SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMO-ENERGÉTICO DE COBERTURAS COM PCM EM 3 CIDADES BRASILEIRAS

Matheus K. Bracht (1); Matheus Geraldi (2); Larissa Pereira de Souza (3); Mateus Bavaresco (4), Ana Paula Melo (5); Roberto Lamberts (6)
(1) Mestre, Engenheiro Civil, matheus.bracht@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(2) Doutor, Engenheiro Civil, matheus.s.geraldi@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(3) Mestra, Arquiteta e Urbanista, laripereiradesouza@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(4) Doutor, Engenheiro Civil, bavarescomateus@gmail.com, Universidade Federal de Santa Catarina
(5) Doutora, Engenheira Civil, a.p.melo@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina
(6) PhD, Engenheiro Civil, roberto.lamberts@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo
O objetivo deste estudo é avaliar o potencial de utilizar uma cobertura com materiais de mudança de fase (PCM) para aumentar a resiliência de edificações habitacionais em diferentes climas brasileiros. Foi utilizado um modelo de simulação para testar quatro diferentes configurações de coberturas, que foram simuladas considerando-se baixa e alta absortância para três cidades: Curitiba, São Paulo e São Luís. Os resultados evidenciam a importância do uso de indicadores complementares para proceder com a análise de desempenho térmico, já que o uso de apenas um indicador pode mascarar certos comportamentos. Por exemplo, foi demonstrado o bom resultado termo-energético do uso da telha de fibrocimento como única camada de cobertura para o clima de São Luís. Entretanto, o indicador de temperatura operativa máxima e temperatura superficial interna demonstram maiores valores para essa alternativa, exigindo cautela no uso dessa solução. Quanto ao desempenho das alternativas utilizando PCM, foi possível notar um melhor desempenho nos indicadores utilizados quando o clima se mostra mais ameno, e ainda, os melhores resultados foram encontrados entre os indicadores relacionados ao desempenho passivo da edificação.

Palavras-chave: Residencial, Material de mudança de fase, EnergyPlus, Temperatura superficial.

ABSTRACT
This study aims to evaluate the potential of using phase changing material (PCM) in the roofing system of residential buildings to increase their resilience in different Brazilian climates. A simulation model was used to test four different roof configurations, which were simulated considering low and high absorptivity for three cities: Curitiba, São Paulo, and São Luís. The results highlight the importance of using complementary indicators to proceed with thermal performance analysis, as using only one indicator can hide some issues. For example, a positive result was obtained using fibro cement tiles as the only roof layer in São Luís. However, the maximum operative temperature and internal surface temperature indicators showed higher values for this alternative, requiring caution when using this solution. Regarding the performance of PCM-based alternatives, it was possible to notice better performance in the indicators used when the climate was milder. Furthermore, the best results were found among the building's passive performance indicators.

Keywords: Residential, Phase change material, EnergyPlus, Surface temperature.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas pressionam o desenvolvimento de soluções tecnológicas nos diversos setores da humanidade. A busca por materiais, componentes construtivos e inovações que tornem o setor da construção civil mais alinhado com o desenvolvimento sustentável é um desafio da sociedade atual.

Nesse sentido, as edificações residenciais têm um papel especial. Além de ser o maior percentual do estoque de edificações (80% da área construída no mundo), segundo Santamouris (2021), também apresentam uma grave deficiência em proporcionar adequadas condições de habitabilidade. Por exemplo, a ONU estima que mais de 300 mil pessoas no Brasil habitam lugares insalubres – por insalubres entendem-se lugares que não dão a proteção adequada à pessoa habitante, por ser muito quente, muito frio (ou ambos), ou por proporcionar níveis de iluminação inadequados, baixo desempenho acústico, baixa renovação de ar, entre outros fatores – o que pode ocasionar doenças aos ocupantes (KING *et al.*, 2017).

Especificamente, o levantamento da Pesquisa de Posses e Hábitos (PPH) realizado em 2019 pela Eletrobrás, no âmbito do Procel, revela que os moradores conseguem ver o telhado diretamente de dentro da edificação em 45,63% das habitações no Brasil, indicando que o sistema construtivo da cobertura consiste apenas de telhado, sem a presença de lajes ou forros (ELETROBRAS, 2019). Isso evidencia um problema, visto que em edificações residenciais unifamiliares (geralmente de um a dois andares), a maior troca de calor ocorre pela cobertura. No sistema construtivo brasileiro, a laje destaca-se pela capacidade térmica (quantidade de calor que deve ser absorvida ou cedida por um corpo para que ocorra variação de 1°C), o que faz o calor ser transferido para dentro da edificação gradativamente, ao que chamamos de inércia térmica. Ou seja, quanto mais rápido a edificação ganha calor do meio externo, menor sua inércia térmica.

Uma baixa capacidade térmica confere significativas trocas de calor, fazendo com que os ambientes internos fiquem suscetíveis a picos de calor, resultando no ganho de carga térmica. Dessa forma, ao não empregar um componente construtivo adequado para a cobertura, há o comprometimento tanto da resiliência quanto da sustentabilidade da habitação. Diante do exposto, é importante pensar em um elemento construtivo que possa proporcionar inércia térmica às habitações, sem onerar a estrutura, e que seja compatível com as atuais técnicas de construção.

Materiais de mudança de fase (do inglês *Phase Changing Materials*, ou PCMs), são materiais que possuem um ponto de fusão dentro do intervalo de variação que ocorre na superfície da Terra. Ao ser empregado na envoltória de uma edificação, o PCM utiliza a energia que seria transferida para dentro da edificação para mudar de fase, mantendo-se na sua temperatura de ponto de fusão por um certo período. Como o calor latente (energia necessária para mudar de fase) é muito maior que o calor sensível (energia necessária para mudar a temperatura do material em 1°C), as aplicações de PCMs se mostram excelentes alternativas para estocar energia no componente construtivo das edificações. Em suma, o material ganha muito mais energia para mudar de fase do que para transmitir o calor, e quando está mudando de fase, se mantém a temperatura sem grande variação.

Esse processo tende a ocorrer durante o dia (período de ganho de calor). Já durante a noite, o PCM perde calor para o meio externo e volta ao seu estado sólido. Em outras palavras, utilizar PCMs em um componente construtivo confere inércia térmica sem necessitar de um elemento construtivo pesado (e.g. uma laje de concreto). Dessa forma, os PCMs podem auxiliar na suavização dos picos de temperatura sem necessitar de reforços estruturais na edificação.

Alguns trabalhos avaliaram o uso de PCMs no Brasil. Por exemplo, Almeida, Brandalise e Mizgier (2022) analisaram a implantação de PCMs (ponto e fusão de 22°C e 25°C) como método passivo em uma edificação de interesse social pré-fabricada naturalmente ventilada em Brasília (DF), Palmas (TO) e Santa Maria (RS), e concluíram que a utilização do PCM diminuiu a amplitude térmica da habitação e aumentou a inercia térmica da cobertura e das vedações. Pons e Stanescu (2017) compararam o uso de PCM (ponto e fusão de 26,5°C) integrados às paredes externas de edificações residenciais em oito climas brasileiros com outras estratégias de eficiência energética, e concluíram que é possível obter reduções do consumo de energia de até 90% se o PCM for integrado com outras estratégias.

Oliveira, Gonzales e Carvalho (2021) realizaram uma revisão sistemática sobre o uso de PCMs em climas quentes, e concluíram que a integração dessa tecnologia para reduzir o consumo de energia é promissora, especialmente em conjunto a outras estratégias passivas. Ressaltou-se a necessidade de encapsulamento do PCM nos materiais de construção, e a dificuldade de modelagem desse processo nas análises por simulação. A revisão de literatura de Oliveira, Lucarelli e Carlo (2022) reforça que o uso de materiais integrados com PCM apresentam um potencial elevado para reduzir o consumo de energia e aumentar as horas de conforto das edificações, mas destaca que o parâmetro mais importante para escolha do PCM é a condição climática.

Brito et al. (2017) testaram diferentes características que o PCM deve ter para ser empregado com eficácia em edificações no Brasil, a partir da simulação de envoltórias com diversos PCMs com pontos de fusão diferentes. Em suma, deve-se adotar um ponto de fusão (e, portanto, um PCM) otimizado de acordo com o clima da região. Para as zonas bioclimáticas de 1 a 5, um PCM com ponto de fusão em torno de 30°C apresentou os melhores resultados, enquanto para as zonas bioclimáticas 6 a 8, o PCM com ponto de fusão em torno de 34°C apresentou melhores resultados.

Diante do exposto, há uma oportunidade para avaliação da resiliência das edificações habitacionais ao se utilizar envoltórias com PCM. Quando se trata de resiliência, é importante evitar os picos de calor, pois durante o aumento excessivo e repentino da temperatura de um local (onda de calor), há risco à salubridade das pessoas. Uma vez que há a previsão de que as ondas de calor sejam cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas (IPCC *et al.*, 2021), a resiliência é um fator que deve ser levado em consideração. Com relação à carga térmica, o uso de ar-condicionado é uma saída para proporcionar conforto ambiental às pessoas. Porém, o consumo de energia com o ar-condicionado é elevado, além do custo do aparelho ser uma sobrecarga financeira para muitas famílias de baixa renda. No que tange à sustentabilidade, é importante evitar o consumo excessivo de energia e o uso de estratégias ativas, incentivando o emprego de estratégias passivas de eficiência energética e a conservação dos recursos naturais.

2. OBJETIVO

O objetivo geral do estudo é avaliar o potencial de utilizar uma cobertura com materiais de mudança de fase (PCM) para aumentar a resiliência de edificações habitacionais em diferentes climas brasileiros.

3. MÉTODO

A Figura 1 apresenta o fluxograma do método empregado no estudo. Em resumo, foi utilizado um modelo de simulação para testar quatro diferentes configurações de coberturas: um caso com telhas de fibrocimento simples; um caso com telha de fibrocimento, câmara de ar e laje de concreto; um caso com telha sanduíche de fibrocimento, isolamento com EPS de 4 cm; e um caso com telha sanduíche de fibrocimento, isolamento com EPS de 4 cm e uma camada de PCM. Essas configurações foram simuladas considerando-se baixa absortância e alta absortância (de acordo com a referência da NBR 15.575-1:2021), e para três climas no Brasil, considerando Curitiba como clima frio, São Paulo como clima ameno e São Luís como clima quente e úmido. As etapas do método são apresentadas na sequência.

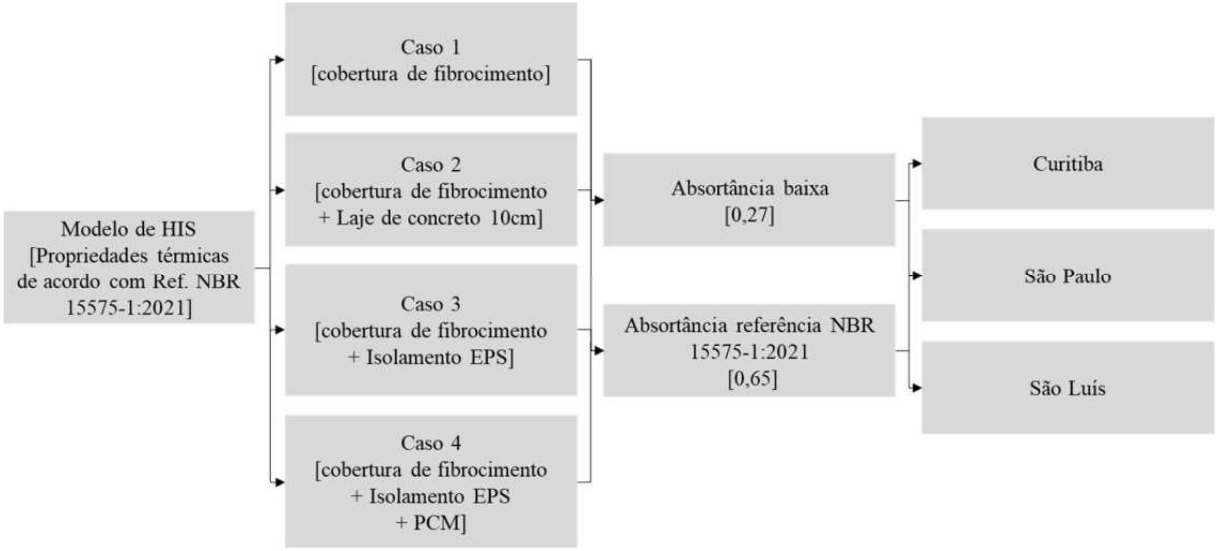


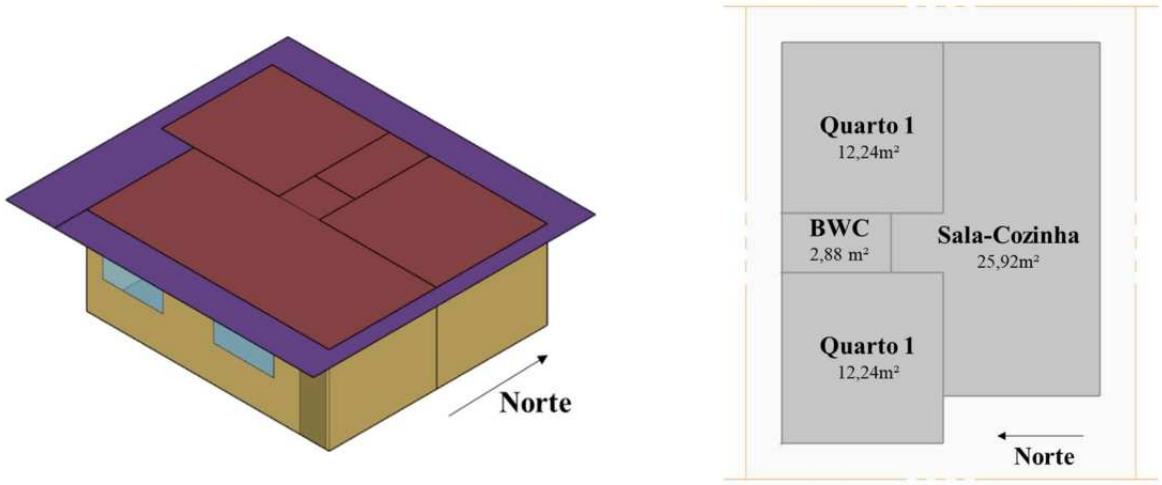
Figura 1 – Fluxograma do método. Fonte: Autores.

3.1. Modelo de simulação

Para condução do estudo, foi desenvolvido um modelo de simulação baseado no EnergyPlus, versão 22.2. Foi utilizado o método da norma NBR 15.575-1:2021 para composição do modelo de simulação. Ou seja, foram adotados valores de ocupação, cargas de iluminação e de equipamentos de acordo com a norma. As propriedades térmicas das paredes foram adotadas de acordo com o modelo de referência da norma (equivalente a uma parede de 10 cm com condutividade térmica de 1,75 W/m.K, calor específico de 1000 J/kgK, absortância solar de 0,58 e densidade de 2,200 kg/m³). As aberturas foram modeladas de acordo com o

tamanho de abertura por ambiente orientado pela norma para o modelo de referência. Para modelagem do contato com o solo, foi utilizado o objeto *GroundDomain:Slab*, com as propriedades do piso de acordo com a norma (equivalente a uma laje de 10 cm com condutividade térmica de 1,75 W/m.K, calor específico de 1000 J/kg.K, absortância solar de 0,65 e densidade de 2,200 kg/m³).

A Figura 2 apresenta uma ilustração do modelo de simulação empregado na análise.



(a) Perspectiva (b) Planta baixa

Figura 2 – Modelo de simulação. Fonte: Autores.

O modelo foi simulado em duas condições: ventilado naturalmente e condicionado artificialmente. O modelo ventilado naturalmente foi feito considerando aberturas com fator de ventilação de 45%. Permite-se abertura das janelas quando o ambiente estiver ocupado e respeitando-se os seguintes critérios:

- Temperatura interna superior a 19°C;
- Temperatura interna superior à temperatura externa.

O modelo condicionado artificialmente foi simulado considerando as janelas fechadas, e utilizando o objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*. O modelo possui área total construída de 53,28 m², e área total condicionada de 50,44m².

3.2. Configuração dos casos

A Tabela 1 apresenta a combinação de casos utilizados para condução do experimento.

Tabela 1 – Especificação dos casos.

Combinação	Absortância	Cobertura	U* (W/m².K)
Caso 1	Baixa [0,27]	Cobertura 1 [Fibrocimento]	6,223
Caso 2	Baixa [0,27]	Cobertura 2 [Fibrocimento + Câmara de ar + Laje de 10 cm]	2,337
Caso 3	Baixa [0,27]	Cobertura 3 [Fibrocimento +Isolamento EPS 4 cm]	1,332
Caso 4	Baixa [0,27]	Cobertura 4 [Fibrocimento + Isolamento EPS 4 cm + PCM]	1,287
Caso 5	Referência [0,65]	Cobertura 1 [Fibrocimento]	6,223
Caso 6	Referência [0,65]	Cobertura 2 [Fibrocimento + Câmara de ar + Laje de 10 cm]	2,337
Caso 7	Referência [0,65]	Cobertura 3 [Fibrocimento +Isolamento EPS 4 cm]	1,332
Caso 8	Referência [0,65]	Cobertura 4 [Fibrocimento + Isolamento EPS 4 cm + PCM 4 cm]	1,287

*U = Transmitância térmica (*U-Factor with Film* do *Output:Table:SummaryReports* do EnergyPlus).

Cada combinação foi executada os três climas diferentes, resultando em 24 cenários. A Tabela 2 apresenta as características climáticas e arquivos climáticos que foram utilizados para representar as três cidades.

Tabela 2 - Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados.

Descrição climática	Cidade	Zona Bioclimática NBR 15220-3	Classificação Köppen	Arquivo Climático
Temperado oceânico	Curitiba, PR	ZB 1	Cfb	BRA_PR_Curitiba.869330_TMYx.2007-2021
Subtropical úmido	São Paulo, SP	ZB 3	Cfa	BRA_SP_Sao.Paulo-Guarulhos.Intl.AP.830750_TMYx.2007-2021
Tropical com estação seca	São Luís, MA	ZB 8	Aw	BRA_MA_Sao.Luis-Machado.Intl.AP.822810_TMYx.2007-2021

O PCM utilizado nesta modelagem foi baseado em um modelo comercial de PCM obtido de um fabricante internacional[1]. A Figura 3 apresenta a caracterização do PCM, com sua curva de entalpia e características utilizadas para modelagem no EnergyPlus. Utilizou-se o objeto *SurfaceProperty:HeatTransferAlgorithm: Construction* para alterar o algoritmo de cálculo de transferência de calor da cobertura, e o objeto *MaterialProperty: PhaseChange* para especificar as propriedades do PCM. O ponto de fusão ocorre, aproximadamente, entre 20°C e 25°C.

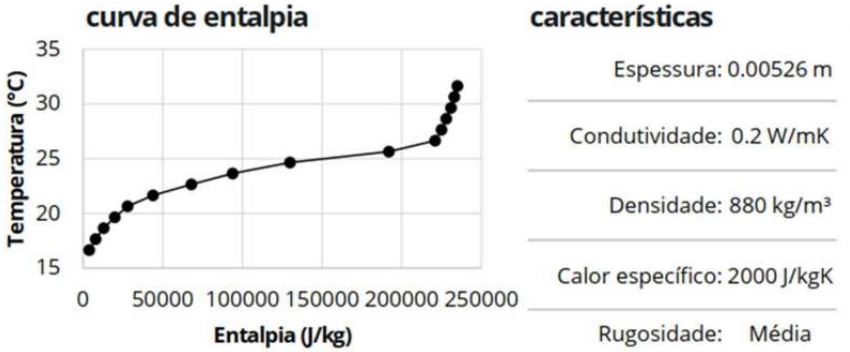


Figura 3 – Caracterização do PCM utilizado. Fonte: Autores.

3.3. Análises

A análise de dados foi realizada considerando os seguintes outputs das simulações:

- Carga térmica ideal anual de resfriamento da edificação (em kWh/m².ano);
- Carga térmica ideal anual de aquecimento da edificação (em kWh/m².ano);
- Temperatura operativa de cada zona térmica, para cada hora do ano (em °C);
- Temperatura superficial externa da cobertura, para cada hora do ano (em °C);
- Temperatura superficial interna da cobertura, para cada hora do ano (em °C).

Para analisar a carga térmica de cada caso, analisou-se a carga térmica total (soma da carga térmica de resfriamento e aquecimento) de todos os ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala) do modelo. Um gráfico de barras foi utilizado para evidenciar o valor de carga térmica total por metro quadrado condicionado, de cada caso.

A diferença da temperatura superficial interna e externa da cobertura foi analisada de acordo com a temperatura de pico do ano. Em todos os casos, o pico da temperatura superficial interna foi correspondente à mesma hora em que houve o pico da temperatura superficial externa. Assim, pode-se determinar, para cada caso, a diferença de temperatura que a cobertura consegue proporcionar, para cada caso.

Para analisar a temperatura operativa, calculou-se a temperatura operativa máxima do ano de cada ambiente de permanência prolongada. Além disso, para uma avaliação da Unidade Habitacional de forma mais completa, foram calculados dois indicadores indicados pelo Anexo 80 da Agência Internacional de Energia IEA EBC – *Annex 80 "Resilient cooling of buildings"*): a autonomia térmica (TA – *Thermal Autonomy*) e o grau-hora de desconforto interno (IDD – *Indoor Discomfort Degree*).

O indicador de autonomia térmica (TA) [%] é definido como a porcentagem de horas ocupadas durante um período, no qual a zona térmica excede um critério de aceitabilidade de conforto térmico utilizando apenas estratégias passivas. A fórmula para o cálculo de TA é apresentada na Equação 1.

[1] Disponível em: https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt

$$TA = \frac{\sum_{i=1}^{horas\ ocupadas} wf_i}{\sum_{i=1}^{horas\ ocupadas} h_i}, onde \begin{cases} wf_i = 1; T_{in} < T_{conf,sup} \\ wf_i = 0; T_{in} > T_{conf,sup} \end{cases}$$ Equação 1

Onde:
wf_i é o fator de ponderação [-];
T_{in} é a temperatura operativa interna [°C];
$T_{conf,sup}$ é o limite máximo estabelecido para temperatura operativa.

Já o grau-hora de desconforto interno (IDD) [°C] é um indicador de desconforto térmico integrado ao longo do tempo. Esse índice é obtido através da soma do *Indoor Overheating Degree* (IOhD) ao *Indoor Overcooling Degree* (IOcD), dividido pelo somatório do número de horas ocupadas de todos os ambientes de permanência prolongada da edificação. As fórmulas para o cálculo desses indicadores são apresentadas nas Equações 2, 3 e 4.

$$IDD = IOhD + IOcD$$ Equação 2

$$IOhD \equiv \frac{\sum_{z=1}^{Z} \sum_{i=1}^{N_{OCC}(z)} \left[\left(T_{in,z,i} - T_{conf,sup,z,i} \right) \times h_{i,z} \right]}{\sum_{z=1}^{Z} \sum_{i=1}^{N_{OCC}(z)} h_{i,z}}$$ Equação 3

$$IOcD \equiv \frac{\sum_{z=1}^{Z} \sum_{i=1}^{N_{OCC}(z)} \left[\left(T_{conf,inf,z,i} - T_{in,z,i} \right) \times h_{i,z} \right]}{\sum_{z=1}^{Z} \sum_{i=1}^{N_{OCC}(z)} h_{i,z}}$$ Equação 4

Onde:
Z é o número total de zonas térmicas [-];
z é o contador de zonas térmicas [-];
$N_{occ(z)}$ é o número total de horas ocupadas da zona térmica z [-];
i é o contator de horas [-];
$T_{in,z,i}$ é a temperatura operativa interna na zona térmica z na hora i [°C];
$T_{conf,sup,z,i}$ é o limite superior de conforto da zona térmica z na hora i [°C];
$T_{conf,inf,z,i}$ é o limite inferior de conforto da zona térmica z na hora i [°C].

Os limites superior e inferior de temperatura ($T_{conf,sup}$ e $T_{conf,inf}$, respectivamente) para o cálculo da TA e do IDD foram estabelecidos conforme os valores de temperatura operativa estabelecidos na NBR 15.575-1:2021 para as diferentes cidades (Tabela 3).

Tabela 3 – Limites de temperatura operativa para cada cidade considerada.

Cidade	**$T_{conf,sup}$ (°C)**	**$T_{conf,inf}$ (°C)**
Curitiba, PR	26	18
São Paulo, SP	26	18
São Luís, MA	30	20

4. RESULTADOS

4.1. Carga térmica

A Figura 4 apresenta os resultados de carga térmica total (resfriamento + aquecimento) para cada caso, com as barras esverdeadas destacando os casos com a aplicação de PCM. É possível notar que, no caso desse indicador, a solução com PCM não apresentou o resultado mais otimizado para nenhuma das cidades, apesar de apresentar um bom desempenho na maioria das comparações.

É importante destacar que a variação da absortância das soluções de cobertura causou variação na ordem das melhores soluções. Por exemplo, para as cidades de Curitiba e São Paulo, a solução de telha com laje (Caso 2) apresentou o menor valor com absortância 0,27, enquanto, ao se considerar a absortância de referência (0,65), a melhor solução se mostrou o Caso 3 (fibrocimento + isolante). No caso de São Paulo, observa-se também que, com baixas absortâncias, todas as alternativas de cobertura apresentaram resultados de carga

térmica semelhantes entre si. Já para São Luís, a menor carga térmica ocorreu ao se utilizar somente a cobertura de fibrocimento (Caso 1) em conjunto com o baixo valor de absortância (0,27). Para os casos com a absortância de referência, o Caso 3 (fibrocimento + isolante) apresentou o menor valor de carga térmica, seguido pelo Caso 4 com PCM e isolante. Esse comportamento está relacionado ao ganho por radiação solar, tornando mais importante o isolamento da cobertura em climas quentes quando a superfície apresenta maior absortância. Em geral, pode-se verificar que a redução da absortância teve um efeito mais pronunciando na redução da carga térmica do que a modificação da estrutura da cobertura para esse indicador.

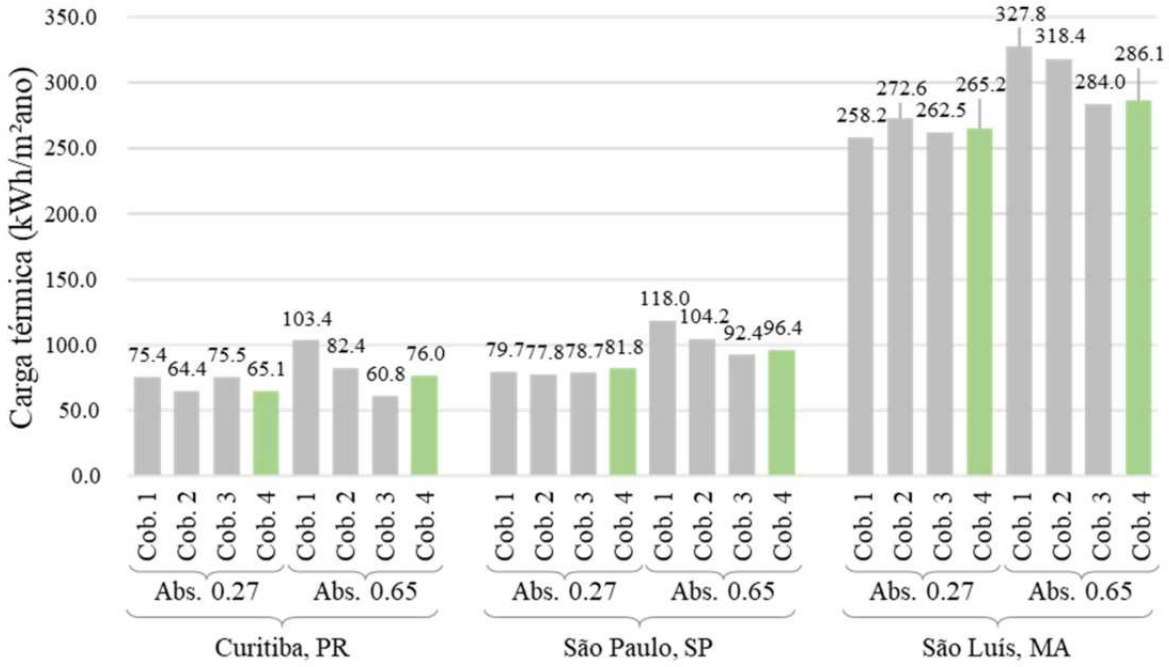


Figura 4 - Carga térmica total anual de cada caso.

É importante destacar que os resultados do indicador de carga térmica estão intimamente ligados aos padrões de ocupação, valorizando soluções que propiciem a perda de calor durante o período noturno para os dormitórios. Esses ambientes apresentam a área equivalente à sala e cozinha da edificação e, também, a maior quantidade de horas ocupadas ao longo do ano, aumentando sua relevância na carga térmica total.

4.2. Temperatura operativa, grau-hora de desconforto interno e autonomia térmica

Os resultados dos indicadores relacionados ao comportamento passivo da edificação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de temperatura operativa, IDD e autonomia térmica para os casos analisados.

α*	Caso	Curitiba			São Paulo			São Luís		
		T.A. (%)	I.D.D. (°C)	Temp. Op. Max. (°C)	T.A. (%)	I.D.D. (°C)	Temp. Op. Max. (°C)	T.A. (%)	I.D.D. (°C)	Temp. Op. Max. (°C)
0.27	Caso 1	65,6	0,21	32,2	67,5	0,64	33,8	59,5	1,94	36,0
	Caso 2	74,9	0,14	30,4	73,0	0,58	31,5	43,9	1,97	34,3
	Caso 3	73,8	0,19	30,9	71,3	0,51	32,8	46,7	1,60	35,0
	Caso 4	75,9	0,15	30,8	72,7	0,48	32,6	46,1	1,63	35,0
0.65	Caso 1	61,8	0,67	39,0	58,2	1,06	41,0	41,9	3,16	42,5
	Caso 2	72,4	0,35	32,3	63,6	0,81	33,7	28,4	2,69	35,8
	Caso 3	71,9	0,02	32,5	66,3	0,72	34,4	40,4	2,22	36,6
	Caso 4	73,8	0,02	32,3	67,2	0,71	34,2	40,0	2,26	36,1

* α = absortância solar. T.A. = Autonomia térmica. I.D.D. Grau-hora de desconforto interno. Temp. Op. Máx. = Temperatura operativa máxima.

Ao analisarmos o indicador de autonomia térmica, é possível notar que o Caso 4 (alternativa com PCM) obteve um desempenho melhor que os demais para os climas de São Paulo e Curitiba, proporcionando maior porcentagem de horas ocupadas com temperaturas no intervalo de 18°C a 26°C. Entretanto, os menores valores de temperatura operativa máxima para ambos os climas foram alcançados com a alternativa considerando o uso de laje (Caso 2). Em relação aos graus-hora de desconforto interno, todas as alternativas apresentaram baixos valores para São Paulo e Curitiba com os piores resultados sendo alcançados pelo Caso 1 (alternativa formada apenas pela telha fibrocimento).

Já para São Luís, o indicador de autonomia térmica indica o melhor desempenho do Caso 1 (telha de fibrocimento), principalmente no caso com baixa absortância. Esse resultado indica a influência dos dormitórios nesse indicador, por ser o ambiente da residência com maior quantidade de horas ocupadas, principalmente no período noturno. Dessa forma, alternativas de cobertura que proporcionem a perda de calor durante a noite apresentam bons resultados. O Caso 1 apresenta, por outro lado, os maiores valores de temperatura operativa máxima, com resultado acima de 40°C quando considerada a absortância de 0,65. O melhor resultado para a temperatura operativa máxima foi alcançado com o uso de laje (Caso 2), entretanto, foi o caso que apresentou o pior valor de autonomia térmica (43,9% com baixa absortância e somente 28,4% com a absortância de referência). Os Casos 3 (fibrocimento com isolante) e 4 (telha com uso de PCM) apresentaram valores bastante próximos entre si para a cidade de São Luís. Essas duas alternativas surgem como um desempenho interessante ao se considerar os indicadores de forma integrada, com valores mais reduzidos de graus-hora de desconforto interno, ou seja, considerando as horas ocupadas apresentam temperaturas internas mais próximas dos valores limites adotados de conforto (Tabela 3).

4.3. Temperatura Superficial Interna e Externa

O comportamento térmico dos componentes da cobertura pode ser verificado pelos resultados de temperatura superficial interna e externa apresentados na Figura 5.

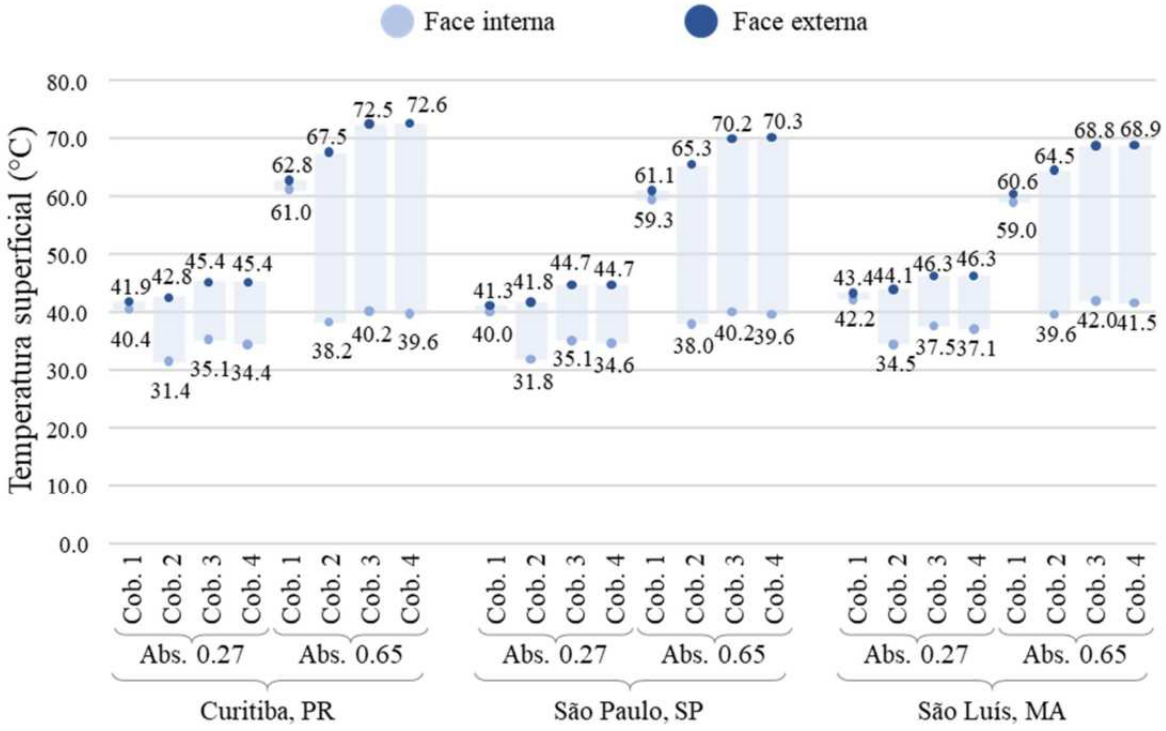


Figura 5 – Resultados de pico de temperatura superficial interna e externa da cobertura considerando diferentes casos.

O efeito e a importância da absortância solar ficam destacadas nessa análise, apresentando aproximadamente 20°C de diferença entre as temperaturas superficiais externas entre os casos com absortância baixa (0,27) e com a absortância de referência (0,65). Além disso, verifica-se que os picos das temperaturas superficiais para um mesmo caso não são muito diferentes entre os climas considerados, apesar de cada capital estar em uma zona bioclimática distinta.

Ao analisarmos as diferenças entre as temperaturas superficiais internas e externas, é possível verificar a baixa redução da temperatura interna da cobertura 1 (Caso 1 e 5) em comparações aos demais casos (abaixo de 2°C), devido à sua alta transmitância. As altas temperaturas superficiais internas da cobertura 1 (Caso 1 e

5) (somente a telha de fibrocimento) são parcialmente refletidas nos resultados de temperatura operativa máxima. Entretanto, o indicador de temperatura operativa não destaca o provável risco de desconforto por assimetria da temperatura radiante nos casos com absortância de referência (0,65), com aproximadamente 60°C de temperatura superficial interna para todas as localidades. Ressalta-se que a assimetria da temperatura radiante causada por tetos quentes é a mais problemática considerando-se indicadores de conforto térmico, uma vez que as pessoas são mais sensíveis às assimetrias causadas por tetos quentes do que às paredes quentes ou paredes e tetos frios (ABNT, 2021).

Quanto aos casos com a utilização de PCM, verifica-se que a redução da temperatura externa em relação à interna se assemelha às coberturas 2 e 3 (Caso 2, 3, 6 e 7), apresentando valores levemente maiores de diferença. Demonstrando que o material de mudança de fase escolhido não proporcionou uma grande modificação no comportamento da cobertura nessa situação de pico.

5. CONCLUSÕES

O trabalho buscou avaliar o desempenho térmico-energético de quatro alternativas de cobertura com duas absortâncias distintas, dentre elas uma opção utilizando material de mudança de fase. Para isso foi utilizada simulação computacional e a análise de quatro diferentes indicadores relacionados à edificação: carga térmica total, autonomia térmica, graus-hora de desconforto interno e temperatura operativa máxima.

Os resultados deixaram clara a importância do uso de indicadores complementares para proceder com a análise de alternativas de componentes para uma edificação, já que o uso de apenas um indicador pode mascarar comportamentos térmicos indesejados ou que necessitem de soluções projetuais complementares. Por exemplo, foi demonstrado o bom resultado termo-energético do uso da telha de fibrocimento como única camada de cobertura para o clima de São Luís. Entretanto, o indicador de temperatura operativa máxima e temperatura superficial interna demonstram maiores valores para essa alternativa, exigindo cautela no uso dessa solução.

Quanto ao desempenho das alternativas utilizando PCM, foi possível notar um melhor desempenho nos indicadores utilizados quando o clima se mostra mais ameno (caso de Curitiba e São Paulo). Os melhores resultados foram encontrados entre os indicadores relacionados ao desempenho passivo da edificação (autonomia térmica, temperatura operativa máxima e graus-hora de desconforto interno). Dessa forma, sugere-se aprofundar a análise do comportamento de diferentes componentes utilizando PCM nas edificações que fazem uso de ventilação natural. Além disso, ressalta-se que o estudo considerou apenas um material com temperatura de mudança de fase fixa para cada clima analisado. Conforme a literatura já demonstrou, espera-se que haja uma temperatura mais otimizada para diferentes características climáticas, exigindo pesquisas e avaliações de diferentes materiais para cada clima considerado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Fernando da Silva; BRANDALISE, Mariane Pinto; MIZGIER, Martin Ordenes. Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 13, p. e022027, 3 out. 2022.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 16401-2: Instalações de condicionamento de ar — Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Projeto de revisão da norma. 2021. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/210126%20P ROJETO%2016401-2.pdf

BRITO, Adriana Camargo De *et al.* Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 1, p. 125–145, mar. 2017.

ELETROBRAS. *Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial - PPH Brasil 2019*. 2019.

IPCC *et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Cambridge University Press*. 2021.

KING, Robin *et al. Confronting the Urban Housing Crisis in the Global South: Adequate, Secure, and Affordable Housing.* 2017. Disponível em: <www.citiesforall.org.>.

OLIVEIRA, Roberta Bastos De; GONZALES, Tomaz Silva; CARVALHO, Michele Tereza Marques. Uso de PCM para edificações em região de clima quente. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 12, p. e021001, 18 jan. 2021.

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

PONS, Vinicius; STANESCU, George. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o Brasil. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 8, n. 2, p. 127, 21 dez. 2017.

SANTAMOURIS, M.; VASILAKOPOULOU, K. Present and Future Energy Consumption of Buildings: Challenges and Opportunities towards Decarbonisation. *e-Prime*, p. 100002, out. 2021.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).