

INFLUÊNCIA DO USO DE PCMS EM EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIO NOS CLIMAS BRASILEIROS

INFLUENCE OF PCM APPLICATION IN AN OFFICE BUILDING IN BRAZILIAN CLIMATES

 **Matheus Menezes Oliveira**¹

 **Caio de Carvalho Lucarelli**²

 **Joyce Correna Carlo**³

¹ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, matheus.menezes@ufv.br

² Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, caio.lucarelli@ufv.br

³ Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, joycecarlo@ufv.br

Resumo

Entre outros benefícios, os Materiais de Mudança de Fase (PCMs) têm o potencial para promover o aumento das horas em conforto dos usuários em edificações com baixa inércia térmica. Para que isso ocorra, é necessário analisar as propriedades intrínsecas do PCM, o tipo de instalação e parâmetros climáticos. Pesquisas sobre parâmetros de incorporação de PCMs são comparativamente menos frequentes em climas tropicais do que em climas temperados e em altas latitudes. Logo, objetivo desse artigo é investigar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico dos usuários em uma edificação de escritório, naturalmente ventilada, em cinco cidades em três Zonas Bioclimáticas Brasileiras. A análise foi realizada por simulação térmica com o EnergyPlus, considerando diferentes orientações solares, tipos de ventilação, temperaturas de mudança de fase, camadas de instalação e espessuras de PCM. A incorporação do material proporcionou aumento entre 26% a 33% do conforto térmico adaptativo em relação ao caso base, sem PCM, com melhores casos nas cidades das Zonas Bioclimáticas 1 e 4. Os parâmetros de maior influência no aumento do conforto foram as temperaturas de mudança de fase entre 21°C e 28°C, instalação do PCM na camada mais interna da parede e sua adoção em climas com temperaturas médias externas próximas a 19°C e radiação de 4000 W/m².

Palavras-chave: PCM. EnergyPlus. inércia térmica. conforto térmico adaptativo. escritório.

Abstract

Among other benefits, Phase Change Materials (PCMs) can increase comfort hours in buildings with low thermal inertia. Thus, it is essential to analyze the PCM's intrinsic properties, installation factors, and overall climatic parameters. Research pieces concerning PCM incorporation parameters are comparatively less frequent in tropical climates than in temperate and high-latitude climates. This paper strives to investigate the influence of PCMs on user thermal comfort for a naturally ventilated office building in five cities in three Brazilian Bioclimatic Zones. The study employed EnergyPlus for thermal simulations assuming varying building orientations, selective ventilation, PCM's phase change temperatures, layer installation, and thicknesses. The material incorporation increased user thermal comfort by 26% to 33% compared to the base case, with no PCM, exhibiting the best results for Brazilian Bioclimatic Zones 1 and 4. The parameters with the greatest influence on the adaptive thermal comfort increase were the phase change temperatures between 21°C and 28°C, inner layer installation, mean outdoor temperatures close to 19°C, and solar irradiance above 4000 W/m².

Keywords: PCM, EnergyPlus, thermal inertia, adaptive thermal comfort, office.

Contribuição dos autores:

MMO: conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **CCL:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **JCC:** conceituação, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, supervisão, visualização, escrita - revisão e edição.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Arthur Santos Silva 

How to cite this article:

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



Introdução

Em situações em que se deseja aumentar a inércia térmica de ambientes que possuam restrições ao uso de materiais tradicionalmente associados à alta capacidade térmica, como tijolo, argila, concreto e rocha, tem-se como opção o uso dos Materiais de Mudança de Fase (em inglês *Phase Change Materials* - PCMs).

Os PCMs absorvem e liberam energia na forma de calor latente de acordo com a temperatura do ambiente ou das superfícies a partir de alterações do seu estado e propriedades físicas. Como comportamento ideal, os PCMs retêm energia conforme a temperatura do ar aumenta, o que resulta na mudança do seu estado físico de sólido para líquido proporcionando efeito de resfriamento. Quando a temperatura do ar cai, o material libera a energia previamente armazenada, muda da fase líquida para a sólida e proporciona efeito de aquecimento ao ambiente (Rathore; Shukla, 2019).

Assim, a incorporação de PCMs em edificações tem potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à amplitude do ar externo, aumentar o conforto térmico de usuários e a eficiência energética de edificações (Frigione; Littieri; Sarcinella, 2019; Faraj *et al.*, 2020). Além disso, se comparados aos materiais construtivos com alta capacidade térmica, os PCMs armazenam de 5 a 14 vezes mais energia por unidade de volume (Wahid *et al.*, 2017; Mengjie *et al.*, 2018).

Porém, a incorporação irrestrita de PCMs em edificações não garante os benefícios mencionados. Para seu correto desempenho, é necessário avaliar suas propriedades físicas, químicas, econômicas e ambientais (Cunha; Aguiar, 2020; Bai *et al.*, 2020). Também devem ser observadas as condições climáticas, a classificação do PCM, forma, local e características da sua incorporação nas edificações (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022).

Embora a maioria das publicações em PCMs investiguem a aplicação do material em climas subtropicais e frios, como em países na América do Norte, Europa, e leste da Ásia (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022), algumas pesquisas demonstraram o potencial dos PCMs na redução do consumo energético e melhoria do conforto térmico em climas quentes e parcialmente úmidos, como grande parte do Brasil. Autores como Marin *et al.* (2016), Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017), Pons e Stanescu (2017) e Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a) analisaram PCMs teóricos e disponíveis no mercado com simulações termoenergéticas e modelos matemáticos para os climas brasileiros, cujos trabalhos são apresentados a seguir.

Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017) e Pons e Stanescu (2017) indicaram melhorias do conforto dos usuários e redução do consumo energético para edificações nas Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBs) mais frias, com ênfase para as ZB1 e ZB5. Nas ZBs mais quentes, os autores recomendaram aplicação ponderada de PCMs, pois a inércia térmica adicional pode piorar as condições de conforto (Brito; Akutsu; Salles; Castro, 2017). Um ano antes, Marin *et al.* (2016), publicaram trabalho em que avaliaram a incorporação de PCMs em edificações para 25 cidades em todo o mundo, com destaque para Brasília, considerando a classificação climática de Köppen-Geiger.

De forma semelhante, Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a) avaliaram 57 cidades, incluindo Brasília, Fortaleza e Manaus. No caso de Marin *et al.* (2016), os autores concluíram que os benefícios da utilização de PCMs em climas tropicais foi insignificante, salvo Brasília, com redução de até 49% no consumo de energia para PCMs com temperatura de mudança de fase (TMF) de 25°C. No caso de Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a), a necessidade de avaliações individuais destacou-se pois, embora

Brasília e Singapura estejam no mesmo grupo climático (Grupo A – Equatorial), as duas cidades apresentaram economia de energia para resfriamento de 17% e 0,43% respectivamente. Ademais, Manaus apresentou aumento no consumo de energia de 9% para resfriamento, enquanto em Fortaleza atingiu economia de 0,23%, considerada pelos autores como limitada.

Como visto, as pesquisas que investigaram a utilização de PCMs para os climas brasileiros indicam tendência de melhor desempenho para regiões mais frias. Entretanto, foi encontrado um número reduzido de trabalhos na literatura nacional e internacional acerca do tema (Oliveira; Lucarelli; Carlo, 2022). As publicações encontradas avaliaram poucas variações construtivas, apresentaram condições de ventilação natural limitadas e poucas opções/variações na forma de incorporação do material.

Portanto, este artigo tem como objetivo investigar a influência da incorporação de PCMs no conforto térmico de usuários em escritórios para diferentes condições de contorno, ventilação e de instalação do PCM em fechamentos verticais leves. Logo, pretende-se cobrir as limitações anteriores ao integrar as características intervenientes do problema térmico com o PCM com enfoque na ventilação natural, modo de condicionamento pouco explorado nos estudos anteriores, principalmente os internacionais.

Materiais e métodos

Simulação termoenergética

Foi adotado como programa de simulação o EnergyPlus 9.3.0, que é a ferramenta mais difundida para investigação dos efeitos passivos de PCMs em edificações (Saffari; Gracia; Ushak; Cabeza, 2017b).

Para a simulação de PCMs, o EnergyPlus utiliza como método de cálculo as diferenças finitas (CondFD) que considera a relação entre condutividade térmica e temperaturas em regime transiente de trocas de calor (ENERGYPLUS, 2020). O cálculo das diferenças finitas discretiza os fechamentos do edifício, como paredes, pisos e tetos, em vários nós e os resolve numericamente por equações de transferência de calor. O método CondFD é acoplado a uma função entalpia-temperatura para simular a mudança de calor específico pela troca de fase. Em seguida, as entalpias em cada nó são atualizadas para cada interação e utilizadas para calcular o calor específico equivalente a cada passo de tempo (Marin *et al.*, 2016; ENERGYPLUS, 2020).

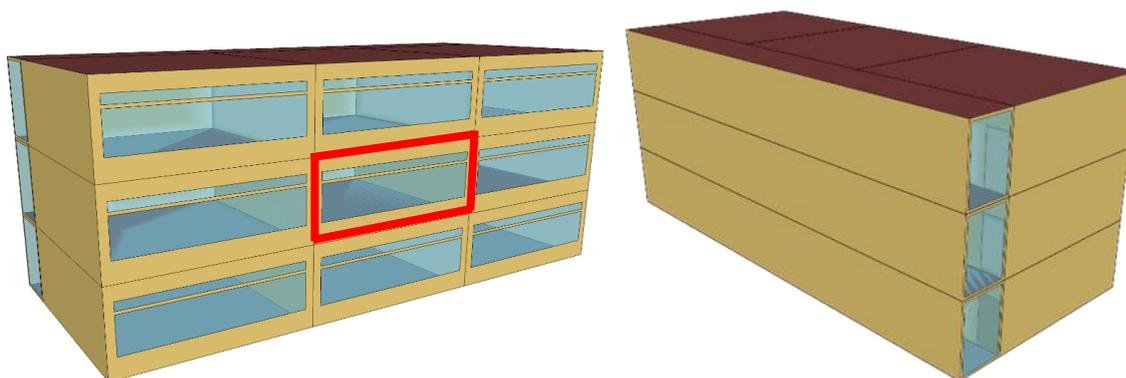
A validação do algoritmo foi realizada por Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012), que verificaram e validaram-no pelo EnergyPlus para a simulação de PCMs, a partir de uma abordagem semelhante à ASHRAE140 (ASHRAE, 2017). Com essa mesma abordagem, autores como Sovetova, Memon e Kim (2019), Sharma e Rai (2020) e Wang, Lu, Wu e Zhang (2020) utilizaram o EnergyPlus como único procedimento metodológico e citaram a qualidade do programa embasados em publicações dedicadas à calibração e validação de simulações com PCMs.

Portanto, o programa é considerado validado para simulações com PCM e já foi utilizado em pesquisas sobre a influência do material em diversos climas no mundo (Jangeldinov; Memon; Kim; Kabdrakhmanova, 2020; Ye *et al.*, 2022; Hlanze *et al.*, 2022) e em climas brasileiros (Marin *et al.*, 2016; Brito; Akutsu; Salles; Castro, 2017; Saffari; Gracia; Ushak; Cabeza, 2017b).

Geometria e materiais

O modelo teórico do edifício que representa o caso base (CB) foi baseado em (Oliveira; Carlo, 2020) e possui área de piso 49,7m², pé-direito de 2,90m e janelas com área de 10,3m² (50,3% da área da fachada). O modelo foi simulado para as quatro orientações (norte, sul, leste e oeste) e o ambiente de interesse não possui contato com o solo ou com a cobertura, com zonas adjacentes de mesmas dimensões e características, conforme apresentado na Figura 1 (a esquerda) e (b direita).

Figura 1 - (a - esquerda) Edificação simulada com ambiente analisado destacado em vermelho, fachada frontal; (b - direita) Edificação simulada, fachada posterior



Fonte: Adaptado de Oliveira e Carlo (2020).

As paredes são de *Drywall*, compostas por placa cimentícia, lã de rocha e gesso. O objetivo foi criar um ambiente com baixa capacidade térmica, conforme recomendado por Marin *et al.* (2016), Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017) e Solgi *et al.* (2019) para uso de PCMs. Paredes leves também contribuíram para analisar a influência da inércia térmica causada apenas pelos PCMs, reduzindo a influência dos demais componentes construtivos. As propriedades do CB estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros adotados na simulação

Parâmetros	Valores
Densidade de Carga Interna de Iluminação e Equipamentos (W/m ²)	28,62
Transmitância Térmica das Paredes (W/m ² K)	0,45
Capacidade Térmica das Paredes (kJ/m ² K)	33
Transmitância Térmica do Teto/Piso (W/m ² K)	3,73
Capacidade Térmica do Teto/Piso (kJ/m ² K)	220
Percentual de abertura em relação à fachada (%)	50,3
Fator Solar do Vidro	0,80
Absortância das Paredes (α)	0,50

Fonte: Oliveira (2023).

Condições de ventilação

O uso da ventilação natural em edificações, em especial o uso da ventilação natural noturna com PCM, segue as recomendações de Berardi, Soudian (2019), Liu *et al.* (2020) e Bai *et al.* (2020).

Como visto na Figura 1 (a), os ambientes possuem uma abertura externa composta por duas esquadrias na mesma zona. A abertura inferior foi configurada como uma esquadria de correr e a superior, uma veneziana. A esquadria inferior possui 8,40m², com 45% de abertura para ventilação e a superior 1,93m², com 90% de abertura para ventilação.

Foram avaliadas quatro condições de ventilação natural, conforme apresentado no Quadro 1.

Com objetivo de reduzir o número de casos simulados, a terceira e quarta opções de ventilação foram testadas apenas para os casos com maior percentual de horas em conforto (PHC).

PCMs

Os PCMs selecionados foram fabricados pela empresa alemã Rubitherm® Technologies GmbH (RUBITHERM, 2022) e utilizados também por Meng, Yu e Zhou (2017), Lee, Medina, Sun e Jin (2018) e Sharma e Rai (2020), que consideraram os resultados satisfatórios, com aumento do PHC e da eficiência energética das edificações estudadas.

Quadro 1 - Condições de Ventilação

	Temperatura de abertura	Temperatura de fechamento	Abertura da parte Inferior	Abertura da parte Superior
Condição 1	20°C	26°C	De acordo com a temperatura 24h	Fechada
Condição 2	20°C	26°C	De acordo com a temperatura 24h	Aberta entre 19h às 7h
Condição 3	24°C	28°C	De acordo com a temperatura 24h	Fechada
Condição 4	20°C	26°C	De acordo com a temperatura para 8h às 18h	Aberta entre 19h às 7h

Fonte: Oliveira (2023).

Para esse trabalho, foram escolhidos PCMs orgânicos da linha RT, RT21HC, RT22HC, RT25HC, RT28HC, RT35HC e RT44HC (Tabela 2). Dentro da linha RT, foram selecionados PCMs identificados como HC, por possuírem maior capacidade de armazenamento de calor latente e temperatura de mudança de fase (TMF) mais estável (RUBITHERM, 2022). Como são materiais reais com especificações de fabricante, os PCMs foram selecionados entre aqueles disponibilizados em catálogo cujas TMF foram indicadas por Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017) e Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a). Entretanto, por ser um material existente e com propriedades específicas, não foi possível ajustar todos os parâmetros recomendados pelos autores supracitados que, por sua vez, adotaram PCMs teóricos.

Tabela 2 - Propriedades dos PCMs

Nome do PCM	Intervalo de fusão e pico de temperatura (°C)	Intervalo de solidificação e pico de temperatura (°C)	Capacidade de armazenamento de calor (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg·K)	Condutividade térmica em ambas as fases (W/(m·K))	Densidade no estado sólido (kg/l)	Densidade no estado líquido (kg/l)
RT21HC	20-23 e 21	21-19 e 21	190	2	0,2	0,88	0,77
RT22HC	20-23 e 22	23-20 e 22	190	2	0,2	0,76	0,70
RT25HC	22-26 e 25	26-22 e 25	210	2	0,2	0,88	0,77
RT28HC	27-29 e 28	29-27 e 27	250	2	0,2	0,88	0,77
RT35HC	34-36 e 35	36-34 e 35	240	2	0,2	0,88	0,77
RT44HC	41-44 e 43	44-40 e 43	250	2	0,2	0,80	0,70

Fonte: Oliveira (2023).

O método de histerese do material foi adotado para a inserção das características específicas do PCM no EnergyPlus, conforme apresentado, discutido e recomendado por Al-Janabi e Kavgic (2019)

Cidades e climas avaliados

Foram selecionadas cinco cidades brasileiras para as simulações (Tabela 3). Os critérios de seleção advêm de resultados obtidos em pesquisas correlatas (Brito; Akutsu, Salles; Castro, 2017; Pons; Stanescu, 2017) e do objetivo de analisar Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBs) contrastantes: temperaturas medianas anuais predominantemente frias (ZB1), intermediárias (ZB4) e predominantemente quentes (ZB8), para a realidade brasileira. Nas zonas com duas cidades, foram consideradas latitudes as mais diferentes possíveis, uma vez que a incidência de radiação solar é uma das variáveis climáticas de

relevância para o correto funcionamento dos PCMs (Saffari; Gracia; Fernández; Cabeza, 2017a; Kim; Mae; Choe, Kiyota, 2017).

Tabela 3 - Características das cidades analisadas

Cidade (Unidade Federativa)	ZB	Latitude	Temperatura média anual (°C)	Radiação direta normal - Média anual (Wh/m ² /dia)	Umidade relativa média anual (%)	Velocidade média do vento (m/s)
Campos do Jordão (SP)	1	22° 74' S	15,3	3750	85,2	2,84
Bento Gonçalves (RS)		29° 17' S	17,1	4250	76,3	2,05
Brasília (DF)	4	15° 47' S	21,4	4750	65,8	2,46
Rio de Janeiro (RJ)	8	22° 54' S	23,6	4500	78,8	0,99
Belém (PA)		01° 27' S	27,1	3250	84,9	1,37

Fonte: Adaptado de ABNT (2005), INMET (2021) e Pereira *et al.* (2017).

A escolha das cinco cidades pretende analisar as condições de contorno, de ventilação e de instalação dos PCMs frente a diferentes condições climáticas. As cidades da ZB1 e 4 foram escolhidas para verificar a tendência de melhor desempenho dos PCMs no agrupamento de climas mais frios identificado por Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017). Brasília foi escolhida como única cidade da ZB4 por apresentar resultados positivos nas pesquisas de Marin *et al.* (2016) e Saffari, Graci, Fernández e Cabeza (2017a), e por apresentar condições climáticas intermediárias entre a ZB1 e ZB8.

Foram escolhidas duas cidades da ZB8 para investigar os resultados já apresentados em estudos anteriores (Brito; Akutsu; Salles; Castro, 2017; Saffari; Gracia; Fernández; Cabeza, 2017a). Além disso, a ZB8 ocupa 57,8% do território brasileiro e abrange diversas latitudes. Essa variação de latitudes não foi um parâmetro explorado concomitantemente nas pesquisas que investigaram PCMs para o Brasil. A maior parte delas focadas em cidades da ZB8 próximas ao equador, cuja altura solar é elevada nas fachadas norte e sul.

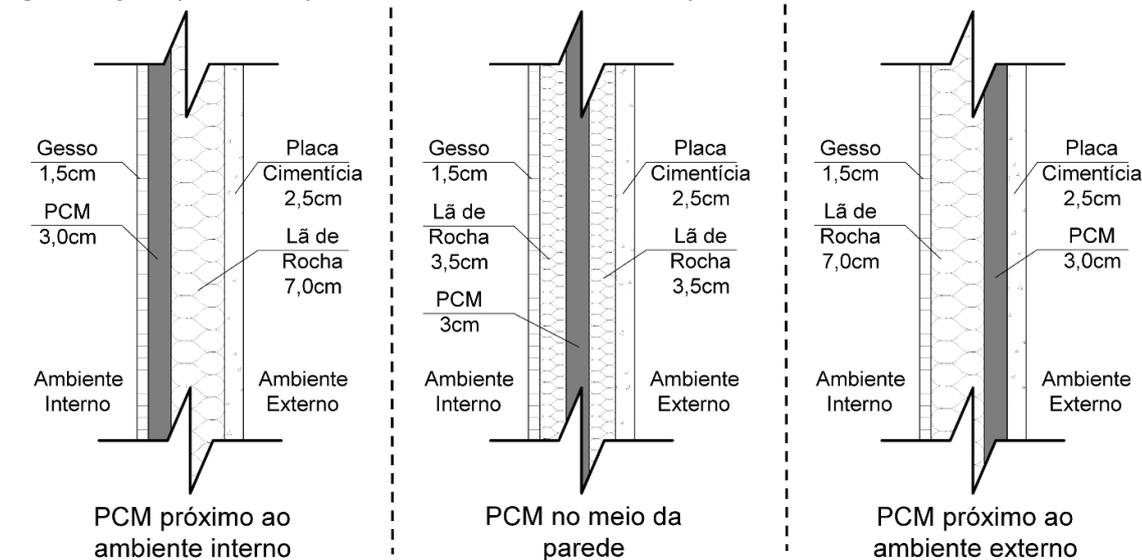
Instalação do PCM

Não foi encontrado um consenso na bibliografia para o melhor posicionamento do PCM em sistemas construtivos (Kishore *et al.*, 2021) assim como não foi encontrado consenso para a melhor espessura da camada do material. Logo, foram avaliadas três condições distintas de posicionamento do PCM com instalação do material no interior das paredes internas e externas de todos os ambientes: na camada mais próxima ao ambiente interno; instalação em camada intermediária; e instalação na camada mais próxima ao ambiente externo (Figura 2).

Em relação à espessura da camada de PCM, foram testados 3cm e 6cm. A espessura de 3cm advém de valores próximos ao adotado pela literatura nacional internacional, como investigado por Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017), Marin *et al.* (2016) e Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a).

Embora a espessura de 6cm possa exceder o investigado nas publicações mencionadas anteriormente, ela foi selecionada para estabelecer comparação com Pons e Stanescu (2017), que utilizaram espessuras entre 2,5cm e 35cm. A espessura de 6cm está disponível internacionalmente em formato de placas e chapas, e a investigação de sua viabilidade inicia-se como potencial técnico do produto, razão pela qual foi incluído como parâmetro.

Figura 2 - Seção esquemática das paredes, com camada de PCM, nesse exemplo com 3cm



Fonte: Oliveira (2023).

Dados de saída e análise dos resultados

As simulações foram executadas para as 8.760 horas do ano. Foram solicitados como dados de saída a temperatura externa e interna do ar, a temperatura operativa interna e fluxo do ar, variáveis necessárias para determinar o PHC de acordo com a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2020). Embora simulado para as 24h do dia, os índices de conforto térmico adaptativo foram avaliados apenas das 8h às 18h, horário compatível com a maioria das atividades de escritório. A combinação dos parâmetros discutidos ao longo dos materiais e métodos resultou em 1.440 casos simulados com PCM e 20 CBs sem PCM.

Resultados

A Tabela A apresenta o aumento ou decréscimo de horas em conforto, obtidas pela subtração do percentual de horas em conforto (PHC) nos casos simulados pelo PHC dos casos base (CBs). Portanto, valores positivos representam aumento do conforto devido ao uso de PCMs, enquanto porcentagens negativas representam redução.

Na Tabela A, os resultados positivos estão em escala de verde. Quando maior o aumento do conforto, mais escuro o verde. De forma semelhante, os resultados negativos estão em escala de vermelho. Quanto maior a redução no conforto, mais escuro o vermelho. Os casos com valores de 0% em vermelho ou em verde ocorrem devido à redução do número de casas decimais.

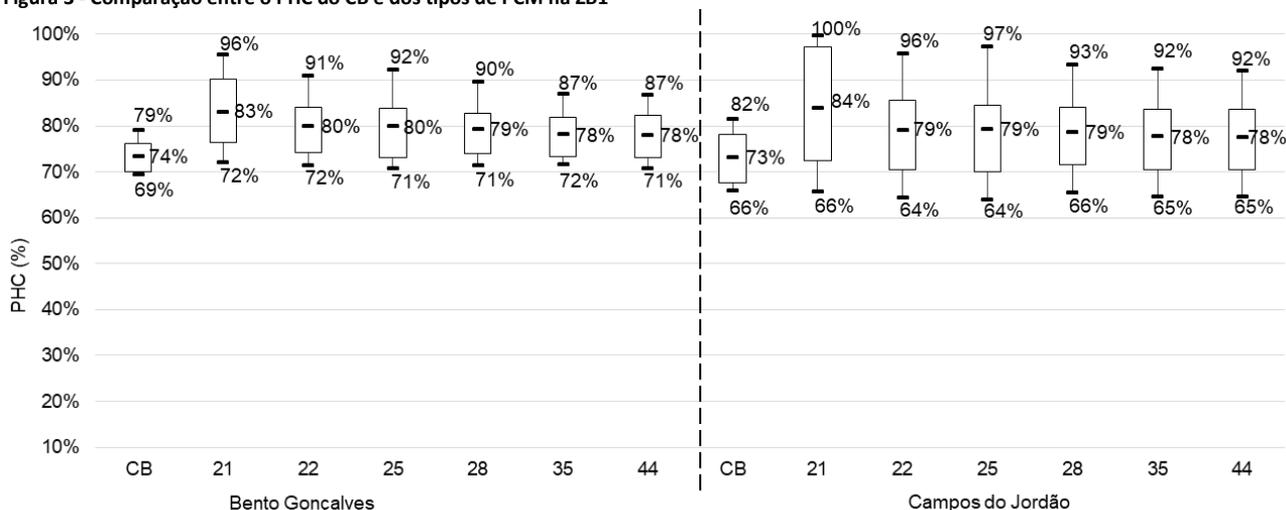
Tipos de PCMs em relação as Zonas Bioclimáticas

A Figura 3 mostra que a incorporação dos PCM testados apresentou condições de conforto melhores do que no CB para a Zona Bioclimática (ZB) 1. O PCM 21 apresentou os maiores aumentos no PHC. Para os melhores casos, o uso desse PCM elevou o PHC a até 19%. Em seguida, os PCMs 22 e 25 apresentaram o segundo e terceiro PHC máximos obtidos, respectivamente. Entretanto, se observados os PHCs entre os quartis e os mínimos, não houve diferenças desses PCMs em relação aos demais.

Em gráficos boxplot, como apresentado na Figura 3, os valores máximos encontrados estão apresentados na parte superior. Como exemplo, o valor de 79% para Bento Gonçalves no CB. O valor intermediário, que divide o retângulo em dois, representa a

mediana, para o mesmo exemplo, 74%. O valor mínimo encontrado é o mais abaixo no gráfico, representado por 69%.

Figura 3 - Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM na ZB1



Fonte: Oliveira (2023).

O primeiro quartil, representado pela parte inferior do retângulo, é o valor que divide 25% dos dados inferiores. Isso significa que 25% dos dados estão abaixo deste valor e 75% estão acima dele. Para o mesmo exemplo anterior, Bento Gonçalves no CB, 70%. O terceiro quartil é o valor que divide os 75% inferiores dos dados. Assim, 75% dos dados estão abaixo e 25% estão acima dele. No exemplo, o valor superior do retângulo, é de 76%.

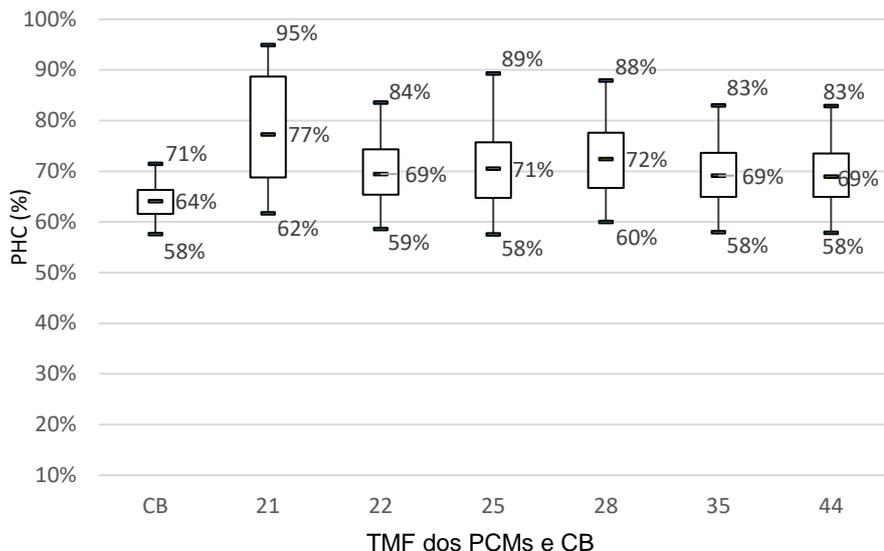
Além disso, foi possível observar poucas diferenças entre os PCMs 35 e 44, o que sugere que as temperaturas de mudança de fase (TMF) mais altas testadas não proporcionam melhorias progressivas no PHC. Essa situação era esperada para a ZB1 devido à predominância de temperaturas externas do ar abaixo da TMF dos PCMs 35 e 44.

Destaca-se que, em alguns casos de Campos do Jordão, a incorporação de PCMs piorou o PHC devido ao posicionamento da camada em que o PCM foi instalado. Essa situação ocorreu para o PCM no meio ou próximo à face externa da parede (Figura 3 e Tabela A). Essa redução do conforto em relação ao CB para Campos do Jordão advém no incorreto funcionamento dos PCMs, quando instalados em camadas que não possibilitam que o material atue como um indutor do aumento da inercia térmica dos ambientes internos.

A cidade de Bento Gonçalves e Campos do Jordão apresentaram aumento médio das PHCs de 6% em relação ao CB, embora as diferenças cheguem a 10% para o PCM 21, orientado a norte e instalado próximo ao ambiente interno. Essas diferenças em relação aos parâmetros de instalação mencionados, evidencia novamente a sensibilidade do PCM frente aos parâmetros de instalação e condições de contorno, conforme já observado por Safari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a).

Em Brasília (ZB4), todos os PCMs testados aumentaram o PHC em relação ao CB (Figura 4 e Tabela A). Destaca-se que o maior PHC entre todas as simulações foi obtido nesta cidade, 95% das horas em conforto e melhoria em relação ao CB de 33% com o PCM 21, para espessuras de 3cm e 6cm, instalado internamente, orientado a norte e com ventilação seletiva noturna.

Figura 4 - Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para Brasília (ZB4)

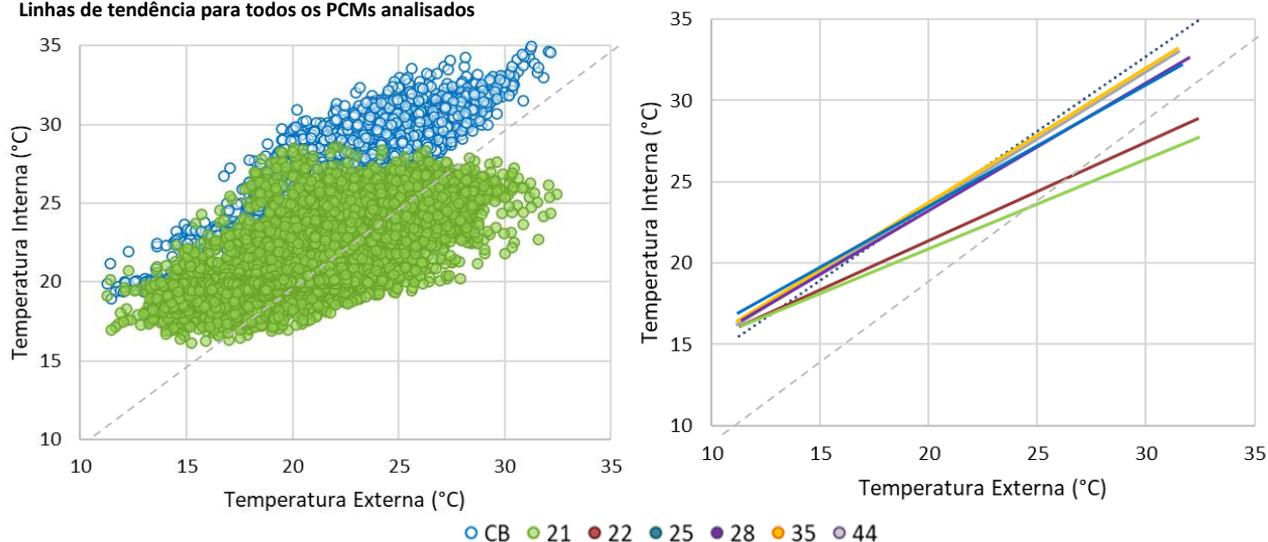


Fonte: Oliveira (2023).

Além do PCM 21, o 25 e 28 apresentaram resultados considerados satisfatórios no contexto dessa pesquisa, com aumento da mediana de 7% e 8% em relação ao CB e com aumento das máximas de 18% e 17% respectivamente (Figura 4 e Tabela A). Os demais tipos de PCM apresentaram desempenho equivalentes.

A Figura 5 mostra uma síntese dos casos, sendo a Figura 5 (a) a dispersão da nuvem para os casos extremos (melhor e pior) e a 5 (b) a linha de tendência da dispersão de todos os casos. A Figura 5 (b) descreve a tendência decorrente das temperaturas horárias internas do ar do CB e dos ambientes com os seis PCMs em função da temperatura do ar externo. Nela, é possível observar que as temperaturas internas no intervalo entre 20° C e 33° C são mais baixas em relação às temperaturas externas para os PCMs com melhor desempenho. O PCM 21 foi destacado juntamente com o caso-base (CB) na Figura 5 (a) por ter aumentado a temperatura interna inferior 20° C e reduzido aquelas superiores a 25° C.

Figura 5 - Relação entre Temperatura interna e externa do ambiente com PCM para Brasília (a) Distribuição dos Pontos do CB e PCM 21 e (b) Linhas de tendência para todos os PCMs analisados

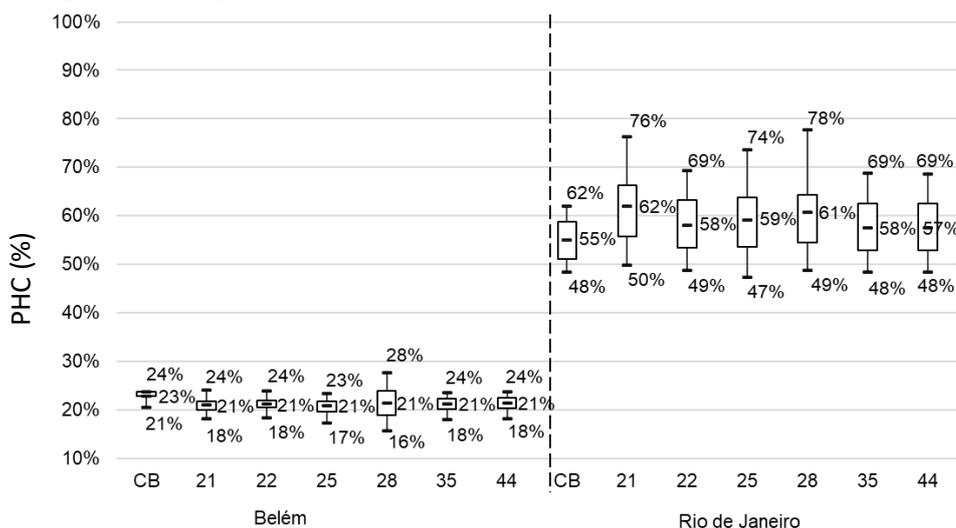


Legenda: R² do: CB - 0,835; 21 - 0,541; 22 - 0,524; 25 - 0,815; 28 - 0,861; 35 - 0,852; 44 - 0,524. A linha pontilhada na Figura 5 (b) representa o CB. Fonte: os autores.

Após o PCM 21, o PCM 22 apresentou as temperaturas mais baixas e são os únicos casos que resultam em temperaturas internas mais baixas que as externas. Todos os outros casos, inclusive o CB, apresentou uma temperatura interna mais alta que as externas.

Em relação à ZB8 (Figura 6), foram encontrados resultados diferentes entre as cidades analisadas. Apesar de se localizarem na mesma ZB, Belém e Rio de Janeiro apresentam condições climáticas bastante distintas, chegando a diferenças de temperatura média anual (TMA) de 5°C, como mostrado na Tabela 3.

Figura 6 - Comparação entre o PHC do CB e dos tipos de PCM para ZB8



Fonte: Oliveira (2023).

Para Belém, todos os PCMs adotados apresentaram piora no conforto, com mediana dos casos simulados 2% menor se comparada ao CB. Em Belém também foi encontrado o pior PHC, -8% para o PCM 28, instalado internamente e orientado a sul. Ou seja, há aumento de desconforto devido à incorporação do PCM.

Embora apresente o pior desempenho, o PCM 28 foi responsável pelo maior PHC para a cidade, 4% em relação ao CB para o PCM instalado na camada intermediária da parede, com 6cm de espessura e ventilação seletiva noturna. Porém, o valor positivo não está na escala dos demais valores máximos encontrados, próximos a 30% para Brasília e Campos do Jordão. Além disso, valores de PHC acima do CB para Belém só foram encontrados em 8% dos casos simulados para essa cidade, o que denota que o uso de PCM não é recomendado para esse clima.

No Rio de Janeiro, os PCMs 21 e 28 apresentaram os melhores resultados com mediana de 62% e 61% (CB com mediana de 55%) e máximos de 76% e 78% (para o CB, 62%). O PCM 25 apresentou resultado melhor que os PCMs 22, 35 e 44 com diferença entre medianas e quartis de aproximadamente 1%, considerado irrelevante no contexto desta pesquisa (Figura 6 e Tabela A).

Destaca-se que os PCMs 35 e 44 não apresentaram melhorias significativas no PHC para a ZB8. Essa situação não era esperada pois, diferentemente da ZB1, as cidades da ZB8 apresentam temperaturas externas mais altas em que TMF elevadas, principalmente nas horas mais quentes do dia durante o verão, ofereceriam teoricamente, maiores atrasos térmicos nos ambientes para PCMs com TMF mais altas.

De forma geral, os benefícios obtidos estão de acordo com as experimentações dos autores que utilizaram PCMs da marca Rubitherm®. Logo, pode-se afirmar que parte dos PCMs testados possui potencial para aumentar o PHC em parte dos climas

brasileiros. Os resultados confirmam as ressalvas de Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017) para o uso de PCMs em ZBs quentes. Além disso, é possível traçar um paralelo entre a piora no PHC obtido para Belém (ZB8), com aumento do consumo energético obtido em Manaus (ZB8) por Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a).

Se comparadas as recomendações de Brito, Akutsu, Salles e Castro (2017) de uso de PCMs com TMF próximos a 30°C para ZB1 a ZB5 e próximos de 34°C para ZB6 a ZB8, é possível observar que as TMF mais baixas geraram melhor desempenho. A saber que os maiores PHC obtidos em relação ao CB foram de casos com TMF 21 em todos os climas, e ainda 22 e 25 em Campos do Jordão (ZB1), 25 e 28 em Brasília (ZB4), e 28 no Rio de Janeiro (ZB8). Além disso, os PCMs de maior TMF, 35 e 44, contribuíram pouco para a alteração do PHC em todas as cidades analisadas.

A diferença entre a recomendação da literatura nacional e os resultados obtidos nesse trabalho pode ser explicada pelas demais propriedades de cada PCM, tais como a capacidade de armazenamento de calor, densidade do material e TMF, que estão de acordo com um produto industrializado e não condizem com os valores teóricos e potencialmente ótimos testados pelos autores.

Os valores de TMF que apresentaram melhor desempenho são próximos aos de Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a), tanto para climas com demanda predominante de aquecimento (recomendado pelos autores entre 18°C a 22°C), quanto para climas que requeiram resfriamento (recomendado pelos autores entre 24°C a 28°C). Os resultados encontrados também corroboram com estes autores, que apontaram existir resposta diferente do material para cidades pertencentes ao mesmo grupo/classificação climática.

Parâmetros construtivos e de instalação do PCM

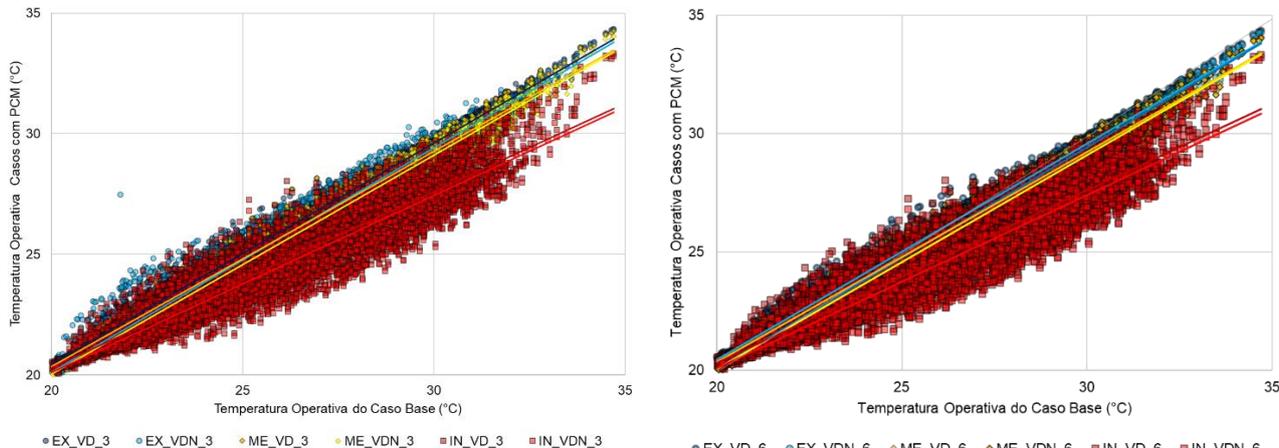
Se avaliadas apenas a orientações solares, os casos com a abertura envidraçada orientada a norte foram os que apresentaram maior PHC, com um aumento médio de 4,7% em comparação ao CB. A fachada sul foi a que apresentou os piores resultados, com aumento médio de 4%. As maiores diferenças entre norte e sul foram encontradas para Campos do Jordão e Brasília, quando simuladas com PCM 21, 10% e 12%, respectivamente. A combinação entre maiores médias anuais de radiação direta normal e a fachada com maior tempo de incidência de insolação, proporcionaram os melhores casos. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a), que ao avaliarem apenas a radiação solar, obtiveram melhores resultados para Brasília (266 W/m²/dia, com 17% de economia de energia) em comparação com Singapura (88 W/m²/dia com 0,43% de economia de energia).

A Figura 7 foi elaborada a partir do melhor caso para Brasília, com PCM 21 e orientado a norte, a fim de avaliar os demais parâmetros: a influência da camada de instalação, da espessura e do tipo de ventilação no PHC.

É possível observar que os resultados estão coesos com as linhas de tendência que os descrevem, visto que os coeficientes de determinação (R^2) são todos superiores a 0,92, chegando a mais de 0,99 em alguns casos. Os valores encontrados são semelhantes aos de Al-Waeli *et al.* (2020) que consideraram resultados de R^2 acima de 0,874 como representantes e coesos. Assim, a partir da temperatura operativa de 21°C, todas as linhas de tendência inclinam-se para a área abaixo da linha média de temperatura. No entanto, elas se diferenciam em três grupos determinados pela camada de instalação do PCM. As linhas de tendências vermelhas, que representam casos de instalação de PCM na camada interna, distanciam-se significativamente das demais a partir de uma temperatura operativa interna de 21°C. É possível também observar a pequena distância

entre as linhas de tendência azuis (PCM instalado na camada externa) e amarelas (PCM instalado na camada intermediária da parede).

Figura 7 - Comparação entre camada de instalação e condição de ventilação e espessura. Espessuras 3cm (a - esquerda) e 6cm (b - direita)



Legenda: EX – PCM instalado na camada próxima ao ambiente externo; ME – PCM instalado na camada do meio; IN – PCM instalado na camada próxima ao ambiente interno; VD – Ventilação seletiva diurna; VDN – Ventilação seletiva diurna e noturna. R² para 3cm: EX/VD – 0,992; EX/VDN – 0,981; ME/VD -0,988; ME/VDN – 0,987; IN/VD - 0,931; IN/VDN – 0,922. R² para 6cm: EX/VD – 0,993; EX/VDN – 0,995; ME/VD -0,989; ME/VDN – 0,986; IN/VD - 0,924; IN/VDN – 0,932.

Fonte: Oliveira (2023).

A diferença entre a ventilação é sutil, evidenciada pelas linhas de tendência quase paralelas nos gráficos. Por fim, também é possível observar a semelhança entre as Figura 7 à esquerda e à direita, o que indica a baixa influência da espessura da camada do PCM no PHC.

Em relação às camadas de instalação do PCM avaliadas (na superfície interna, no meio e na superfície externa da parede), o melhor caso ocorreu em Campos do Jordão, com aumento do PHC de 28% se comparado com o mesmo caso, porém com o PCM instalado próximo à camada externa.

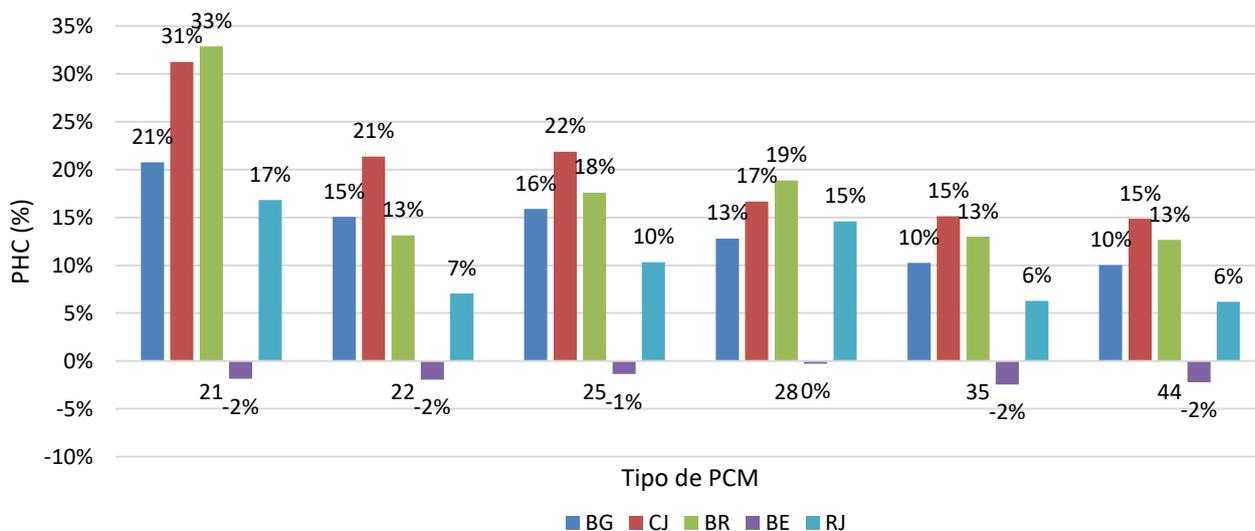
Para quantificar os resultados, as cidades de Campos do Jordão, Bento Gonçalves, Brasília e Rio de Janeiro apresentaram média de aumento do PHC de 12%, 14%, 15% e 9% para o PCM instalado próximo ao ambiente interno, enquanto os demais casos não ultrapassaram 4% independentemente do clima (4%, 3%, 4% e 2% para o PCM instalado no meio e 3%, 1%, 2% e 1% para PCM instalado próximo ao meio externo, respectivamente). Logo, como os PCMs instalados no meio da parede ou externos apresentam resultados próximos, de pequeno aumento no PHC, é possível afirmar que o desempenho é melhor com PCMs instalados na camada mais próxima ao ambiente interno. Esse resultado é semelhante ao obtido por Jin *et al.* (2017), com melhor desempenho do PCM na camada mais próxima ao ambiente interno.

A exceção foi em Belém, onde foram observadas medianas comparadas ao CB de -3% para PCM interno, -1% para o meio e -1% para externo, ou seja, o desempenho piorou de fato. Ainda, em 8% dos casos simulados em Belém, houve aumento do PHC quando o PCM foi instalado no meio da parede ou próximo ao ambiente externo. Deve-se lembrar que a insolação em Belém é de elevada altura em relação aos demais casos, com pouca diferença entre inverno e verão, ou entre norte e sul. A radiação direta normal é também mais baixa em relação às demais cidades (Tabela 3). Logo, quando o material foi instalado nas camadas que apresentam baixa influência no ambiente interno (como na camada intermediária e próxima ao ambiente externo), seu desempenho foi melhor, com comportamento semelhante ao de um isolante térmico.

As diferenças dos PHC entre as duas espessuras dos PCM (3cm e 6cm) apresentados na Figura 7 (a esquerda e a direita) para Brasília se repetiram para os demais climas, tendo alcançado uma média inferior a 2% entre as duas espessuras se consideradas todas as cidades. Portanto, dobrar a espessura do PCM e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de armazenamento de calor latente não garantiu um aumento linear do PHC. Além disso, em 64% dos casos simulados, foi obtido maior PHC para espessura 3cm. Para maiores espessuras, o material não realiza as trocas de maneira homogênea e completa. Além disso, em situações em que o PCM não consegue realizar as trocas de fase completamente o material tende a se comportar apenas como isolante térmico, ou apenas como um material de armazenamento de calor sensível. Os resultados encontrados são semelhantes ao de Sovetova, Memon e Kim (2019) e Al-Yasiri e Szabó (2021), que obtiveram resultados insignificantes ou piores no desempenho térmico para camadas de PCMs acima de 2cm.

Ao analisar os resultados obtidos com as duas condições de ventilação (Quadro 1) a segunda apresentou aumento do PHC em 90% dos casos (Figura 8 e Tabela A). Entretanto, as diferenças foram baixas, em média 1,5%, com a maior de 7% em Campos do Jordão com o PCM 22 instalado internamente. Os resultados encontrados são semelhantes aos de Berardi e Soudian (2019), Liu et al. (2020) e Bai et al. (2020) que obtiveram melhorias no desempenho combinando PCMs e ventilação noturna. De fato, o resfriamento proporcionado pelas mais baixas temperaturas que ocorrem à noite melhorou o desempenho, mesmo no inverno.

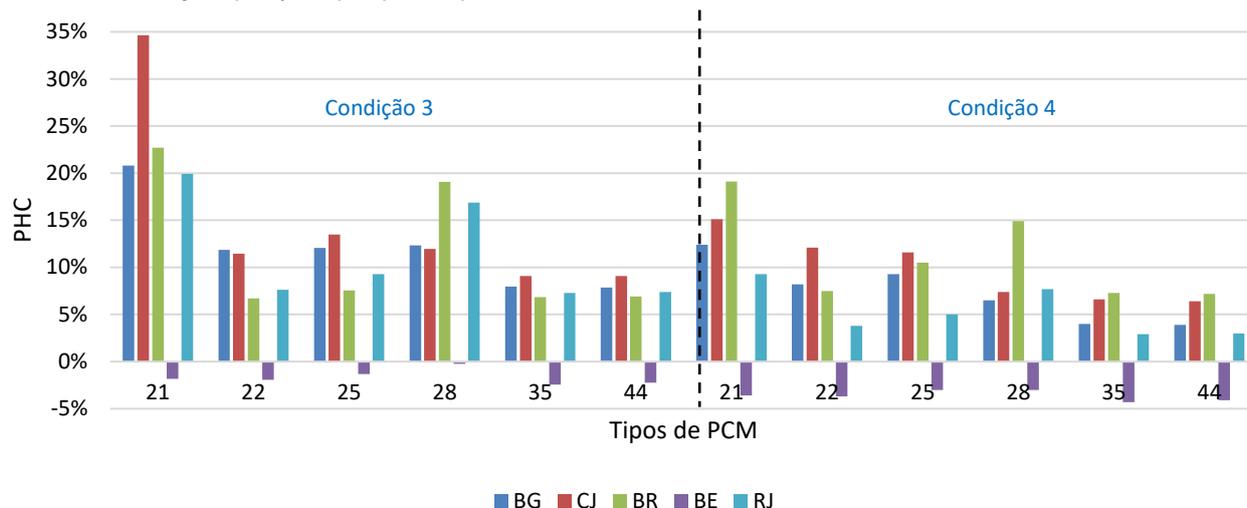
Figura 8 - PHC da ventilação seletiva com ventilação noturna



Fonte: os autores.

As outras condições de ventilação, condição três (abertura a partir de 24°C) e quatro (ventilação apenas noturna) foram testadas apenas o PCM instalado próximo ao ambiente interno e orientado a norte, em todos os climas e para todos os PCMs. Se comparados à condição dois (Figura 8), os resultados foram piores do que os inicialmente testados (Figura 9). A exceção foi para Campos do Jordão, cuja abertura das janelas a partir de 24°C aumentou o PHC para o PCM 21. Esse aumento se deve a diferenças sazonais de temperatura e radiação, com visualização dificultada em uma análise que considera apenas resultados médios anuais.

Figura 9 - PHC da condição 3 (à esquerda) a 4 (à direita): Referente à Tabela 2



Fonte: os autores.

Dessa forma, é possível afirmar que as trocas de ar proporcionadas com a ventilação seletiva ao longo do dia e noite foram suficientes para descarregar a energia térmica armazenada nos PCMs, com exceção de Belém. Logo, embora o uso da ventilação seletiva noturna (condição dois) tenha aumentado o PHC, no contexto avaliado, as diferentes configurações de ventilação tiveram baixa influência no PHC se comparadas aos parâmetros analisados anteriormente, como tipo de PCM, camada de instalação e orientação solar.

Influência dos parâmetros climáticos

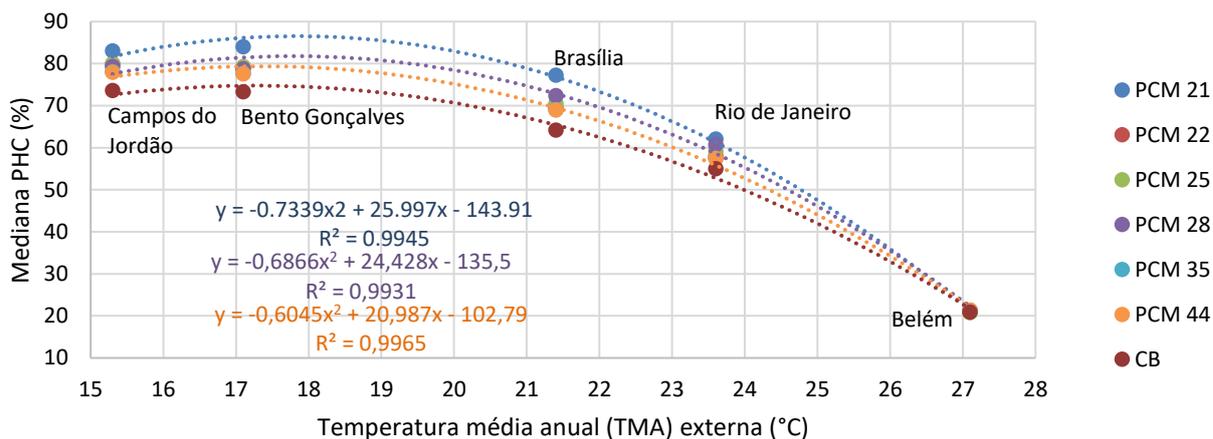
Nessa etapa de análise, quatro parâmetros climáticos e sua influência no desempenho dos PCMs foram avaliados. Para isso, foram selecionadas a temperatura externa do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, previamente apresentadas na Tabela 3. Os parâmetros foram escolhidos por recomendação de Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a), que as apontaram como uma possível justificativa para resultados diferentes em cidades classificadas no mesmo clima.

As Figuras 10 e 11 foram elaboradas com os valores medianos de cada análise BoxPlot apresentados nas Figura 3, 4 e 6 e levaram em consideração todas as simulações realizadas nesse trabalho. Cada coluna de pontos indica o parâmetro climático de uma das cidades analisadas, sendo que a cor laranja identifica o CB. As três equações descrevem as curvas dos PCMs 21, 28 e 44, ou os limites superior, mediano e inferior, respectivamente.

A Figura 10 mostra a relação entre a TMA do ar externo e o PHC por tipos de PCM adotado. Esta relação é descrita por uma curva polinomial de segunda ordem, com R² superiores a 0,99, entre as temperaturas médias anuais e o aumento do PHC. Temperaturas externas médias anuais entre 15°C e 22°C foram consideradas as mais adequadas para a utilização dos PCMs. E, a partir de 24°C, o aumento do PHC devido à incorporação de PCMs se aproximou cada vez mais do CB (sem PCM).

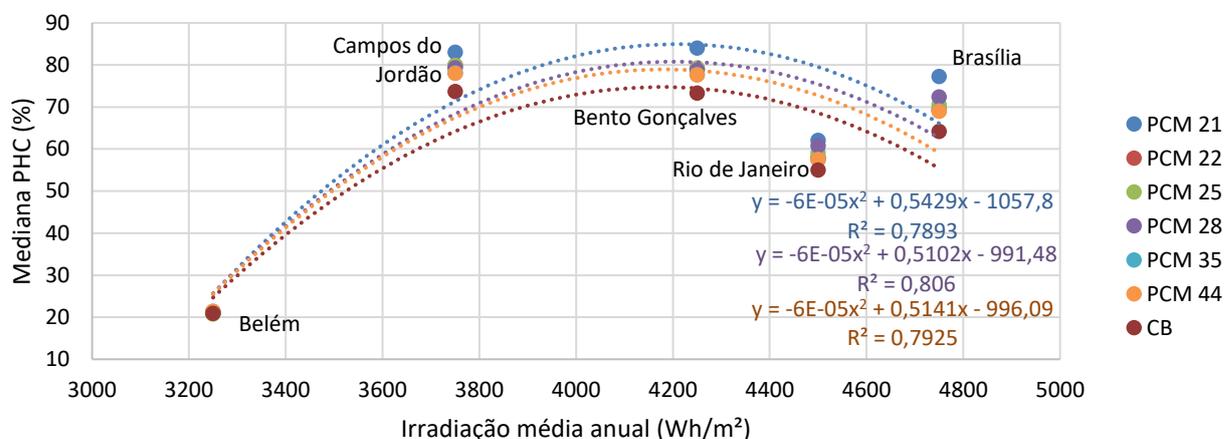
A Figura 11 apresenta a relação entre radiação média anual e o PHC. Nela é possível observar que o intervalo entre 3.750 Wh/m² a 4.250 Wh/m² apresentou os melhores resultados, com valores de R² próximos a 0,80.

Figura 10 - Relação entre PCM e temperatura externa média anual



Fonte: os autores.

Figura 11 - Relação entre PCM e radiação solar média anual



Fonte: os autores.

Pela análise, era esperada uma estabilização a partir de valores de 4.250 Wh/m². Entretanto, pode ser observada uma inflexão na curva (Figura 11) que representa a cidade do Rio de Janeiro. Essa inflexão pode ser explicada pois, embora o Rio de Janeiro apresente valor elevado de radiação, apresenta temperaturas médias externas elevadas e, por isso, obteve uma queda no PHC.

Logo, a combinação entre temperatura externa mediana, próxima a 18°C e radiação elevada, acima de 3.750 Wh/m², é a melhor combinação de parâmetros climáticos ambientais para a utilização de PCMs, encontrada nesse estudo.

A umidade relativa e a velocidade do vento apresentaram valores baixos de R², próximos a 0,24 e 0,43, respectivamente. A baixa relação entre essas variáveis ambientais e o PHC tornam inconclusivas possíveis correlações entre médias anuais de umidade relativa, velocidade do vento e aumento do PHC devido aos PCMs.

Em relação aos parâmetros ambientais, é possível afirmar que a temperatura do ar e a radiação solar são os que mais influenciaram no PHC em edificações com PCM. Como exemplo, a cidade com maior radiação (Brasília) e a cidade com menor temperatura média externa (Campos do Jordão) apresentaram os maiores aumentos do conforto.

Ademais, essa associação pode ter contribuído para os resultados obtidos no Rio de Janeiro de aumento do PHC em relação ao CB, mesmo que esteja em uma ZB mais quente. Apesar da cidade apresentar maiores temperaturas (se comparado a Bento

Gonçalves, Campos do Jordão e Brasília), possui o segundo maior índice de radiação solar (inferior apenas ao de Brasília).

Os resultados encontrados analisam parte da hipótese levantada por Saffari, Gracia, Fernández e Cabeza (2017a) de que determinadas variáveis climáticas justificariam diferenças nos resultados da influência de PCMs para diferentes cidades. Entretanto, destaca-se que um número reduzido de parâmetros climáticos foi avaliado e não foi possível estabelecer uma relação entre PHC, umidade relativa e velocidade do vento. Logo, mais análises e simulações são necessárias para investigar as variáveis que não apresentaram relação, para confirmar as tendências apresentadas, para extrapolar os limites de temperatura e radiação e, para eventualmente, determinar quais dessas últimas variáveis ambientais exerce maior influência no PHC.

Conclusão

Esse artigo teve como objetivo investigar a influência da incorporação de PCMs reais no percentual de horas em conforto (PHC) em uma edificação destinada a escritório, naturalmente ventilada, com paredes leves, em três Zonas Bioclimáticas Brasileiras (ZBs). A análise foi realizada por simulação termoenergética com o EnergyPlus e considerou diferentes combinações de condições de contorno, de instalação, tipos de PCMs e de parâmetros climáticos.

A incorporação de PCM se mostrou uma estratégia eficaz para aumentar o PHC nas ZBs 1 e 4. Nos melhores casos, foi observado aumento no PHC entre 26% a 33% em relação ao caso base. Já para ZB 8, o uso PCM deve ser avaliado de acordo com os parâmetros climáticos, uma vez que seu uso em Belém, com altas temperaturas e baixa radiação, piorou o PHC em quase todos os casos simulados.

O tipo do PCM, o clima (temperatura e radiação) e a camada de instalação foram os parâmetros de maior influência e resultaram em variações acima de 20% no PHC entre casos semelhantes. A orientação solar teve impacto moderado, cerca de 10%, e a espessura da camada de PCM e tipo de ventilação apresentaram menor influência na alteração do PHC, com média geral próxima a 2%.

Se levado em consideração apenas a temperatura de mudança de fase (TMF), PCMs com 21°C foram os melhores para Bento Gonçalves e Campos do Jordão, TMF de 21°C, 25°C e 28°C foram os melhores para Brasília e 21°C e 28°C para o Rio de Janeiro. O uso de PCM apresentou piora geral do PHC para Belém.

Apesar do PCM com TMF de 21°C ter apresentado os melhores resultados, uma análise mais aprofundada em relação às demais propriedades térmicas do material e parâmetros de contorno são necessárias para entender qual a contribuição individual da TMF. Afinal, as simulações levaram em consideração tanto um PCM com propriedades inerentes a um material industrializado, quanto todas as variáveis integradas com desempenho interativo. No primeiro caso, destaca-se ainda que o material industrializado trabalha com um intervalo de mudança de fase, cuja histerese foi descrita numericamente na simulação e que não permite uma interpretação de uma única temperatura, mas de um processo contínuo de mudança de fase em um determinado tempo.

A combinação entre temperaturas anuais medianas, próximas a 18°C e radiação solar acima de 3.750W/m² se mostraram os parâmetros climáticos de maior importância para garantir melhor desempenho no PHC do conjunto edificação e PCMs. Em climas com altas temperaturas médias anuais e baixo índice de radiação o PCM tende a se comportar como um isolante térmico e reduzir o PHC na maioria dos casos.

Por fim, uma análise mais abrangente, com avaliação mais parâmetros climáticos, sejam mais cidades ou ZBs, e considerando as melhores condições de contorno e de instalação dos PCM é necessária para confirmar as tendências apontadas neste trabalho. Além disso, mais comparações entre cidades na mesma ZB e em ZBs diferentes são necessárias para analisar a influência dos parâmetros ambientais e sua interação com o PCM.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 8 p.

AL-JANABI, A.; KAVGIC, M. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 162, p. 114222, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222>.

AL-WAELI, A.; KASEM, H. A.; YOUSIF, J. H.; CHAICHAN, M. T.; SOPIAN, K. Mathematical and neural network modeling for predicting and analyzing of nanofluid-nano PCM photovoltaic thermal systems performance. **Renewable Energy**, v. 145, p. 963-980, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.099>.

AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M. Case study on the optimal thickness of phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00522, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00522>.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2020.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta: ASHRAE, 2017.

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

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

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

CUNHA, S. R. L.; AGUIAR, J. L. B. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. **Journal of Energy Storage**, v. 27, p. 101083, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Version 9.3.0**: Documentation Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 20 out. 2023.

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

FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.; SARCINELLA, A. Phase change materials for energy efficiency in buildings and their use in mortars. **Materials**, v. 12, n. 8, p. 1260, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12081260>.

HLANZE, P.; ELHEFNY, A.; JIANG, Z.; CAI, J.; SHABGARD, H. In-duct phase change material-based energy storage to enhance building demand flexibility. **Applied Energy**, v. 310, Sept. 2021, p. 118520, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118520>.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados Históricos Anuais**, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 20 jan. 2023.

JANGELDINOV, B.; MEMON, S.; KIM, J.; KABDRAKHMANOVA, M. Evaluating the Energy Efficiency of PCM-Integrated Lightweight Steel-Framed Building in Eight Different Cities of Warm Summer Humid Continental Climate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, n. 4381495, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4381495>.

JIN, X.; SHI, D.; MEDINA, M.; SHI, X.; ZHOU, X.; ZHANG, X. Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, p. 1767–1778, Mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6307-3>.

KIM, H. B.; MAE, M.; CHOI, Y.; KIYOTA, T. Experimental analysis of thermal performance in buildings with shape-stabilized phase change materials. **Energy and Buildings**, v.152 p. 524–533, Oct. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.076>.

KISHORE, R. A.; BIANCHI, M. V. A.; BOOTEN, C.; VIDAL, J.; JACKSON, R. Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings. **Applied Thermal Engineering**, v. 187, 116568, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116568>.

LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X.; JIN, X. Thermal performance of phase change materials (PCM) - enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. **Solar Energy**, v. 163, p. 113–121, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.086>.

LIU, J.; LIU, Y.; YANG, L.; LIU, T.; ZHANG, C.; DONG, H. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1, p. 356–373, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.069>.

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

MENG, E.; YU, H.; ZHOU, B. Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 212–225, Nov. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110>.

MENGJIE, S.; FUXIN, N.; NING, M.; YANXIN, H.; SHIMING, D. Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776–793, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.066>.

OLIVEIRA, M. M. **Investigação da influência dos materiais de mudança de fase no conforto térmico em modelo de escritório nos climas brasileiros**. 2023. 197f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023

OLIVEIRA, M. M.; CARLO, J. C. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 293–314, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100506>.

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

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. Inpe: São José dos Campos, 2017.

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

RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 723–744, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221>.

RUBITHERM. PCM RT - LINE. Berlim, 2022. Disponível em: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. Acesso em março de 2022.

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

SAFFARI, M.; GRACIA, A.; USHAK, S.; CABEZA, L. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole building energy simulation tools: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1239–1255, Dec. 2017b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.139>.

SHARMA, V.; RAI, A. C. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109664, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109664>.

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

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

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

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

WANG, H.; LU, W.; WU, Z.; ZHANG, G. Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.124>.

YE, R.; JIANG, H.; WANG, J.; YANG, X.; SHU, X. Fabrication and characteristics of eutectic hydrated salts/fumed silica composite as form-stable phase change materials for thermal energy storage. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 238, p. 111584, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111584>.

Apêndice A

Tabela A - Resultados obtidos a partir da simulação

		Bento Gonçalves				Campos do Jordão				Brasília				Rio de Janeiro				Belém				
		E3		E6		E3		E6		E3		E6		E3		E6		E3		E6		
		VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	VSN	VS	
21	N	IN	21%	20%	21%	21%	31%	30%	31%	30%	33%	31%	33%	31%	17%	14%	17%	16%	-3%	-4%	-2%	-3%
		ME	7%	6%	7%	6%	7%	3%	7%	3%	9%	8%	9%	8%	5%	3%	4%	3%	-3%	-4%	-2%	-3%
		EX	4%	3%	4%	3%	3%	0%	3%	0%	5%	4%	6%	4%	2%	1%	3%	2%	0%	-2%	0%	-1%
	S	IN	16%	15%	16%	16%	18%	18%	18%	19%	22%	23%	23%	23%	14%	13%	14%	13%	-3%	-2%	-2%	-3%
		ME	5%	6%	7%	7%	7%	5%	7%	5%	9%	8%	9%	8%	4%	4%	4%	3%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	4%	4%	4%	5%	4%	2%	4%	2%	5%	4%	5%	5%	2%	2%	3%	3%	-3%	-3%	-1%	-1%
	L	IN	20%	19%	21%	20%	29%	29%	30%	29%	26%	24%	26%	25%	16%	14%	16%	15%	-1%	-1%	-1%	-2%
		ME	7%	6%	7%	7%	7%	4%	8%	4%	8%	7%	8%	7%	4%	4%	4%	4%	-1%	-1%	-1%	-2%
		EX	3%	3%	4%	4%	4%	0%	4%	0%	5%	4%	6%	5%	3%	2%	3%	2%	0%	-2%	0%	-1%
	O	IN	17%	16%	18%	17%	21%	21%	21%	21%	26%	24%	26%	25%	14%	13%	15%	14%	-3%	-4%	-2%	-3%
		ME	7%	6%	7%	7%	6%	4%	6%	4%	9%	8%	8%	7%	4%	3%	4%	3%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	3%	5%	4%	5%	3%	1%	4%	1%	5%	4%	6%	5%	3%	2%	3%	3%	0%	0%	-1%	-1%
22	N	IN	13%	13%	15%	13%	21%	15%	21%	14%	13%	9%	13%	10%	6%	5%	7%	5%	-1%	-3%	-2%	-3%
		ME	5%	4%	5%	4%	4%	-1%	4%	-1%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
		EX	3%	2%	3%	2%	2%	-1%	2%	-2%	3%	1%	3%	1%	0%	0%	1%	0%	-2%	-2%	0%	-1%
	S	IN	12%	11%	12%	11%	14%	12%	14%	12%	12%	9%	12%	10%	7%	6%	7%	6%	-1%	-4%	-2%	-3%
		ME	5%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	4%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
		EX	2%	4%	3%	4%	3%	1%	3%	1%	3%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	0%	-1%
	L	IN	13%	12%	13%	12%	17%	13%	17%	11%	11%	9%	11%	9%	7%	5%	7%	5%	0%	-1%	-1%	-2%
		ME	5%	4%	5%	4%	4%	0%	4%	0%	3%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-1%	-2%
		EX	2%	2%	2%	2%	2%	-1%	2%	-1%	3%	1%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	0%	0%	-1%
	O	IN	10%	10%	12%	11%	14%	10%	13%	10%	12%	9%	13%	9%	7%	6%	7%	6%	-3%	-4%	-2%	-3%
		ME	5%	5%	5%	5%	4%	1%	4%	1%	4%	2%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
		EX	3%	3%	3%	4%	3%	0%	3%	0%	3%	1%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	-2%	-1%	-1%
25	N	IN	15%	14%	16%	14%	22%	16%	22%	16%	18%	14%	18%	14%	10%	8%	10%	8%	-2%	-2%	-1%	-2%
		ME	4%	3%	4%	3%	4%	-1%	3%	-1%	3%	1%	3%	1%	2%	0%	2%	1%	-3%	-3%	-2%	-2%
		EX	2%	2%	2%	1%	2%	-2%	2%	-2%	1%	0%	2%	0%	1%	-1%	1%	0%	-2%	-5%	-1%	-1%
	S	IN	12%	13%	13%	13%	16%	14%	16%	14%	17%	16%	18%	17%	11%	10%	12%	11%	-2%	-4%	-2%	-3%
		ME	4%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	3%	2%	4%	3%	3%	2%	3%	2%	-2%	-2%	-2%	-2%
		EX	2%	3%	2%	4%	3%	0%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	0%	-3%	-2%	-2%
	L	IN	13%	12%	13%	13%	15%	14%	15%	14%	16%	14%	16%	14%	10%	9%	10%	9%	-3%	-3%	-1%	-2%
		ME	3%	2%	4%	2%	3%	-1%	3%	-1%	3%	2%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	-1%	-2%	-1%	-2%
		EX	1%	2%	2%	2%	2%	-2%	2%	-2%	2%	1%	2%	1%	2%	1%	1%	0%	-2%	-3%	0%	-1%
	O	IN	12%	12%	13%	12%	15%	12%	15%	12%	16%	14%	17%	14%	10%	10%	11%	9%	-4%	-4%	-2%	-3%
		ME	4%	5%	4%	5%	4%	1%	4%	1%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-2%
		EX	2%	3%	3%	3%	2%	0%	2%	0%	2%	-1%	2%	0%	1%	0%	1%	1%	-1%	-2%	-1%	-2%
28	N	IN	12%	12%	13%	13%	16%	12%	17%	12%	17%	17%	19%	17%	14%	12%	15%	13%	-2%	-3%	0%	-1%
		ME	4%	4%	4%	4%	4%	0%	4%	0%	6%	4%	5%	4%	3%	3%	4%	3%	3%	3%	3%	3%
		EX	2%	2%	3%	3%	3%	0%	4%	0%	4%	2%	4%	3%	1%	0%	2%	1%	-2%	-3%	-2%	-5%
	S	IN	8%	10%	9%	10%	11%	9%	12%	10%	16%	16%	16%	16%	16%	15%	16%	15%	-8%	-7%	-6%	-7%
		ME	3%	5%	5%	5%	4%	2%	4%	2%	6%	4%	5%	4%	5%	4%	5%	4%	3%	2%	3%	3%
		EX	2%	3%	3%	4%	3%	1%	3%	2%	4%	2%	4%	2%	2%	0%	2%	1%	-4%	-3%	-2%	-3%
	L	IN	11%	11%	12%	12%	15%	12%	15%	11%	17%	16%	17%	16%	10%	9%	11%	10%	-4%	-4%	-3%	-4%
		ME	4%	4%	4%	4%	5%	0%	4%	1%	4%	3%	5%	4%	3%	4%	4%	2%	1%	2%	2%	2%
		EX	2%	2%	2%	3%	4%	0%	4%	0%	3%	2%	4%	3%	1%	0%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-2%
	O	IN	9%	10%	10%	11%	11%	9%	11%	9%	17%	16%	18%	16%	11%	9%	11%	10%	-2%	-5%	-3%	-4%
		ME	4%	4%	4%	5%	4%	2%	4%	2%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	2%	4%	4%
		EX	2%	3%	3%	4%	3%	1%	3%	1%	4%	3%	5%	3%	1%	2%	2%	1%	-5%	-6%	-3%	-4%
35	N	IN	10%	9%	10%	9%	14%	9%	15%	9%	12%	9%	13%	10%	6%	4%	6%	5%	0%	-1%	-2%	-4%
		ME	4%	3%	4%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	0%	-1%	-2%	-2%	-3%
		EX	3%	2%	3%	2%	2%	-1%	3%	-1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%
	S	IN	7%	8%	7%	8%	9%	7%	11%	8%	11%	9%	12%	10%	6%	5%	7%	5%	-1%	-2%	-3%	-4%
		ME	3%	4%	3%	4%	4%	2%	4%	2%	4%	3%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	1%	2%	2%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	3%	2%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%
	L	IN	8%	8%	9%	8%	12%	8%	13%	8%	10%	8%	11%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-1%	-2%	-3%
		ME	3%	3%	3%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-2%	-2%
		EX	2%	1%	2%	2%	2%	-1%	3%	0%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	-1%	-1%	-1%
	O	IN	7%	7%	8%	7%	9%	7%	10%	7%	11%	9%	12%	9%	6%	5%	6%	4%	-1%	-2%	-3%	-4%
		ME	4%	4%	4%	4%	4%	2%	4%	1%	4%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%
		EX	2%	3%	3%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%
44	N	IN	10%	9%	10%	9%	13%	8%	15%	9%	11%	9%	13%	10%	6%	4%	6%	5%	0%	-1%	-2%	-3%

	ME	3%	2%	4%	3%	4%	0%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	1%	0%	-1%	-2%	-2%	-3%
	EX	1%	1%	3%	2%	2%	-1%	3%	-1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%
S	IN	7%	7%	7%	8%	9%	7%	10%	8%	11%	8%	11%	9%	6%	5%	7%	5%	0%	-1%	-2%	-3%
	ME	3%	4%	3%	4%	4%	2%	4%	2%	4%	3%	4%	3%	2%	1%	2%	1%	-2%	-2%	-2%	-3%
	EX	1%	2%	2%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	1%	3%	2%	1%	0%	2%	1%	0%	-3%	-1%	-2%
L	IN	9%	8%	8%	8%	12%	8%	13%	8%	10%	7%	11%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-1%	-2%	-2%
	ME	2%	3%	3%	3%	5%	1%	4%	0%	4%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-1%	-1%	-2%
	EX	1%	1%	2%	2%	2%	-1%	3%	0%	1%	0%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	-1%	-1%
O	IN	8%	7%	8%	7%	9%	7%	10%	7%	11%	8%	12%	9%	6%	4%	6%	4%	0%	-2%	-3%	-3%
	ME	4%	2%	4%	4%	4%	2%	4%	1%	4%	2%	4%	2%	2%	1%	2%	1%	-1%	-2%	-2%	-3%
	EX	1%	2%	3%	3%	2%	0%	3%	1%	2%	0%	3%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	-1%	-1%	-2%

Legenda: Relação entre cores e intervalo 1

-9,0% a 6,0%	-5,9% a -3,0%	-2,9% a 0,0%	0,1% a 6,0%	6,1% a 2,0%	12,1% a 18,0%	18,1% a 24,0%	24,1% a 30,0%	30,1% a 33,0%
--------------	---------------	--------------	-------------	-------------	---------------	---------------	---------------	---------------

PCMs: RT21HC (21), RT22HC (22), RT25HC (25), RT28HC (28), RT35HC (35) e RT44HC (44); Cidades: Campos do Jordão (CJ), Bento Gonçalves (BG), Brasília (BR), Rio de Janeiro (RJ) e Belém (BE); PCM nas paredes: interno (IN), meio (ME) e externo (EX); Espessuras: 3cm (E3) e 6cm (E6); Orientações solares: norte (N), sul (S), leste (L) e oeste (O); Condições de ventilação: ventilação seletiva (VS) e ventilação seletiva combinada com ventilação noturna constante (VSN). Fonte: Oliveira (2023).

1 Matheus Menezes Oliveira

Arquiteto e Urbanista. Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Viçosa. Professor do curso de Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal de Viçosa. Endereço postal: Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG – Brasil. 36570-000

2 Caio de Carvalho Lucarelli

Arquiteto e Urbanista. Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Viçosa. Pós-Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa. Endereço postal: Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG – Brasil. 36570-000

3 Joyce Correna Carlo

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professora do curso de Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal de Viçosa. Endereço postal: Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG – Brasil. 36570-000