14 e 24°C (Figura 170).

Figura 170- Curvas polinomiais que correlacionam a quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C com a temperatura média do ar externo para as envoltórias em alvenaria (Caso 1), drywall (Caso 2) drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e drywall + concreto.



Ao se aprofundar um pouco mais a análise, e fazer avaliação comparativa entre cada um dos casos com relação ao Phase Change Material (PCM) somado ao *drywall* (Caso 3) para cada uma das condições climáticas, pode-se destacar esta como a escolha mais vantajosa entre todas as envoltórias dos modelos sujeitos a temperaturas médias entre 14 e 22°C, ao apresentar maior quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C (Figura 171), e menor quantidade de horas acima ou abaixo dessa mesma faixa (Figura 172 e Figura 173).

No mesmo caso observam-se resultados superiores em comparação à envoltória em *drywall* (Caso 2), tanto na redução das horas acima de 26°C (Figura 172) quanto no aumento das horas na faixa desejada para condições climáticas com temperatura média anual inferior a 24°C e superiores a 14°C.

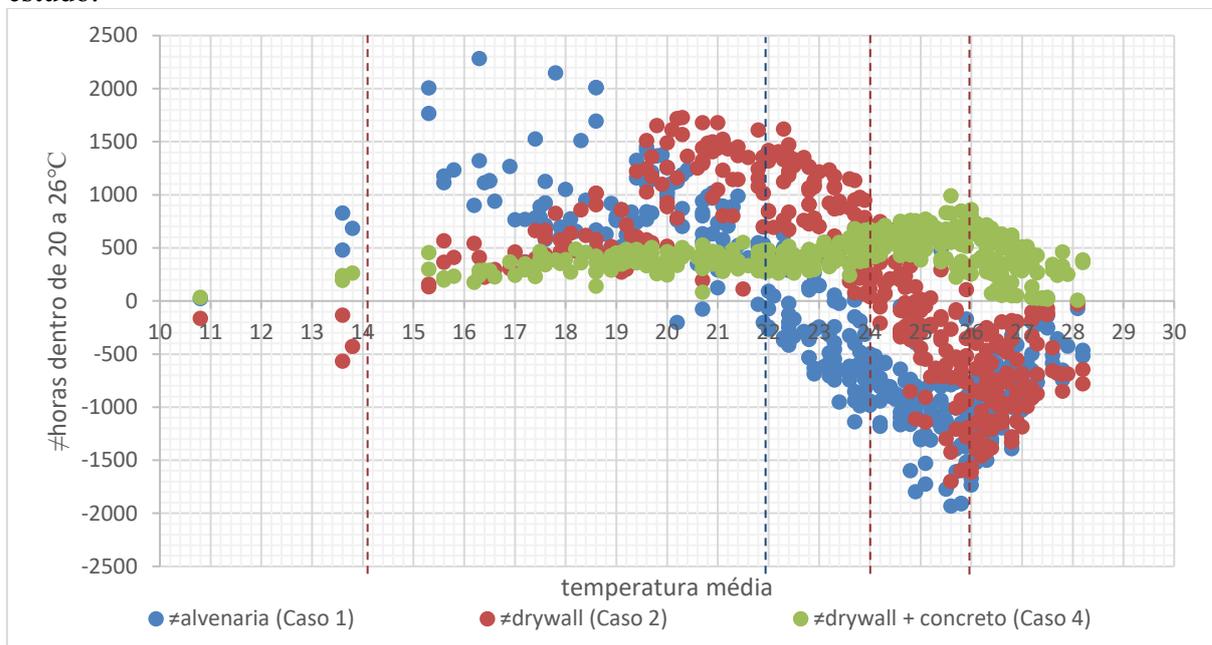
Na faixa de temperatura média entre 24 e 26°C, as envoltórias em *drywall* (Caso 2) e *drywall* somado ao PCM (Caso 3) distribuem de maneira mais equitativa a quantidade de horas acima e dentro da faixa desejada. Isso sugere que outras variáveis exerçam um papel mais determinante nesse intervalo específico para um bom desempenho da envoltória. Entretanto, ao ultrapassar os 26°C de temperatura média diária, o *drywall* (Caso 2) revela-se mais benéfico.

Comparando o *drywall* somado ao PCM (Caso 3) com a envoltória em alvenaria (Caso 1), novamente observa-se melhorias significativas, tanto na redução das horas acima de 26°C quanto no aumento das horas na faixa desejada para condições climáticas com temperatura média anual inferior a 22°C, um equilíbrio entre as envoltórias na faixa de 22 a 24°C, e uma vantagem clara na adoção da alvenaria para condições climáticas com temperatura média a partir dos 24°C.

Ao considerar a envoltória com *drywall* somado ao concreto em comparação com o modelo com PCM, torna-se o evidente benefício do material em relação a uma envoltória de características semelhantes, mas com a presença de um elemento pesado. Seja na quantidade de horas acima de 26°C, dentro do intervalo desejado ou abaixo de 20°C (Figura 173), a envoltória com PCM apresenta vantagens frente a essa configuração específica sob qualquer condição climática abordada.

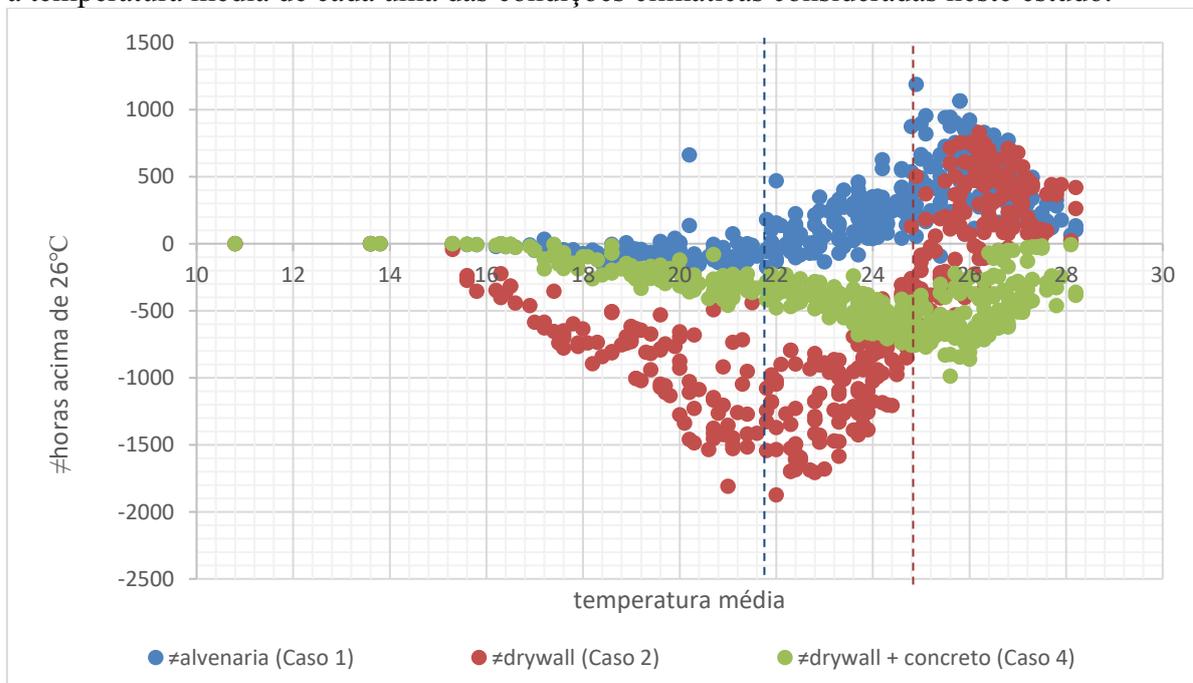
Finalmente, ao analisar separadamente a quantidade de horas abaixo de 20°C, o PCM demonstra a capacidade de reduzir esses valores em comparação com os demais casos, especialmente em condições climáticas com temperatura média acima de 14°C, predominantes no Brasil (Figura 173).

Figura 171 – Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



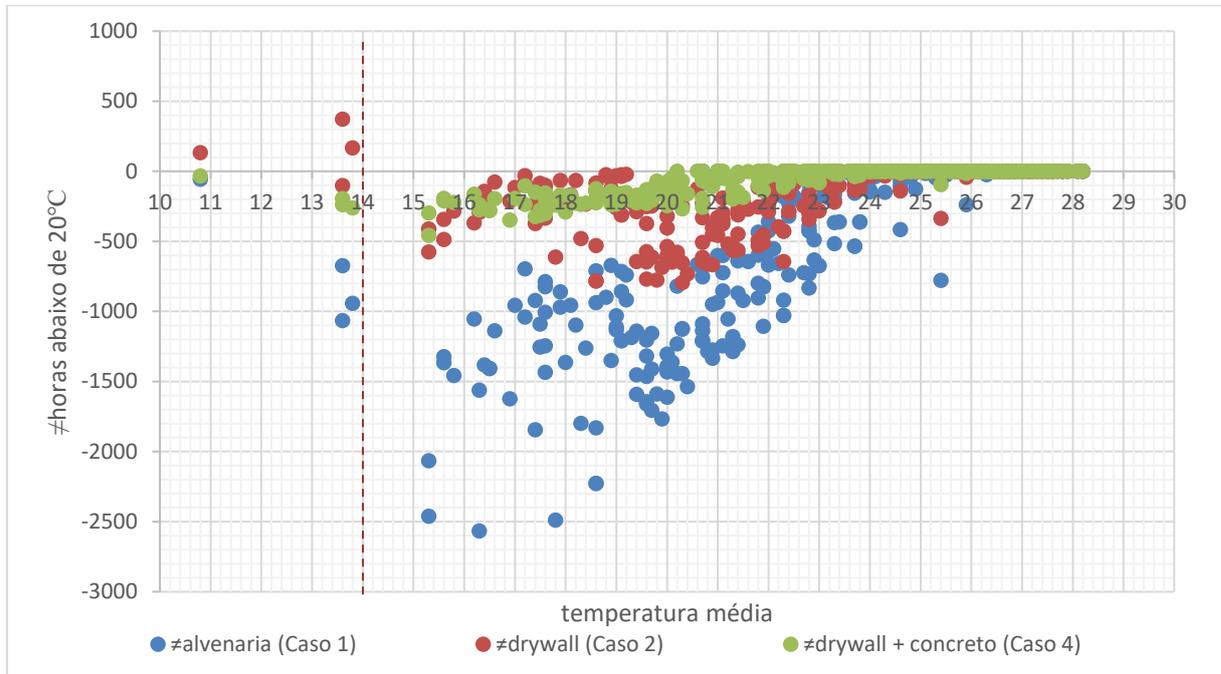
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 172 – Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 173 - Diferença da quantidade de horas abaixo de 20°C entre a envoltória em drywall + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a temperatura média de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

A introdução de materiais de mudança de fase (PCM) em conjunto com *drywall* (Caso 3) evidencia uma notável melhoria na extensão das horas mantidas dentro da faixa de temperatura desejada, em comparação com a configuração que combina *drywall* e concreto (Caso 4). Essa aprimoração permanece constante, independentemente do número de dias nos quais a temperatura excede o intervalo predefinido (Figura 174). No que diz respeito às horas registradas acima de 26°C (Figura 175), é possível afirmar os benefícios do uso da envoltória composta por *drywall* e PCM (Caso 3) em relação à configuração com *drywall* e concreto (Caso 4). Isso sugere que o primeiro caso apresenta índices superiores, independentemente da frequência com que a temperatura do ar externo ultrapassa a faixa estabelecida de 20 a 26°C.

O Caso 3 evidencia um aumento na quantidade de horas mantidas dentro da faixa de temperatura desejada, em comparação com o uso de *drywall* (Caso 2), quando sob condições climáticas nas quais a temperatura externa ultrapassa o intervalo especificado mais de 150 vezes ao ano. Adicionalmente, observa-se que o Caso 3 registra uma redução significativa na quantidade de horas com temperaturas superiores a 26°C, para valores superiores a 150 dias nos

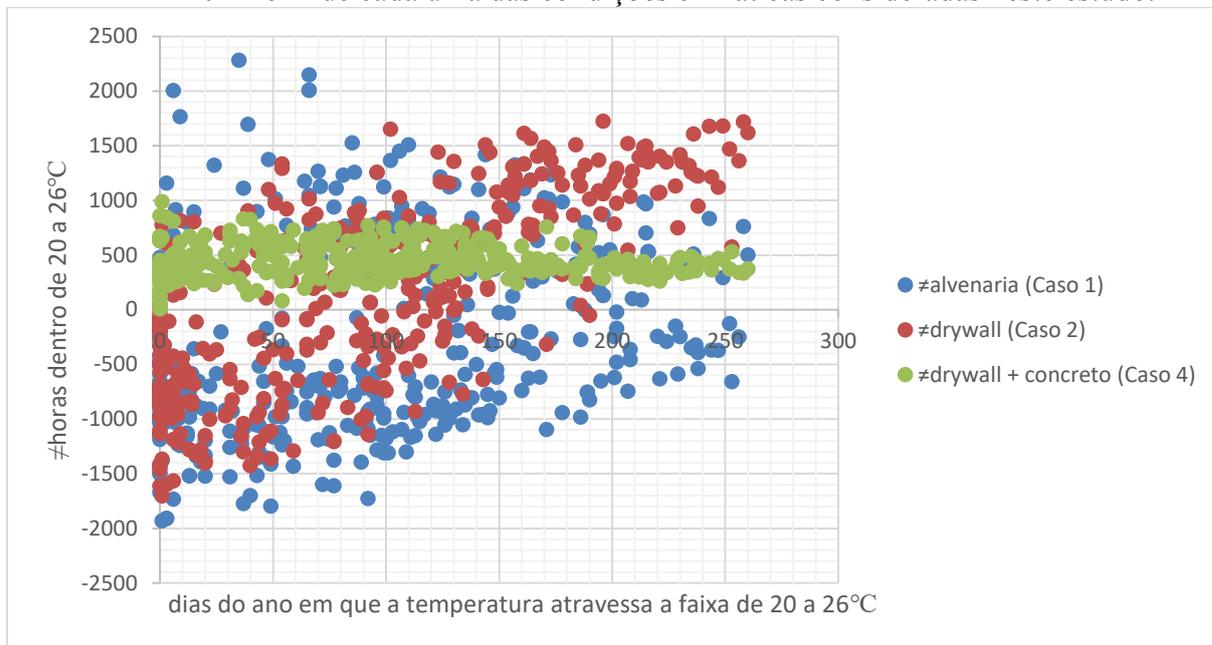
quais a temperatura externa cruza a faixa estabelecida de 20 a 26°C, quando confrontado com a configuração utilizando apenas *drywall*.

Em comparação à construção em alvenaria, o Caso 3 revela uma melhora discreta na quantidade de horas dentro da faixa de temperatura desejada, à medida que a frequência das variações da temperatura externa entre 20 a 26°C aumenta (Figura 174). Entretanto, é importante destacar que essa melhora não atinge um patamar que permita afirmar que o desempenho desse modelo supera o da construção em alvenaria diante dessas condições climáticas específicas.

Adicionalmente, observa-se que o Caso 3 registra uma maior quantidade de horas com temperaturas superiores a 26°C na maioria das condições climáticas, independentemente do número de dias nos quais a temperatura externa ultrapassa a faixa de 20 a 26°C (Figura 175). Somente a partir de aproximadamente 220 dias nos quais esse fenômeno ocorre é que se observa um certo equilíbrio. Essa constatação sugere que, embora o Caso 3 apresente melhorias em determinados aspectos, seu desempenho em relação à quantidade de horas acima de 26°C requer uma análise mais aprofundada e consideração crítica, especialmente quando comparado com o modelo em alvenaria.

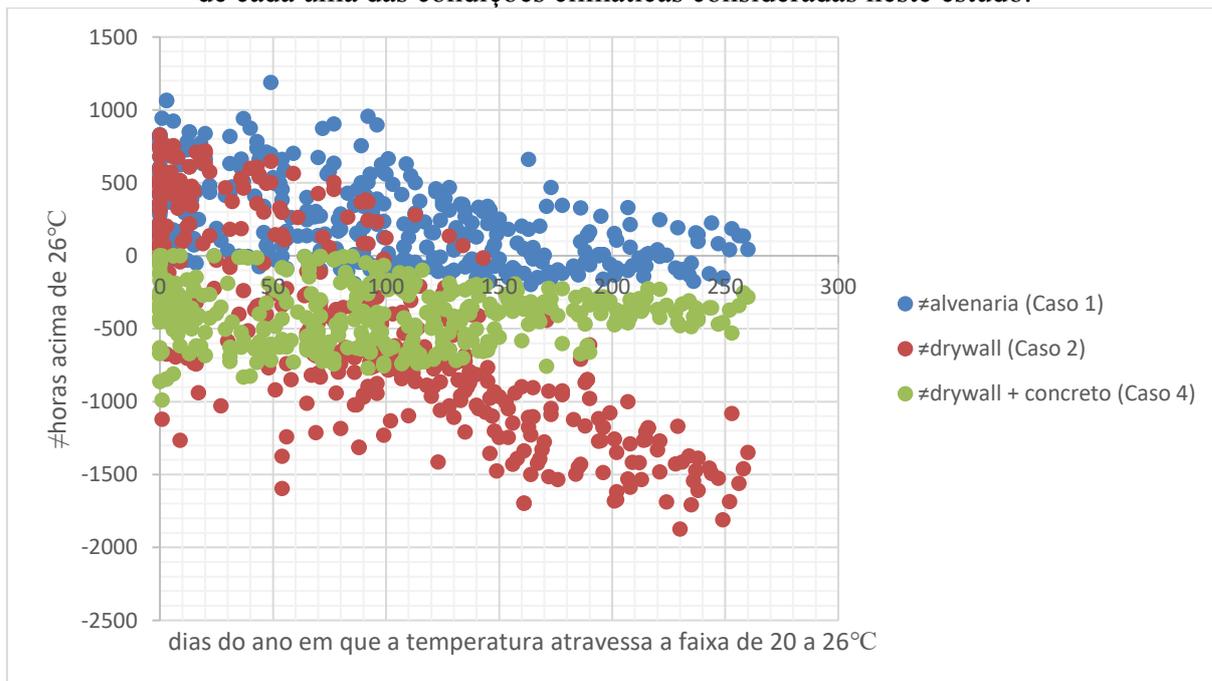
Quanto a quantidade horas acima de 26°C, pode-se afirmar o benefício da envoltória em *drywall* somada ao PCM (Caso 3) frente ao *drywall* somado ao concreto (Caso 4), desta forma apresentando melhores índices independentemente da quantidade de dias no qual a temperatura do ar externo atravessa a faixa de 20 a 26°C (Figura 175).

Figura 174– Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a quantidade de dias do ano em que a temperatura atravessa a faixa de 20 a 26°C de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 175– Diferença da quantidade de horas acima de 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e as demais configurações, de acordo com a quantidade de dias do ano em que a temperatura atravessa a faixa de 20 a 26°C de cada uma das condições climáticas consideradas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados anteriores foram carregados sobre o mapa do território brasileiro utilizando-se a ferramenta MyMaps do Google.

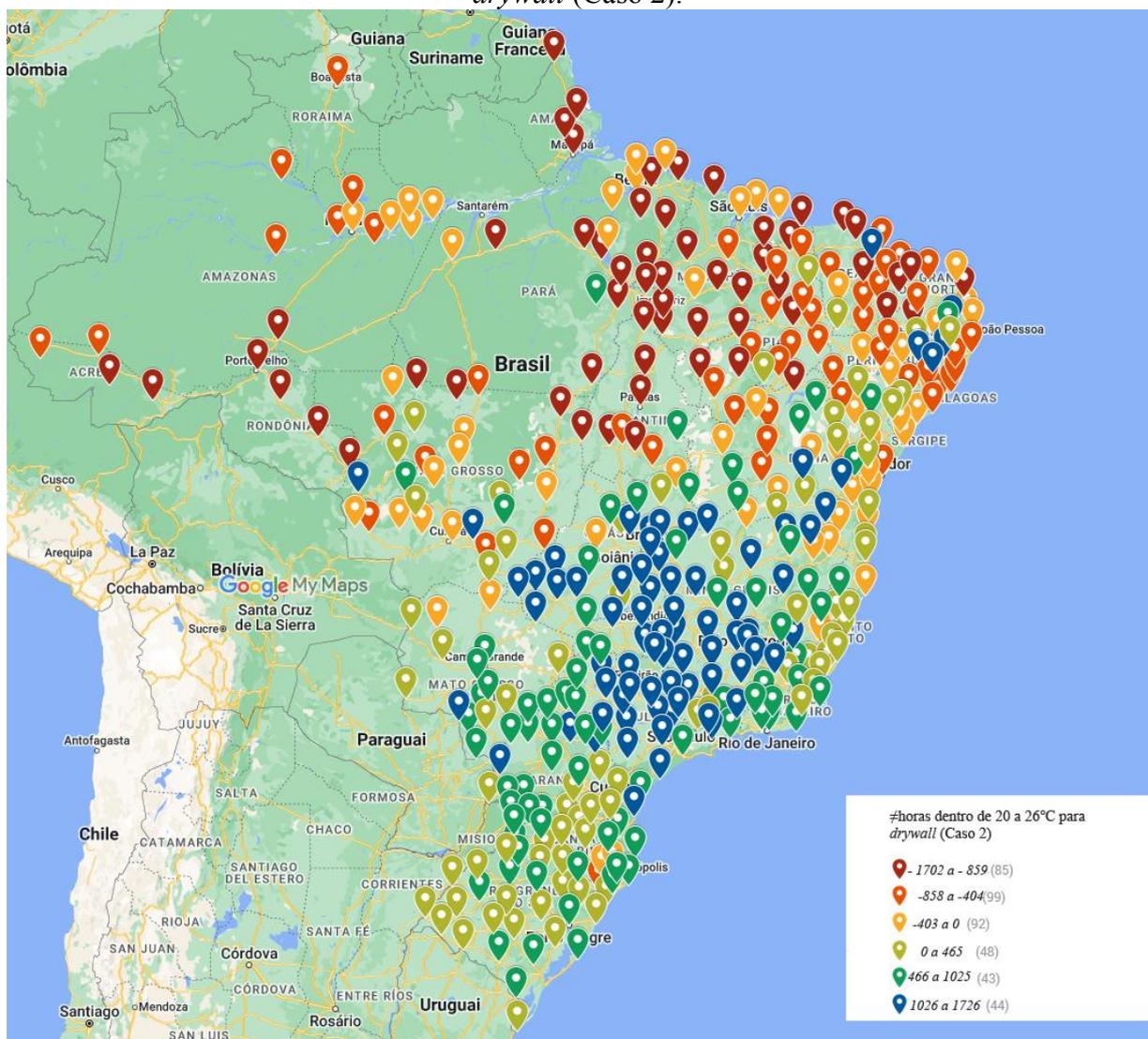
Ao visualizar os dados em um contexto geográfico, torna-se mais evidente a influência das condições locais nas conclusões do estudo. Essa abordagem permite identificar padrões específicos em diferentes regiões, destacando áreas onde a implementação do PCM em conjunto com *drywall* (Caso 3) se destaca como uma opção eficaz para aumentar a quantidade de horas na faixa desejada no interior da edificação, frente ao *drywall* (Caso 2) e a alvenaria (Caso 1). Simultaneamente, áreas que não se beneficiam desse sistema também podem ser identificadas, oferecendo insights para adaptações ou considerações futuras. Os mapas criados por Passos (2024) na plataforma MyMaps, desempenham um papel crucial ao correlacionar os resultados desta fase do estudo com a localização geográfica de cada município (Figura 176 e Figura 177).

Quando comparado com ao *drywall* (Caso 2), o PCM somado ao *drywall* (Caso 3) apresenta uma utilização mais benéfica na maior parte do centro-sul brasileiro (somatória das regiões sul, sudeste e centro-oeste) com exceção uma parcela do estado do Mato Grosso e a área serrana entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Já nas regiões Norte e Nordeste, o *drywall* somado ao PCM (Caso 3) se manifesta negativamente no desempenho térmico da HUPP na maioria de seu território se confrontado ao *drywall* (Caso 2). As áreas de maior altitude desta região são aquelas que contrariam esse cenário, apresentando um panorama favorável ao *drywall* com PCM (Caso3).

As regiões onde o impacto da introdução do PCM (ícones azuis) é ainda mais relevante frente ao *drywall*, são exatamente aquelas as quais apresentam temperaturas médias não tão baixas, nem altas, e com certa altitude, o que garante uma maior amplitude térmica diária.

Figura 176- Diferença da quantidade de horas dentro da faixa de 20 a 26°C entre a envoltória em *drywall* + PCM com temperatura de fusão em 25°C (Caso 3) e a envoltória em *drywall* (Caso 2).



Fonte: Elaborado pelo autor

Em contrapartida, a distribuição geográfica dos locais nos quais o PCM somado ao *drywall* (Caso 3) é benéfico frente a alvenaria (Caso 1) é mais restrito. Nesta comparação, fica clara a vantagem para esta configuração de envoltória somente na região sul, no sul do Mato Grosso do Sul, no estado de São Paulo, e em regiões com maior altitude do estado de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Goiás e Distrito Federal.

7.3.3 Considerações finais

Com base nos resultados obtidos considerando as 411 condições climáticas analisadas, destaca-se claramente o benefício do *Phase Change Material* (PCM) em relação a qualquer envoltória de *drywall* investigada nesta pesquisa em localidades com temperatura média entre 14 e 24°C ou que experimentem mais de 150 dias por ano nos quais a temperatura do ar externo cruze a faixa de 20 a 26°C.

Nesse contexto, os benefícios do PCM tornam-se evidentes para envoltórias em sistemas leves quando as temperaturas não atingem níveis excessivamente elevados. Isso se deve ao fato de que o PCM, nessas condições, não permanecer em seu estado líquido de forma persistente, permitindo assim sua efetiva ação no armazenamento de calor latente.

Em condições climáticas com temperatura média superior a 26°C, presume-se que o PCM, ou não passe por seu processo completo de troca de fase, ou acabe armazenando calor do período mais quente e dissipando-o no ambiente interno, tornando o ambiente com menos amplitude térmica, no entanto com uma maior concentração de horas acima de 26°C. Já o *drywall* sem a implementação do material tende a acompanhar mais as temperaturas externas, aumentando assim a quantidade de horas dentro da faixa entre 20 e 26°C.

Ressalta-se, ademais, a importância crucial de submeter o material a temperaturas que permitam a realização de sua troca de fases. Mesmo que a temperatura do ar interno ao modelo não reproduza exatamente a temperatura externa, a frequência elevada de temperaturas dentro da faixa propícia para a troca de fase do material no ambiente externo exerce uma influência determinante no desempenho eficaz do PCM.

Esses resultados destacam não apenas a eficácia do PCM em ambientes com temperaturas moderadas, mas também a relevância do contexto térmico externo na otimização do desempenho do material junto ao sistema leve. Essa consideração é crucial para garantir que o PCM atinja sua máxima eficiência e contribua de maneira efetiva para a melhoria das propriedades térmicas das envoltórias em *drywall*.

Notavelmente, nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, a combinação do PCM com o sistema leve (Caso 3) se demonstra mais benéfica em comparação ao *drywall* isolado (Caso 2), cabendo somente algumas ressalvas especialmente em localizações com temperaturas médias mais elevadas ou muito baixas.

As regiões Norte e Nordeste, por serem, no geral, detentoras de temperaturas médias mais elevadas e de menor amplitude térmica diária, esta configuração de envoltória manifesta impactos negativos no desempenho térmico da HUPP na maior parte do território, se comparado ao sistema leve sem o material, tendo como exceção as áreas de maior altitude, onde o cenário se inverte, já que apresentam maior amplitude térmica e menor temperatura média. Essa dicotomia ressalta a complexidade das influências climáticas e topográficas na eficácia de diferentes sistemas construtivos.

Por outro lado, ao se comparar o desempenho do sistema leve associado ao PCM com o modelo em alvenaria fica claro que seu benefício é reduzido em condições climáticas mais quentes, tendo localidades com temperatura média abaixo de 22°C como o maior potencial de uso.

A alvenaria, por ter uma capacidade térmica imutável de acordo com a temperatura média, apresenta uma amplitude térmica interna reduzida sob qualquer uma das condições climáticas estudadas e assim, em grande parte dos casos, uma maior quantidade de horas dentro da faixa. Já a envoltória na qual há introdução do PCM junto ao sistema de *drywall*, só apresenta amplitudes térmicas mais baixas que o sistema em alvenaria, quando o material passa por seu ciclo total de troca de fase, e que começa a acontecer com menor frequência a partir do momento em que é exposto a condições climáticas com temperaturas médias acima de 22°C.

Na faixa de temperaturas médias entre 22 e 24°C, a quantidade de horas acima de 26°C passa a aumentar no interior do modelo do Caso 3, assim como passa a diminuir a quantidade de horas dentro da faixa de referência, havendo casos no qual há maiores benefícios para o sistema quando confrontado a alvenaria, e outros em que a situação se inverte.

Para essa faixa, fica claro que a quantidade de dias em que a temperatura do ar externo atravessa a faixa de 20 a 26°C não influencia o desempenho térmico do modelo. Isto ocorre pois não necessariamente a temperatura do ar interna acompanhe esses valores devido até mesmo ao regime de ventilação do modelo, que permite a ventilação somente no período noturno e sob temperaturas acima 24 °C no ambiente interno.

Já sob condições climáticas com temperatura média superior a 26°C, é notável a desvantagem da utilização do *drywall* junto ao PCM frente a alvenaria. Isto ocorre por conta do PCM sob essas condições climáticas, raramente apresentar o seu ciclo completo de troca de fase.

Por conta desse desempenho térmico, pode-se notar que a distribuição geográfica das vantagens do PCM associado ao *drywall* em relação à alvenaria é mais restrita. Essa

configuração de envoltória apresenta uma clara vantagem em regiões específicas, como na região sul, no sul do Mato Grosso do Sul, no estado de São Paulo, e em regiões com maior altitude dos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Goiás e Distrito Federal. Isso sugere que a aplicação dessa tecnologia pode ser mais pontual e estratégica, dependendo das características geográficas locais.

8 CONCLUSÕES

Esta tese comprova o alto potencial da utilização do PCM em aperfeiçoar o desempenho térmico de Habitações Unifamiliares de Pequeno Porte (HUPP) em sistema leve de construção sob diversas condicionantes climáticas brasileiras.

Desta forma, pôde-se, primeiramente, no estudo piloto confirmar algumas tendências previamente identificadas na revisão bibliográfica. Observou-se que a adoção do PCM em conjunto com o sistema leve de construção apresentou benefícios, reduzindo a amplitude térmica diária interna nas cidades analisadas. Isso resultou em um ambiente interno menos suscetível às variações de temperatura externa, com menor ocorrência de temperaturas extremas e, desta forma, com maior conforto térmico quando comparado a um modelo com a mesma configuração de envoltória, mas sem o PCM, assim como com a envoltória em alvenaria.

Os estudos de Caso, que foram apresentados de forma mais detalhada a seguir, trouxeram em um modelo mais fiel a realidade e sob mais condições climáticas, a confirmação de alguns benefícios, mas ao mesmo tempo algumas limitações na utilização do material. Desta forma, ratificou-se o material com um alto potencial em reduzir as amplitudes térmicas diárias, evitando a ocorrência de temperaturas extremas, no entanto, verificou-se que o material não seria de grande benefício em locais demasiadamente quentes ao longo de todo ano, mesmo quando submetido a grandes amplitudes térmicas, pois o PCM neste caso, contribuiria para uma estabilização da temperatura interna fora da zona de conforto térmico do usuário.

Por fim, ao se expandir a análise para os 411 municípios nos quais haviam arquivos climáticos disponíveis, pode-se estabelecer um real potencial para a adoção do material, ajudando na confirmação dos estudos anteriores.

Sendo assim, pode-se estabelecer que o material possibilita uma melhor performance térmica em condições climáticas nas quais haja a possibilidade de fazer a troca de fase por mais dias ao longo do ano, assim como com temperaturas não demasiadamente elevadas.

Quando confrontado com configurações de envoltória tradicionalmente utilizadas no Brasil e que se enquadram em uma formatação recomendada por norma, como é o caso da alvenaria, o PCM associado ao *drywall* foi capaz de aprimorar o ambiente térmico interno, aumentando a quantidade horas dentro da faixa de temperatura considerada confortável ao usuário em uma área do país onde se concentram, segundo o IBGE (2022), mais de um terço da população nacional.

Os benefícios do material se mostram ainda mais relevantes quando confrontados com a envoltória em *drywall* sem a presença do PCM. Desta forma, ao associar o PCM ao sistema leve de construção, possibilita-se a melhora das condições térmicas internas em uma área do Brasil que abriga mais de 60% da população.

Desta forma, ao aprimorar o desempenho térmico de HUPP's com sistema leve de construção nessas partes do Brasil, revela-se também, o grande impacto que o material pode vir a ter na construção civil, especialmente no aumento da produtividade, velocidade de execução, na redução da produção de resíduos, uma vez que essas características estão associadas a este sistema construtivo.

Por fim, ao se obter uma construção civil de mais rápida execução, e com menor desperdício, abre-se caminho também para a redução do déficit habitacional no país, que atualmente se apoia em sistemas artesanais, de execução lenta e baixa produtividade, e que impossibilita um combate eficiente contra esse índice.

8.1 POTENCIALIDADES DO TRABALHO

O trabalho abarca a possibilidade de divulgação teórica por conta da revisão bibliográfica, tendo sido feita a abordagem, de forma ampla e aprofundada, de diversos estudos e, por consequência, diferentes pesquisadores a respeito da utilização do PCM em diversas localidades do mundo, e sob diversas condicionantes.

Esta pesquisa contribui, ao expor, de forma minuciosa, os impactos na utilização do PCM nas condições térmicas internas de HUPP's supridas de baixa inércia térmica, evidenciando aspectos importantes quanto à introdução dele na construção civil, tais como potenciais condições climáticas para seu uso.

Por fim, esta tese possibilita um avanço quanto a utilização dos sistemas leves de construção dentro de diversas regiões brasileiras, ao comprovar que a adoção desses sistemas construtivos somados ao PCM, quando bem prescrito, podem trazer condições de conforto térmico ao usuário, mesmo em localidades nas quais, por normas, não eram recomendados, e assim, possibilitar a introdução de uma construção civil com menores impactos ambientais; e maior eficiência e velocidade na sua execução.

8.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Ao se definir um único modelo de estudo de caso, não foi possível verificar o comportamento do PCM em edificações sob outras variáveis, tais como a maior exposição solar, ou maior carga térmica interna.

Ademais, a adoção de uma rotina padrão de ocupação e ventilação das edificações dificulta afirmações mais veementes, uma vez que na prática, cada residência é utilizada de forma singular pelo usuário, tornando difícil traçar um padrão.

Neste trabalho não foi analisado o condicionamento térmico híbrido, no qual há o acionamento de aparelhos de ar-condicionado nas condições climáticas extremas, e que segundo a revisão bibliográfica, se apresenta como potencial ao uso do PCM.

Por fim, também não são abordados aspectos importantes para a construção civil, mas que não fizeram parte do escopo deste trabalho por este ter como foco o aspecto do desempenho térmico. Pode-se destacar o custo-benefício do material, o tempo de retorno do investimento, em casos no qual é adotado o sistema híbrido de condicionamento térmico, o impacto ambiental na sua produção e descarte, e a vida útil do material.

8.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se que para futuros trabalhos, sejam feitos estudos quanto ao impacto do PCM junto às edificações dotadas de condicionamento térmico híbrido, tendo em vista, atender localidades inseridas em condições climáticas as quais a temperatura está quase sempre acima da zona de conforto térmico.

Também se tornam oportunos os estudos de edificações com a adoção do PCM junto a face externa da edificação, pois, como apresenta a revisão bibliográfica, o material pode ser muito útil em reduzir o ganho de calor do meio externo para o meio interno, quando aplicado desta maneira, podendo contribuir assim para um melhor desempenho térmico, sobretudo em condições climáticas com temperaturas elevadas e com temperatura média acima das margens de conforto térmico.

Aconselha-se também um maior estudo quanto a utilização deste material em edificações cuja ocupação se dá no período diurno, e quando é possível se aproveitar de forma mais eficaz das propriedades do PCM como uma estratégia passiva de resfriamento.

Por fim, estudos que busquem verificar a viabilidade econômica, aspectos ambientais de sua produção e descarte, assim como sua vida útil, contribuiria de forma fundamental para a popularização no uso do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proposta de revisão da **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2019.

AHMADI, R.; SHAHCHERAGHIAN, A. **Energy saving in building using PCM in windows**. 14th conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, 2015.

ALASSAAD, F.; TOUATI, K; LEVACHER, D; SEBAIBI, N. **Effect of latent heat storage on thermal comfort and energy consumption in lightweight earth-based housings**. Building and Environment 229, 2023.

AL-ABSI, Z; HAFIZAL, M; ISMAIL, M; MARDIANA, A; GHAZALI, A. **Peak indoor air temperature reduction for buildings in hot-humid climate using phase change materials**. Thermal Engineering 22, 2020.

AL-YASIRI, Q; SZAB'Ó, M. **Energetic and thermal comfort assessment of phase change material passively incorporated building envelope in severe hot Climate: An experimental study**. Applied Energy 314, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR ENGINEERS CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2010.

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; MASI R. F. De; ROSSI, F. de; VANOLI, G. P. **Energy refurbishment of existing buildings through the use of *Phase Change Materials***: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. Applied Energy 113, 2014. P. 990–1007.

BELTRÁN, R.; MARTINEZ-GOMEZ, J. **Analysis of *Phase Change Materials (PCM)* for building wallboards based on effect of environment**. Building Engineering 24, 2019.

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, Porto Alegre, V.17, n.1, p.125-145. jan./mar. 2017.

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 16798-1: Energy performance of buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Brussels, 2015.

CHING, Francis D. K. **Sistemas Estruturais Ilustrados: padrões, sistemas e projeto**. Tradução: Alexandre Salvaterra. – 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Relatório de Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Sumário Executivo – Ano base 2005**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2009.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico de energia elétrica 2019 – Ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**. Série Estudos da Demanda - Nota Técnica DEA 14/10. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

FERSTER, B.; SHEN, H.; RENDALL, J. **PCM (Phase Change Material) Optimization Modeling for Passive Cooling in South Texas**. Building Simulation 2017.

GELLER, H. S. **Revolução Energética: políticas para um futuro sustentável**. Rio de Janeiro: Relume Dumará; USAid, 2003.

GONÇALVES, R.; SOUZA, R.; CASTELO, A. M.; BROERING, L. **A Produtividade da Construção no Brasil e no Mundo**. FGV- Fundação Getúlio Vargas - Conjuntura da Construção, v. 13 n. 4, 2015.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/17270-pnad-continua.html?=&t=o-que-e>>. Visualizado em fev. 2020.

IMGHOURE, O; BELOUAGGADIA, N; EZZINE, M; LBIBB, R; YOUNSI, Z. **Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region**. Applied Thermal Engineering 186, 2021.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Portaria n. 18. Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 52016-1:Desempenho energético de edifícios - Métodos de cálculo para o balanço de energia térmica e exigência de energia térmica**. Genebra, 2017.

KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. **Phase change materials and products for building applications: A state-of-art review and future research opportunities**. Energy and Buildings 94, 2015. P. 150–176.

KARAOULIS, A. Investigation of energy **Performance in conventional and Lightweight Building Components with the use of *Phase Change Materials (PCMs)***: Energy Saving in Summer Season. *Procedia Environmental Sciences* 38, 2017. P. 796-803.

KAURANEN, P; PEIPPO, K.; LUND P.D. **An organic PCM storage system with adjustable melting temperature.** *Solar Energy* 46, Issue 5, 1991, P 275-278.

KUZNIK, F.; VIRGONE, J. **Experimental assessment of a *Phase Change Material* for wall building use.** *Applied Energy* 86, 2009. P. 2038–2046.

LABEEE, **Arquivos climáticos revisados em 2016.** Disponível em: < <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016> >. Visualizado em out. 2018.

LAAOUATNI, A.; MARTAJ, N.; BENNACER, R.; EL OMARI, M.; EL GANAOU, M. ***Phase Change Materials* for improving the building thermal inertia.** *Energy Procedia* 139, 2017. P. 744-749.

LAMBERTS, Roberto. **Heat Transfer through Roofs of Low Cost Brazilian Houses.** Tese (PHD) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Leeds. Leeds, 1988. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/nodel/118>. 2005. Visualizado em maio de 2021.

LEITZKE, R.K. **Avaliação de materiais de mudança de fase em uma habitação com Fechamentos leves nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 com base em algoritmos evolutivos multiobjetivo.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pelotas, 2021. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/9180?locale-attribute=en>. Visualizado em novembro de 2023.

LIU,Z; HOU, J; WEI, D; MENG, X; DEWANCKER, B. **Thermal performance analysis of lightweight building walls in different directions integrated with phase change materials (PCM).** *Thermal Engineering* 40, 2022.

LIU, Z.; YU, Z.; YANG, T.; QIN, D.; LIS.; ZHANG, G.; HAGHIGHAT, F.; JOYBARI, M. **A review on macro-encapsulated *Phase Change Material* for building envelope applications.** *Building and Environment* 144, 2018. P. 281-294.

ORDENES, M; PEDRINI,A.; E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada Na Elaboração Da Biblioteca De Materiais E Componentes Construtivos Brasileiros Para Simulações No Visualdoe-3.1.** Florianópolis, 2003. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/node/266>> Visualizado em fev. 2019.

PARK, B; CHEONG, C.; PARK, D; Ryu, S. **Effects of microencapsulated phase change material on indoor thermal comfort and energy consumption.** *Thermal Engineering* 41, 2023.

PASSOS, B. A. **Impacto do uso de isolante térmico em Habitações de Interesse Social nas diferentes condições climáticas brasileiras.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

PASSOS, B. A. **Diferença de horas na faixa drywall+PCM em comparação à alvenaria e ao drywall.** Florianópolis, 2024. Disponível em:
<https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?hl=pt-BR&mid=13pcek_af6i4TXjHk2cOJKluLnxHhNq8&ll=-13.434466503576887%2C-53.80000000000001&z=4>

PONS, V.; e STANESCU, G. **Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil.** PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, v8, n2, 2017. P. 127-140.

RIBEIRO, M. S.; MICHALKA, C.. **A Contribuição dos Processos Industriais de Construção para Adoção de Novas Tecnologias na Construção Civil no Brasil.** Revista Vértices. V5 N. 3, 2003.

RUBITHERM. **Catálogo de PCM's .** Disponível em:
<<https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; USHAK, S.; CABEZA, L. **Passive cooling of buildings with Phase Change Materials using wholebuilding energy simulation tools: A review.** Renewable and Sustainable. Energy Reviere 80, 2017. P. 1239-1255.

SANTAMOURIS, M.; PAVLOU, K.; SYNNEFA, A.; NIACHOU, K.; KOLOKOTSA, D. **Recent progress on passive cooling techniques advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households.** Energy and Buildings 39, 2007. P. 859-866.

SEAD – Super-efficient Equipment and Appliance Deployment. **Cooling the Planet: Opportunities for Deployment of Super Efficient Air Conditioners.** 2013. Disponível em:
<http://clasp.ngo/en/Resources/Resources/PublicationLibrary/2013/Cooling-the-Planet_Opportunities-for-Deployment-of-Super-Efficient-Air-Conditioners.aspx#files>. Visualizado em ago. 2018.

SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil. **Necessidades identificadas para atender a NBR 15.575.** 2015 . Disponível em:
<<http://www.portalsinduscon.com.br/eventos/files/14h45-Marcelo-Nogueira.pdf>>. Visualizado em dez. 2022.

SOLGI, E.; FAYAZ, R.; KARI, B.M. **Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining Phase Change Materials and night purge ventilation.** Renewable Energy 85, 2016. P. 725-731

SHILEI, L.; NENG, Z.; GUOHUI, F. **Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter.** Energy and Buildings 38, 2006. P. 18–24.

TARDIEU, A.; BEHZADI, S.; CHEN, J.; FARID, M. **Computer simulation and experimental measurements for an experimental PCM-impregnated office building.** 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011.

UCLA. DEPARTMENT OF ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN UNIVERSITY OF CALIFORNIA. **Climate Consultant 5.5**. Los Angeles: [s.n.]. Disponível em: < <https://climate-consultant.informer.com/5.5/> >. Visualizado em dez. 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus 9.2**. Energy Simulation Software. Disponível em: < <https://energyplus.net/downloads> >. Visualizado em out. 2018.

VAN DIJK, D. **Report on Case Study to EN ISO 52016-1 – Heating and cooling needs and internal temperatures**. Rotterdam, 2021. Disponível em:< https://epb.center/media/documents/EPB-Center-Case_Study_ISO_52016-1_HC_needstemp_Report_2021-10-31.pdf >. Visualizado em jan. 2024.

APÊNDICE A

Nome do arquivo climático	Cidade	Estado	Codigo	Latitude	Longitude	Altitude (m)
BRA_AC_Feijo.AP.819240_INMET	Feijo	AC	819240	-8,14	-70,34	163
BRA_AC_Parque.Chandless.819630_INMET	Parque Estadual Chandless	AC	819630	-9,37	-69,93	206
BRA_AC_Porto.Walter.819210_INMET	Porto Walter	AC	819210	-8,27	-72,74	240
BRA_AC_Rio.Branco.829150_INMET	Rio Branco	AC	829150	-9,96	-68,17	220
BRA_AL_Arapiraca.AP.819960_INMET	Arapiraca	AL	819960	-9,8	-36,62	241
BRA_AL_Coruripe.866190_INMET	Coruripe	AL	866190	-10,13	-36,29	74
BRA_AL_Maceio.829940_INMET	Maceio	AL	829940	-9,67	-35,74	64
BRA_AL_Palmeira.dos.Indios.829920_INMET	Palmeira dos Indios	AL	829920	-9,41	-36,63	275
BRA_AL_Pao.de.Acucar.819940_INMET	Pao de Acucar	AL	819940	-9,75	-37,44	19
BRA_AL_Sao.Luis.do.Quitunde.819970_INMET	Sao Luis do Quitunde	AL	819970	-9,29	-35,57	19
BRA_AM_Autazes.817320_INMET	Autazes	AM	817320	-3,58	-59,13	28
BRA_AM_Barcelos.AP.816480_INMET	Barcelos	AM	816480	-0,99	-62,92	17
BRA_AM_Coari.817700_INMET	Coari	AM	817700	-4,1	-63,15	43
BRA_AM_Humaita.AP.818900_INMET	Humaita	AM	818900	-7,55	-63,07	72
BRA_AM_Itacoatiara.AP.817330_INMET	Itacoatiara	AM	817330	-3,13	-58,48	45
BRA_AM_Manacapuru.817290_INMET	Manacapuru	AM	817290	-3,29	-60,63	19
BRA_AM_Manaus-Gomez.Intl.AP.817300_INMET	Manaus-Gomez Intl	AM	817300	-3,1	-60,03	67
BRA_AM_Maues.817340_INMET	Maues	AM	817340	-3,4	-57,67	35
BRA_AM_Parintins.817030_INMET	Parintins	AM	817030	-2,64	-56,76	35
BRA_AM_Presidente.Figueiredo.816990_INMET	Presidente Figueiredo	AM	816990	-2,06	-60,03	92
BRA_AM_Urucara.AP.817020_INMET	Urucara	AM	817020	-2,53	-57,76	17
BRA_AP_Macapa-Alcolumbre.Intl.AP.820980_INMET	Macapa-Alcolumbre Intl	AP	820980	0,04	-51,07	15
BRA_AP_Oiapoque.816090_INMET	Oiapoque	AP	816090	3,81	-51,86	21
BRA_AP_Porto.Grande.816370_INMET	Porto Grande	AP	816370	0,7	-51,41	77
BRA_AP_Tartarugalzinho.816280_INMET	Tartarugalzinho	AP	816280	1,5	-50,92	21
BRA_BA_Amargosa.AP.866750_INMET	Amargosa	BA	866750	-13,01	-39,62	407
BRA_BA_Barra.AP.866340_INMET	Barra	BA	866340	-11,08	-43,14	403
BRA_BA_Barreiras.866520_INMET	Barreiras	BA	866520	-12,15	-44,99	470
BRA_BA_Belmonte.867440_INMET	Belmonte	BA	867440	-16,09	-39,22	88
BRA_BA_Bom.Jesus.da.Lapa.AP.866720_INMET	Bom Jesus da Lapa	BA	866720	-13,26	-43,42	440
BRA_BA_Brumado.866960_INMET	Brumado	BA	866960	-14,18	-41,67	470
BRA_BA_Buritirama.AP.866090_INMET	Buritirama	BA	866090	-10,72	-43,65	502
BRA_BA_Caravelas.834970_INMET	Caravelas	BA	834970	-17,73	-39,2	3
BRA_BA_Conde.866390_INMET	Conde	BA	866390	-11,81	-37,62	14
BRA_BA_Correntina.866710_INMET	Correntina	BA	866710	-13,33	-44,62	549
BRA_BA_Cruz.das.Almas.866570_INMET	Cruz das Almas	BA	866570	-12,67	-39,1	226
BRA_BA_Delfino.866100_INMET	Delfino	BA	866100	-10,46	-41,21	637
BRA_BA_Euclides.da.Cunha.866130_INMET	Euclides da Cunha	BA	866130	-10,54	-39	432
BRA_BA_Feira.de.Santana.866580_INMET	Feira de Santana	BA	866580	-12,27	-38,97	231

BRA_BA_Guanambi.AP.866940_INMET	Guanambi	BA	866940	-14,21	-42,75	551
BRA_BA_Ibotirama.866530_INMET	Ibotirama	BA	866530	-12,19	-43,21	430
BRA_BA_Ilheus.866990_INMET	Ilheus	BA	866990	-14,79	-39,05	78
BRA_BA_Ipiauí.866980_INMET	Ipiauí	BA	866980	-14,14	-39,73	135
BRA_BA_Irece.AP.866350_INMET	Irece	BA	866350	-11,33	-41,86	755
BRA_BA_Itaberaba.832440_INMET	Itaberaba	BA	832440	-12,53	-40,31	250
BRA_BA_Itapetinga.867230_INMET	Itapetinga	BA	867230	-15,24	-40,24	279
BRA_BA_Itirucu.866740_INMET	Itirucu	BA	866740	-13,53	-40,15	756
BRA_BA_Jacobina.866360_INMET	Jacobina	BA	866360	-11,21	-40,47	453
BRA_BA_Lençóis.866540_INMET	Lençóis	BA	866540	-12,56	-41,39	439
BRA_BA_Macajuba.866550_INMET	Macajuba	BA	866550	-12,14	-40,36	380
BRA_BA_Marau.866770_INMET	Marau	BA	866770	-13,91	-38,97	10
BRA_BA_Paulo.Afonso.829860_INMET	Paulo Afonso	BA	829860	-9,41	-38,22	253
BRA_BA_Piata.866730_INMET	Piata	BA	866730	-13,16	-41,77	1290
BRA_BA_Porto.Seguro.867450_INMET	Porto Seguro	BA	867450	-16,39	-39,18	85
BRA_BA_Queimadas.866120_INMET	Queimadas	BA	866120	-10,98	-39,62	315
BRA_BA_Remanso.829790_INMET	Remanso	BA	829790	-9,62	-42,08	401
BRA_BA_Salvador.866780_INMET	Salvador	BA	866780	-12,97	-38,51	51
BRA_BA_Santa.Rita.de.Cassia.866330_INMET	Santa Rita de Cassia	BA	866330	-11,01	-44,52	450
BRA_BA_Senhor.do.Bonfim.830880_INMET	Senhor do Bonfim	BA	830880	-10,44	-40,15	548
BRA_BA_Serrinha.866370_INMET	Serrinha	BA	866370	-11,66	-39,02	339
BRA_BA_Uauá.819920_INMET	Uauá	BA	819920	-9,83	-39,5	453
BRA_BA_Una.867240_INMET	Una	BA	867240	-15,28	-39,09	82
BRA_BA_Valença.866760_INMET	Valença	BA	866760	-13,37	-39,07	39
BRA_BA_Vitoria.da.Conquista-Figueiredo.AP.866970_INMET	Vitoria da Conquista-Figueiredo	BA	866970	-14,87	-40,84	870
BRA_CE_Acarau.817550_INMET	Acarau	CE	817550	-3,12	-40,09	76
BRA_CE_Barbalha.819110_INMET	Barbalha	CE	819110	-7,3	-39,27	409
BRA_CE_Campos.Sales.827770_INMET	Campos Sales	CE	827770	-7,08	-40,36	572
BRA_CE_Crateus.818300_INMET	Crateus	CE	818300	-5,19	-40,67	291
BRA_CE_Fortaleza-Pinto.Martins.Intl.AP.817580_INMET	Fortaleza-Pinto Martins Intl	CE	817580	-3,8	-38,53	41
BRA_CE_Guaramiranga.824870_INMET	Guaramiranga	CE	824870	-4,26	-38,93	38
BRA_CE_Iguatu.818730_INMET	Iguatu	CE	818730	-6,36	-39,3	233
BRA_CE_Itapipoca.817560_INMET	Itapipoca	CE	817560	-3,48	-39,59	102
BRA_CE_Jaguaribe.818330_INMET	Jaguaribe	CE	818330	-5,91	-38,63	184
BRA_CE_Jaguaruana.824930_INMET	Jaguaruana	CE	824930	-4,79	-37,78	12
BRA_CE_Morada.Nova.825940_INMET	Morada Nova	CE	825940	-5,11	-38,37	44
BRA_CE_Quixeramobim.825860_INMET	Quixeramobim	CE	825860	-5,2	-39,29	80
BRA_CE_Tauá.818720_INMET	Tauá	CE	818720	-6,02	-40,28	415
BRA_DF_Brasília.867150_INMET	Brasília	DF	867150	-15,78	-47,93	1160
BRA_DF_Planaltina.867160_INMET	Planaltina	DF	867160	-15,53	-47,56	1200
BRA_ES_Alegre.868280_INMET	Alegre	ES	868280	-20,76	-41,53	138
BRA_ES_Alfredo.Chaves.868290_INMET	Alfredo Chaves	ES	868290	-20,64	-40,75	35
BRA_ES_Linhares.868050_INMET	Linhares	ES	868050	-19,39	-40,07	40

BRA_ES_Nova.Venecia.867850_INMET	Nova Venecia	ES	867850	-18,7	-40,39	154
BRA_ES_Presidente.Kennedy.868530_INMET	Presidente Kennedy	ES	868530	-21,1	-41,04	80
BRA_ES_Santa.Teresa.868040_INMET	Santa Teresa	ES	868040	-19,99	-40,58	998
BRA_ES_Sao.Mateus.867860_INMET	Sao Mateus	ES	867860	-18,72	-39,86	39
BRA_ES_Vitoria.868300_INMET	Vitoria	ES	868300	-20,32	-40,34	9
BRA_GO_Alto.Paraiso.de.Goiias.866910_INMET	Alto Paraiso de Goias	GO	866910	-14,13	-47,51	1260
BRA_GO_Aragarcas.833740_INMET	Aragarcas	GO	833740	-15,9	-52,25	347
BRA_GO_Caiaponia.867300_INMET	Caiaponia	GO	867300	-16,96	-51,81	737
BRA_GO_Catalao.867770_INMET	Catalao	GO	867770	-18,16	-47,93	890
BRA_GO_Cristalina.867370_INMET	Cristalina	GO	867370	-16,79	-47,61	1202
BRA_GO_Goianesia.867130_INMET	Goianesia	GO	867130	-15,32	-49,12	667
BRA_GO_Goiania.834230_INMET	Goiania	GO	834230	-15,37	-48,78	770
BRA_GO_Goiias.867120_INMET	Goiias	GO	867120	-15,93	-50,14	512
BRA_GO_Itapaci.866890_INMET	Itapaci	GO	866890	-14,95	-49,55	522
BRA_GO_Itumbiara.867740_INMET	Itumbiara	GO	867740	-18,41	-49,19	488
BRA_GO_Jatai.867520_INMET	Jatai	GO	867520	-17,88	-51,71	582
BRA_GO_Luziania.867360_INMET	Luziania	GO	867360	-16,25	-47,95	958
BRA_GO_Mineiros.867510_INMET	Mineiros	GO	867510	-17,57	-52,6	706
BRA_GO_Monte.Alegre.de.Goiias.866700_INMET	Monte Alegre de Goias	GO	866700	-13,5	-46,89	1253
BRA_GO_Morrinhos.867550_INMET	Morrinhos	GO	867550	-17,73	-49,1	771
BRA_GO_Niquelandia.866900_INMET	Niquelandia	GO	866900	-14,47	-48,46	583
BRA_GO_Parauna.867320_INMET	Parauna	GO	867320	-16,96	-50,43	678
BRA_GO_Pires.do.Rio.867560_INMET	Pires do Rio	GO	867560	-17,31	-48,28	752
BRA_GO_Posse.866920_INMET	Posse	GO	866920	-14,09	-46,37	834
BRA_GO_Rio.Verde.867530_INMET	Rio Verde	GO	867530	-17,8	-50,93	782
BRA_GO_Sao.Simao.867730_INMET	Sao Simao	GO	867730	-18,99	-50,54	489
BRA_MA_Alto.Parnaiba.829700_INMET	Alto Parnaiba	MA	829700	-9,11	-45,93	281
BRA_MA_Bacabal.817900_INMET	Bacabal	MA	817900	-4,24	-44,8	28
BRA_MA_Balsas.819030_INMET	Balsas	MA	819030	-7,46	-46,03	254
BRA_MA_Barra.do.Corda.818250_INMET	Barra do Corda	MA	818250	-5,51	-45,24	153
BRA_MA_Buriticupu.817880_INMET	Buriticupu	MA	817880	-4,32	-46,45	175
BRA_MA_Carolina.819010_INMET	Carolina	MA	819010	-7,34	-47,46	192
BRA_MA_Caxias.817920_INMET	Caxias	MA	817920	-4,82	-43,34	76
BRA_MA_Chapadinha.817490_INMET	Chapadinha	MA	817490	-3,74	-43,35	91
BRA_MA_Colinas.818660_INMET	Colinas	MA	818660	-6,03	-44,23	179
BRA_MA_Estreito.818630_INMET	Estreito	MA	818630	-6,65	-47,42	180
BRA_MA_Farol.Preguicas.817170_INMET	Farol Preguicas	MA	817170	-2,59	-42,71	0
BRA_MA_Farol.Santana.822770_INMET	Farol Santana	MA	822770	-2,27	-43,62	0
BRA_MA_Grajau.818230_INMET	Grajau	MA	818230	-5,82	-46,16	230
BRA_MA_Imperatriz.818220_INMET	Imperatriz	MA	818220	-5,56	-47,46	126
BRA_MA_Sao.Luis.817150_INMET	Sao Luis	MA	817150	-2,53	-44,3	56
BRA_MA_Turiacu.821980_INMET	Turiacu	MA	821980	-1,66	-45,37	41
BRA_MG_Aguas.Vermelhas.867220_INMET	Agua Vermelhas	MG	867220	-15,75	-41,46	740

BRA_MG_Aimores.868030_INMET	Aimores	MG	868030	-19,5	-41,06	84
BRA_MG_Almenara.867430_INMET	Almenara	MG	867430	-16,18	-40,69	208
BRA_MG_Araxa.867960_INMET	Araxa	MG	867960	-19,59	-46,94	1020
BRA_MG_Belo.Horizonte-Pampulha.AP.868000_INMET	Belo Horizonte-Pampulha	MG	868000	-19,82	-43,96	869
BRA_MG_Buritis.867180_INMET	Buritis	MG	867180	-15,62	-46,42	894
BRA_MG_Caldas.868460_INMET	Caldas	MG	868460	-21,92	-46,39	1150
BRA_MG_Capelinha.867610_INMET	Capelinha	MG	867610	-17,69	-42,52	932
BRA_MG_Carangola.868230_INMET	Carangola	MG	868230	-20,73	-42,02	399
BRA_MG_Caratinga.835920_INMET	Caratinga	MG	835920	-19,79	-42,14	615
BRA_MG_Chapada.Gaucha.867190_INMET	Chapada Gaucha	MG	867190	-15,31	-45,62	880
BRA_MG_Conceicao.das.Alagoas.867940_INMET	Conceicao das Alagoas	MG	867940	-19,99	-48,15	568
BRA_MG_Curvelo.867800_INMET	Curvelo	MG	867800	-18,76	-44,43	670
BRA_MG_Diamantina.AP.867810_INMET	Diamantina	MG	867810	-18,23	-43,65	1356
BRA_MG_Dores.do.Indaia.867970_INMET	Dores do Indaia	MG	867970	-19,46	-45,6	722
BRA_MG_Espinosa.866950_INMET	Espinosa	MG	866950	-14,92	-42,8	570
BRA_MG_Florestal.867980_INMET	Florestal	MG	867980	-19,89	-44,42	742
BRA_MG_Formiga.868200_INMET	Formiga	MG	868200	-20,46	-45,45	878
BRA_MG_Governador.Valadares.835430_INMET	Governador Valadares	MG	835430	-18,85	-41,95	263
BRA_MG_Guarda-Mor.867570_INMET	Guarda-Mor	MG	867570	-17,77	-47,1	616
BRA_MG_Ibirite.868210_INMET	Ibirite	MG	868210	-20,03	-44,01	1208
BRA_MG_Itaobim.867420_INMET	Itaobim	MG	867420	-16,34	-41,29	266
BRA_MG_Ituiutaba.867750_INMET	Ituiutaba	MG	867750	-18,97	-49,47	560
BRA_MG_Joao.Pinheiro.AP.867580_INMET	Joao Pinheiro	MG	867580	-17,78	-46,12	870
BRA_MG_Juiz.de.For.836920_INMET	Juiz de Fora	MG	836920	-21,76	-43,35	950
BRA_MG_Mantena.867840_INMET	Mantena	MG	867840	-18,78	-40,98	214
BRA_MG_Maria.da.Fe.830150_INMET	Maria da Fe	MG	830150	-22,31	-45,38	1276
BRA_MG_Mocaminho.867200_INMET	Mocaminho	MG	867200	-15,09	-44,02	460
BRA_MG_Montalvania.866930_INMET	Montalvania	MG	866930	-14,42	-44,37	512
BRA_MG_Monte.Verde.AP.868700_INMET	Monte Verde	MG	868700	-22,86	-46,03	1500
BRA_MG_Montes.Claros.867400_INMET	Montes Claros	MG	867400	-16,74	-43,86	646
BRA_MG_Muriae.868520_INMET	Muriae	MG	868520	-21,13	-42,37	297
BRA_MG_Ouro.Branco.868230_INMET	Ouro Branco	MG	868230	-20,52	-43,69	1061
BRA_MG_Passa.Quatro.837370_INMET	Passa Quatro	MG	837370	-22,39	-44,97	1040
BRA_MG_Passos.868190_INMET	Passos	MG	868190	-20,75	-46,63	875
BRA_MG_Patrocínio.867780_INMET	Patrocínio	MG	867780	-18,94	-46,99	976
BRA_MG_Pirapora.AP.867590_INMET	Pirapora	MG	867590	-17,34	-44,94	489
BRA_MG_Rio.Pardo.de.Minas.867210_INMET	Rio Pardo de Minas	MG	867210	-15,72	-42,44	853
BRA_MG_Sacramento.867950_INMET	Sacramento	MG	867950	-19,86	-47,44	912
BRA_MG_Salinas.867410_INMET	Salinas	MG	867410	-16,17	-42,29	495
BRA_MG_Sao.Joao.del.Rei.836880_INMET	Sao Joao del Rei	MG	836880	-21,14	-44,26	991
BRA_MG_Sao.Romao.867390_INMET	Sao Romao	MG	867390	-16,37	-45,07	460
BRA_MG_Serra.dos.Aimores.867630_INMET	Serra dos Aimores	MG	867630	-17,78	-40,25	208
BRA_MG_Teofilo.Otoni.867620_INMET	Teofilo Otoni	MG	867620	-17,86	-41,51	475

BRA_MG_Timoteo.868010_INMET	Timoteo	MG	868010	-19,58	-42,64	333
BRA_MG_Tres.Marias.867790_INMET	Tres Marias	MG	867790	-18,21	-45,24	921
BRA_MG_Uberlandia.867760_INMET	Uberlandia	MG	867760	-18,92	-48,28	869
BRA_MG_Unai.AP.834280_INMET	Unai	MG	834280	-16,36	-46,91	631
BRA_MG_Varginha.868480_INMET	Varginha	MG	868480	-21,55	-45,43	955
BRA_MG_Vicosa.836420_INMET	Vicosa	MG	836420	-20,75	-42,88	712
BRA_MS_Amambai.868940_INMET	Amambai	MS	868940	-23	-55,33	431
BRA_MS_Campo.Grande.Intl.AP.868100_INMET	Campo Grande Intl	MS	868100	-20,44	-54,65	530
BRA_MS_Chapadao.do.Sul.867720_INMET	Chapadao do Sul	MS	867720	-18,79	-52,62	818
BRA_MS_Corumba.Intl.AP.835520_INMET	Corumba Intl	MS	835520	-19,01	-57,65	126
BRA_MS_Coxim.867700_INMET	Coxim	MS	867700	-18,3	-54,44	252
BRA_MS_Dourados.836590_INMET	Dourados	MS	836590	-22,22	-54,81	469
BRA_MS_Ivinhema.868600_INMET	Ivinhema	MS	868600	-22,31	-53,81	373
BRA_MS_Juti.868590_INMET	Juti	MS	868590	-22,86	-54,61	379
BRA_MS_Miranda.868070_INMET	Miranda	MS	868070	-20,24	-56,38	140
BRA_MS_Nhumirim.867680_INMET	Nhumirim	MS	867680	-18,99	-56,62	104
BRA_MS_Ponta.Pora.868570_INMET	Ponta Pora	MS	868570	-22,54	-55,73	650
BRA_MS_Porto.Murtinho.AP.868330_INMET	Porto Murtinho	MS	868330	-21,7	-57,88	85
BRA_MS_Rio.Brilhante.868360_INMET	Rio Brilhante	MS	868360	-21,78	-54,53	329
BRA_MS_Sete.Quedas.868950_INMET	Sete Quedas	MS	868950	-23,97	-55,02	402
BRA_MS_Sidrolandia.868090_INMET	Sidrolandia	MS	868090	-20,98	-54,97	464
BRA_MS_Tres.Lagoas.AP.868130_INMET	Tres Lagoas	MS	868130	-20,75	-51,68	313
BRA_MT_Agua.Boa.866860_INMET	Agua Boa	MT	866860	-14,05	-52,16	432
BRA_MT_Alto.Taquari.867500_INMET	Alto Taquari	MT	867500	-17,82	-53,29	875
BRA_MT_Apiacas.819760_INMET	Apiacas	MT	819760	-9,54	-57,45	220
BRA_MT_Campo.Novo.do.Parecis.866620_INMET	Campo Novo do Parecis	MT	866620	-13,68	-57,89	570
BRA_MT_Campo.Verde.867070_INMET	Campo Verde	MT	867070	-15,55	-55,17	749
BRA_MT_Carlinda.819780_INMET	Carlinda	MT	819780	-9,97	-55,83	300
BRA_MT_Comodoro.866610_INMET	Comodoro	MT	866610	-13,66	-59,79	591
BRA_MT_Confresa.866060_INMET	Confresa	MT	866060	-10,65	-51,57	237
BRA_MT_Cotriguacu.829270_INMET	Cotriguacu	MT	829270	-9,86	-58,41	261
BRA_MT_Cuiaba.867050_INMET	Cuiaba	MT	867050	-15,62	-56	151
BRA_MT_Gaucha.do.Norte.866660_INMET	Gaucha do Norte	MT	866660	-13,18	-53,26	379
BRA_MT_Guaranta.do.Norte.819790_INMET	Guaranta do Norte	MT	819790	-9,79	-54,91	320
BRA_MT_Guiratinga.867290_INMET	Guiratinga	MT	867290	-16,34	-53,77	526
BRA_MT_Itiquira.867480_INMET	Itiquira	MT	867480	-17,18	-54,5	585
BRA_MT_Juara.866250_INMET	Juara	MT	866250	-11,26	-57,52	260
BRA_MT_Juina.866240_INMET	Juina	MT	866240	-11,38	-58,74	200
BRA_MT_Nova.Maringa.866630_INMET	Nova Maringa	MT	866630	-13,04	-57,09	353
BRA_MT_Novo.Mundo.866430_INMET	Novo Mundo	MT	866430	-12,52	-58,23	431
BRA_MT_Paranatinga.866840_INMET	Paranatinga	MT	866840	-14,43	-54,05	474
BRA_MT_Pontes.de.Lacerda.867020_INMET	Pontes de Lacerda	MT	867020	-15,25	-59,35	256
BRA_MT_Porto.Estrela.867040_INMET	Porto Estrela	MT	867040	-15,32	-57,23	145

BRA_MT_Querencia.866470_INMET	Querencia	MT	866470	-12,63	-52,22	382
BRA_MT_Rondonopolis.867280_INMET	Rondonopolis	MT	867280	-16,47	-54,64	284
BRA_MT_Salto.do.Ceu.867030_INMET	Salto do Ceu	MT	867030	-15,12	-58,13	303
BRA_MT_Santo.Antonio.do.Leste.866850_INMET	Santo Antonio do Leste	MT	866850	-14,93	-53,88	648
BRA_MT_Sao.Felix.do.Araguaia.866280_INMET	Sao Felix do Araguaia	MT	866280	-11,62	-50,73	218
BRA_MT_Sao.Jose.do.Rio.Claro.866640_INMET	Sao Jose do Rio Claro	MT	866640	-13,45	-56,72	350
BRA_MT_Sinop.866260_INMET	Sinop	MT	866260	-11,86	-55,5	371
BRA_MT_Sorriso.866450_INMET	Sorriso	MT	866450	-12,55	-55,71	380
BRA_MT_Tangara.da.Serra.866820_INMET	Tangara da Serra	MT	866820	-14,62	-57,49	322
BRA_MT_Vila.Bela.da.Santissima.Trindade.867010_INMET	Vila Bela da Santissima Trindade	MT	867010	-15,01	-59,95	222
BRA_PA_Belem.816800_INMET	Belem	PA	816800	-1,46	-48,5	24
BRA_PA_Braganca.816850_INMET	Braganca	PA	816850	-1,05	-46,78	33
BRA_PA_Cameta.817100_INMET	Cameta	PA	817100	-2,25	-49,49	22
BRA_PA_Castanhal.816820_INMET	Castanhal	PA	816820	-1,3	-47,92	65
BRA_PA_Conceicao.do.Araguaia.819400_INMET	Conceicao do Araguaia	PA	819400	-6,28	-49,27	180
BRA_PA_Itaituba.817780_INMET	Itaituba	PA	817780	-4,28	-55,99	13
BRA_PA_Maraba.825620_INMET	Maraba	PA	825620	-5,37	-49,12	84
BRA_PA_Novo.Repartimento.817840_INMET	Novo Repartimento	PA	817840	-4,26	-49,93	113
BRA_PA_Pacaja.817420_INMET	Pacaja	PA	817420	-3,84	-50,64	108
BRA_PA_Paragominas.817450_INMET	Paragominas	PA	817450	-3,01	-47,34	101
BRA_PA_Placas.817370_INMET	Placas	PA	817370	-3,86	-54,22	96
BRA_PA_Rondon.do.Para.817860_INMET	Rondon do Para	PA	817860	-4,78	-48,07	221
BRA_PA_Salinopolis.816600_INMET	Salinopolis	PA	816600	-0,62	-47,35	20
BRA_PA_Santana.do.Araguaia.819820_INMET	Santana do Araguaia	PA	819820	-9,34	-50,33	168
BRA_PA_Serra.dos.Carajas.818600_INMET	Serra dos Carajas	PA	818600	-6,08	-50,14	719
BRA_PA_Soure.821410_INMET	Soure	PA	821410	-0,81	-48,52	11
BRA_PA_Tome.Acu.817110_INMET	Tome Acu	PA	817110	-2,59	-48,36	38
BRA_PA_Tucuruui.817430_INMET	Tucuruui	PA	817430	-3,82	-49,68	148
BRA_PB_Areia.818770_INMET	Areia	PB	818770	-6,96	-35,69	575
BRA_PB_Cabaceiras.819150_INMET	Cabaceiras	PB	819150	-7,48	-36,29	436
BRA_PB_Camaratuba.818780_INMET	Camaratuba	PB	818780	-6,61	-35,13	136
BRA_PB_Campina.Grande.819160_INMET	Campina Grande	PB	819160	-7,23	-35,88	548
BRA_PB_Joao.Pessoa.819180_INMET	Joao Pessoa	PB	819180	-7,11	-34,86	44
BRA_PB_Monteiro.819140_INMET	Monteiro	PB	819140	-7,89	-37,12	604
BRA_PB_Patos.819130_INMET	Patos	PB	819130	-7,02	-37,28	249
BRA_PB_Sao.Goncalo.817740_INMET	Sao Goncalo	PB	817740	-6,84	-38,31	234
BRA_PE_Arcoverde.819530_INMET	Arcoverde	PE	819530	-8,42	-37,05	681
BRA_PE_Cabrobo.828860_INMET	Cabrobo	PE	828860	-8,5	-39,31	342
BRA_PE_Caruaru.828950_INMET	Caruaru	PE	828950	-8,24	-35,99	550
BRA_PE_Floresta.819770_INMET	Floresta	PE	819770	-8,61	-38,59	329
BRA_PE_Garanhuns.819550_INMET	Garanhuns	PE	819550	-8,89	-36,49	823
BRA_PE_Ibimirim.819540_INMET	Ibimirim	PE	819540	-8,51	-37,71	448
BRA_PE_Palmares.819570_INMET	Palmares	PE	819570	-8,67	-35,57	180

BRA_PE_Petrolina.819910_INMET	Petrolina	PE	819910	-9,39	-40,51	370
BRA_PE_Recife.819580_INMET	Recife	PE	819580	-8,05	-34,88	10
BRA_PE_Serra.Talhada.819120_INMET	Serra Talhada	PE	819120	-7,95	-38,29	461
BRA_PE_Surubim.819170_INMET	Surubim	PE	819170	-7,84	-35,79	418
BRA_PI_Alvorada.do.Gurgueia.818460_INMET	Alvorada do Gurgueia	PI	818460	-8,44	-43,86	270
BRA_PI_Bom.Jesus.do.Piaui.829750_INMET	Bom Jesus do Piaui	PI	829750	-9,07	-44,36	331
BRA_PI_Caracol.819880_INMET	Caracol	PI	819880	-9,29	-43,32	100
BRA_PI_Castelo.do.Piaui.818290_INMET	Castelo do Piaui	PI	818290	-5,35	-41,51	286
BRA_PI_Esperantina.817510_INMET	Esperantina	PI	817510	-3,9	-42,26	65
BRA_PI_Floriano.818680_INMET	Floriano	PI	818680	-6,77	-43,02	123
BRA_PI_Gilbues.819860_INMET	Gilbues	PI	819860	-9,87	-45,35	425
BRA_PI_Oeiras.818690_INMET	Oeiras	PI	818690	-6,97	-42,15	156
BRA_PI_Parnaiba.817520_INMET	Parnaiba	PI	817520	-2,9	-41,78	80
BRA_PI_Paulistana.828820_INMET	Paulistana	PI	828820	-8,14	-41,15	374
BRA_PI_Picos.827910_INMET	Picos	PI	827910	-7,07	-41,4	233
BRA_PI_Piripiri.817940_INMET	Piripiri	PI	817940	-4,27	-41,78	161
BRA_PI_Sao.Joao.do.Piaui.818480_INMET	Sao Joao do Piaui	PI	818480	-8,36	-42,25	235
BRA_PI_Sao.Pedro.do.Piaui.818280_INMET	Sao Pedro do Piaui	PI	818280	-5,91	-42,72	287
BRA_PI_Sao.Raimundo.Nonato.819890_INMET	Sao Raimundo Nonato	PI	819890	-9,03	-42,7	402
BRA_PI_Teresina.818320_INMET	Teresina	PI	818320	-5,09	-42,8	74
BRA_PI_Urucui.819050_INMET	Urucui	PI	819050	-7,47	-44,34	393
BRA_PI_Valenca.do.Piaui.818700_INMET	Valenca do Piaui	PI	818700	-6,4	-41,74	301
BRA_PR_Castro.869210_INMET	Castro	PR	869210	-24,79	-50,01	1008
BRA_PR_Cidade.Gaucha.868980_INMET	Cidade Gaucha	PR	868980	-23,36	-52,93	381
BRA_PR_Clevelandia.869390_INMET	Clevelandia	PR	869390	-26,42	-52,35	980
BRA_PR_Curitiba.838420_INMET	Curitiba	PR	838420	-25,43	-49,27	924
BRA_PR_Diamante.do.Norte.868610_INMET	Diamante do Norte	PR	868610	-22,64	-52,89	362
BRA_PR_Dois.Vizinhos.869270_INMET	Dois Vizinhos	PR	869270	-25,69	-53,09	520
BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.869250_INMET	Foz do Iguacu-Cataratas Intl	PR	869250	-25,6	-54,48	231
BRA_PR_General.Carneiro.869410_INMET	General Carneiro	PR	869410	-26,4	-51,35	1018
BRA_PR_Ibaiti.869020_INMET	Ibaiti	PR	869020	-23,77	-50,18	930
BRA_PR_Icaraima.868970_INMET	Icaraima	PR	868970	-23,4	-53,61	385
BRA_PR_Ilha.do.Mel.869350_INMET	Ilha do Mel	PR	869350	-25,57	-48,32	1
BRA_PR_Inacio.Martins.869290_INMET	Inacio Martins	PR	869290	-25,57	-51,08	1260
BRA_PR_Ivai.869300_INMET	Ivai	PR	869300	-25,01	-50,86	808
BRA_PR_Joaquim.Tavora.869030_INMET	Joaquim Tavora	PR	869030	-23,5	-49,9	522
BRA_PR_Londrina.837680_INMET	Londrina	PR	837680	-23,38	-51,18	566
BRA_PR_Marechal.Candido.Rondon.869160_INMET	Marechal Candido Rondon	PR	869160	-24,56	-54,06	392
BRA_PR_Maringa.868990_INMET	Maringa	PR	868990	-23,42	-51,94	542
BRA_PR_Nova.Fatima.869010_INMET	Nova Fatima	PR	869010	-23,43	-50,56	668
BRA_PR_Nova.Tebas.869190_INMET	Nova Tebas	PR	869190	-24,44	-51,94	654
BRA_PR_Paranapoema.868620_INMET	Paranapoema	PR	868620	-22,49	-52,13	311
BRA_PR_Planalto.869260_INMET	Planalto	PR	869260	-25,72	-53,75	346

BRA_RJ_Arraial.do.Cabo.868920_INMET	Arraial do Cabo	RJ	868920	-22,97	-42,03	4
BRA_RJ_Cambuci.868540_INMET	Cambuci	RJ	868540	-21,58	-41,91	35
BRA_RJ_Campos.dos.Goytacazes.868550_INMET	Campos dos Goytacazes	RJ	868550	-21,75	-41,32	25
BRA_RJ_Duque.de.Caxias-Xerem.868770_INMET	Duque de Caxias-Xerem	RJ	868770	-22,57	-43,3	0
BRA_RJ_Farol.de.Sao.Tome.868900_INMET	Farol de Sao Tome	RJ	868900	-22,04	-41,05	4
BRA_RJ_Macae.868910_INMET	Macae	RJ	868910	-22,37	-41,79	32
BRA_RJ_Niteroi.868810_INMET	Niteroi	RJ	868810	-22,91	-43,13	13
BRA_RJ_Paraty.869130_INMET	Paraty	RJ	869130	-23,22	-44,71	4
BRA_RJ_Petropolis-Pico.do.Couto.868760_INMET	Petropolis-Pico do Couto	RJ	868760	-22,46	-43,3	1777
BRA_RJ_Resende.837380_INMET	Resende	RJ	837380	-22,47	-44,45	440
BRA_RJ_Rio.de.Janeiro-Vila.Militar.868790_INMET	Rio de Janeiro-Vila Militar	RJ	868790	-22,86	-43,41	45
BRA_RJ_Teresopolis.868880_INMET	Teresopolis	RJ	868880	-22,41	-42,97	980
BRA_RJ_Valenca.868750_INMET	Valenca	RJ	868750	-22,25	-43,7	367
BRA_RN_Apodi.818350_INMET	Apodi	RN	818350	-5,63	-37,83	150
BRA_RN_Caico.818750_INMET	Caico	RN	818750	-6,46	-37,1	170
BRA_RN_Macau.818360_INMET	Macau	RN	818360	-5,11	-36,63	3
BRA_RN_Mossoro.818340_INMET	Mossoro	RN	818340	-5,19	-37,34	36
BRA_RN_Natal.818390_INMET	Natal	RN	818390	-5,8	-35,21	49
BRA_RN_Touros.818380_INMET	Touros	RN	818380	-5,16	-35,49	17
BRA_RO_Ariquemes.819700_INMET	Ariquemes	RO	819700	-9,95	-62,96	140
BRA_RO_Cacoal.866220_INMET	Cacoal	RO	866220	-11,45	-61,43	210
BRA_RO_Porto.Velho.819320_INMET	Porto Velho	RO	819320	-8,76	-63,9	95
BRA_RO_Vilhena.866420_INMET	Vilhena	RO	866420	-12,73	-60,16	590
BRA_RR_Boa.Vista.816150_INMET	Boa Vista	RR	816150	2,8	-60,65	90
BRA_RS_Alegrete.869750_INMET	Alegrete	RS	869750	-29,78	-55,79	121
BRA_RS_Bage.839800_INMET	Bage	RS	839800	-31,33	-54,11	230
BRA_RS_Bento.Goncalves.869790_INMET	Bento Goncalves	RS	869790	-29,17	-51,52	640
BRA_RS_Cacapava.do.Sul.869860_INMET	Cacapava do Sul	RS	869860	-30,51	-53,49	420
BRA_RS_Camaqua.869890_INMET	Camaqua	RS	869890	-30,81	-51,83	108
BRA_RS_Canela.AP.869800_INMET	Canela	RS	869800	-29,37	-50,83	830
BRA_RS_Cangucu.869930_INMET	Cangucu	RS	869930	-31,41	-52,7	464
BRA_RS_Chui.869980_INMET	Chui	RS	869980	-33,74	-53,37	26
BRA_RS_Cruz.Alt.839120_INMET	Cruz Alta	RS	839120	-28,6	-53,67	432
BRA_RS_Erechim.869540_INMET	Erechim	RS	869540	-27,63	-52,27	765
BRA_RS_Frederico.Westphalen.869510_INMET	Frederico Westphalen	RS	869510	-27,4	-53,43	490
BRA_RS_Jaguarao.869960_INMET	Jaguarao	RS	869960	-32,57	-53,38	47
BRA_RS_Lagoa.Vermelha.869650_INMET	Lagoa Vermelha	RS	869650	-28,22	-51,51	842
BRA_RS_Mostardas.839700_INMET	Mostardas	RS	839700	-31,25	-50,91	10
BRA_RS_Palmeira.das.Missoes.869530_INMET	Palmeira das Missoes	RS	869530	-27,92	-53,32	642
BRA_RS_Passo.Fundo.869630_INMET	Passo Fundo	RS	869630	-28,26	-52,41	684
BRA_RS_Porto.Alegre.869880_INMET	Porto Alegre	RS	869880	-30,03	-51,23	47
BRA_RS_Quarai.869820_INMET	Quarai	RS	869820	-30,37	-56,44	124
BRA_RS_Rio.Pardo.869780_INMET	Rio Pardo	RS	869780	-29,87	-52,38	111

BRA_RS_Santa.Maria.839360_INMET	Santa Maria	RS	839360	-29,68	-53,81	95
BRA_RS_Santana.do.Livramento.839530_INMET	Santana do Livramento	RS	839530	-30,89	-55,53	328
BRA_RS_Santiago.869760_INMET	Santiago	RS	869760	-29,19	-54,89	394
BRA_RS_Santo.Augusto.869520_INMET	Santo Augusto	RS	869520	-27,85	-53,78	550
BRA_RS_Sao.Borja.869600_INMET	Sao Borja	RS	869600	-28,66	-56	83
BRA_RS_Sao.Gabriel.869840_INMET	Sao Gabriel	RS	869840	-30,34	-54,31	126
BRA_RS_Sao.Jose.dos.Ausentes.869670_INMET	Sao Jose dos Ausentes	RS	869670	-28,75	-50,07	1244
BRA_RS_Sao.Luiz.Gonzaga.869610_INMET	Sao Luiz Gonzaga	RS	869610	-28,41	-54,96	245
BRA_RS_Soledade.869640_INMET	Soledade	RS	869640	-28,85	-52,54	667
BRA_RS_Torres.869810_INMET	Torres	RS	869810	-29,33	-49,73	5
BRA_RS_Tramandai.869900_INMET	Tramandai	RS	869900	-30,01	-50,14	1
BRA_RS_Uruguaiana.869730_INMET	Uruguaiana	RS	869730	-29,75	-57,09	62
BRA_RS_Vacaria.869660_INMET	Vacaria	RS	869660	-28,51	-50,88	986
BRA_SC_Ararangua.869710_INMET	Ararangua	SC	869710	-28,93	-49,5	12
BRA_SC_Cacador.869430_INMET	Cacador	SC	869430	-26,82	-50,84	952
BRA_SC_Curitibaos.AP.869560_INMET	Curitibaos	SC	869560	-27,29	-50,6	982
BRA_SC_Dionisio.Cerqueira.869360_INMET	Dionisio Cerqueira	SC	869360	-26,29	-53,63	810
BRA_SC_Florianopolis.838970_INMET	Florianopolis	SC	838970	-27,6	-48,55	2
BRA_SC_Indaial.838720_INMET	Indaial	SC	838720	-26,92	-49,27	86
BRA_SC_Itapoa.869470_INMET	Itapoa	SC	869470	-26,12	-48,62	2
BRA_SC_Ituporanga.869570_INMET	Ituporanga	SC	869570	-27,42	-49,65	484
BRA_SC_Joacaba-Santa.Terezinha.Muni.AP.869550_INMET	Joacaba-Santa Terezinha Muni	SC	869550	-27,17	-51,56	776
BRA_SC_Major.Vieira.869420_INMET	Major Vieira	SC	869420	-26,4	-50,36	808
BRA_SC_Novo.Horizonte.869380_INMET	Novo Horizonte	SC	869380	-26,41	-52,85	960
BRA_SC_Rio.Negrinho.869450_INMET	Rio Negrinho	SC	869450	-26,25	-49,58	869
BRA_SC_Santa.Marta.839250_INMET	Santa Marta	SC	839250	-28,6	-48,81	52
BRA_SC_Sao.Joaquim.869690_INMET	Sao Joaquim	SC	869690	-28,28	-49,93	1410
BRA_SC_Sao.Miguel.do.Oeste.AP.869370_INMET	Sao Miguel do Oeste	SC	869370	-26,78	-53,5	665
BRA_SC_Urubici.869680_INMET	Urubici	SC	869680	-28,13	-49,48	1810
BRA_SC_Urussanga.869700_INMET	Urussanga	SC	869700	-28,53	-49,32	48
BRA_SC_Xanxere.869400_INMET	Xanxere	SC	869400	-26,94	-52,4	889
BRA_SE_Aracaju.866160_INMET	Aracaju	SE	866160	-10,91	-37,07	5
BRA_SE_Brejo.Grande.866180_INMET	Brejo Grande	SE	866180	-10,47	-36,48	10
BRA_SE_Carira.866150_INMET	Carira	SE	866150	-10,4	-37,75	308
BRA_SE_Itabaianinha.866380_INMET	Itabaianinha	SE	866380	-11,27	-37,79	208
BRA_SE_Poco.Verde.866140_INMET	Poco Verde	SE	866140	-10,74	-38,11	362
BRA_SP_Ariranha.868410_INMET	Ariranha	SP	868410	-21,13	-48,84	525
BRA_SP_Avare.869040_INMET	Avare	SP	869040	-23,1	-48,93	654
BRA_SP_Bauru.837220_INMET	Bauru	SP	837220	-22,32	-49,06	550
BRA_SP_Campinas.837210_INMET	Campinas	SP	837210	-22,82	-47,06	640
BRA_SP_Campos.do.Jordao.868720_INMET	Campos do Jordao	SP	868720	-22,74	-45,59	1642
BRA_SP_Casa.Branca.868440_INMET	Casa Branca	SP	868440	-21,77	-47,09	730
BRA_SP_Franca.868180_INMET	Franca	SP	868180	-20,54	-47,4	1026

BRA_SP_Ibitinga.868430_INMET	Ibitinga	SP	868430	-21,86	-48,8	492
BRA_SP_Iguape.869230_INMET	Iguape	SP	869230	-24,71	-47,56	3
BRA_SP_Itapeva.837740_INMET	Itapeva	SP	837740	-23,98	-48,88	707
BRA_SP_Itapira.868690_INMET	Itapira	SP	868690	-22,42	-46,81	633
BRA_SP_Ituverava.868170_INMET	Ituverava	SP	868170	-20,36	-47,78	600
BRA_SP_Jales.868140_INMET	Jales	SP	868140	-20,27	-50,55	457
BRA_SP_Jose.Bonifacio.868390_INMET	Jose Bonifacio	SP	868390	-21,1	-49,92	405
BRA_SP_Lins.868400_INMET	Lins	SP	868400	-21,68	-49,74	459
BRA_SP_Ourinhos.868660_INMET	Ourinhos	SP	868660	-22,98	-49,87	448
BRA_SP_Piracicaba.868680_INMET	Piracicaba	SP	868680	-22,73	-47,65	573
BRA_SP_Presidente.Prudente.837160_INMET	Presidente Prudente	SP	837160	-22,13	-51,39	436
BRA_SP_Rancharia.868640_INMET	Rancharia	SP	868640	-22,37	-50,97	350
BRA_SP_Sao.Carlos.868450_INMET	Sao Carlos	SP	868450	-22,02	-47,89	863
BRA_SP_Sao.Luis.do.Paraitinga.869120_INMET	Sao Luis do Paraitinga	SP	869120	-23,23	-45,42	874
BRA_SP_Sao.Paulo.837810_INMET	Sao Paulo	SP	837810	-23,85	-46,64	792
BRA_SP_Sorocaba.838510_INMET	Sorocaba	SP	838510	-23,5	-47,46	609
BRA_SP_Taubate.869110_INMET	Taubate	SP	869110	-23,03	-45,56	571
BRA_SP_Valparaiso.868380_INMET	Valparaiso	SP	868380	-21,32	-50,93	374
BRA_SP_Votuporanga.868150_INMET	Votuporanga	SP	868150	-20,42	-49,97	486
BRA_TO_Araguaina.819000_INMET	Araguaina	TO	819000	-7,18	-48,22	226
BRA_TO_Araguatins.818210_INMET	Araguatins	TO	818210	-5,64	-48,11	117
BRA_TO_Dianopolis.866320_INMET	Dianopolis	TO	866320	-11,59	-46,85	732
BRA_TO_Formoso.do.Araguaia.866290_INMET	Formoso do Araguaia	TO	866290	-11,78	-49,61	220
BRA_TO_Gurupi.866300_INMET	Gurupi	TO	866300	-11,72	-49,08	287
BRA_TO_Palmas.866070_INMET	Palmas	TO	866070	-10,17	-48,33	280
BRA_TO_Parana.866500_INMET	Parana	TO	866500	-12,6	-47,87	280
BRA_TO_Pedro.Afonso.819410_INMET	Pedro Afonso	TO	819410	-8,97	-48,17	189
BRA_TO_Peixe.866490_INMET	Peixe	TO	866490	-12,02	-48,54	242