USO DE PCMS PARA MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS NO CLIMA TEMPERADO ÚMIDO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Júlia Cordeiro Vieira (1); Raquel Diniz Oliveira (2)
(1) Engenheira de Produção Civil, Técnica em Edificações, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, juliacordeiroengcivil@gmail.com,
(2) PhD, Professora do Departamento de Engenharia Civil, raqueldiniz@cefetmg.br,
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belo Horizonte–MG, 30510-000, Tel.: (31) 3319 6848

RESUMO
Os Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* - PCM) têm ganhado grande destaque por parte de pesquisadores e projetistas como estratégia de condicionamento passivo em edificações. Os PCMs são materiais capazes de absorver e dissipar grandes quantidades de calor durante sua mudança de fase, mantendo faixas de temperatura constante. Quando incorporados aos sistemas construtivos, podem propiciar condições de conforto térmico nas edificações e diminuir o consumo de energia. Verifica-se que os PCMs apresentam melhor performance em climas amenos, além da escassez de referências sobre seu uso no Brasil. Neste trabalho, buscou-se investigar o potencial de sua incorporação em habitações localizadas nas regiões Sul e parte do Sudeste do Brasil, regiões de clima subtropical. Para isto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura acerca da simulação do desempenho térmico de PCMs aplicados em edificações residenciais nos climas Subtropical Úmido e Temperado Oceânico, por serem comparáveis ao clima subtropical brasileiro. Utilizou-se como metodologia a ferramenta Proknow-C, que permitiu selecionar um portfólio relevante do estado da arte a respeito desta temática. Os resultados indicaram que a aplicação de PCMs é promissora para melhorar as condições de conforto térmico e o consumo de energia em habitações no Sul e parte do Sudeste do Brasil. No entanto, estima-se a necessidade de ajustes nos atuais sistemas construtivos brasileiros para possibilitar a incorporação de PCM de maneira eficaz ao clima de cada região. A partir desse estudo, espera-se que novas pesquisas sejam realizadas para avaliar o uso de PCM no Brasil e promover a sensibilização do mercado para o assunto no território nacional.

Palavras-chave: materiais de mudança de fase, edificações residenciais, desempenho térmico, clima temperado.

ABSTRACT
Phase Change Materials (PCMs) have gained great prominence by researchers and designers as passive cooling and heating technology in buildings. PCMs have a great capacity to absorb and dissipate heat during their phase change, maintaining constant temperature ranges. Incorporated into construction systems, they can provide thermal comfort in buildings and reduce energy consumption. PCMs show better performance in mild climates. Since there are few references about their use in Brazil, this study aims to investigate the potential of incorporating these materials in housings in South and part of Southeast of Brazil. Therefore, a systematic review of the literature was carried out on the whole-building energy simulation to evaluate the performance of PCM-enhanced housings under warm temperate fully humid climates. The Knowledge Development Process - Constructivist (ProKnow-C) was used as a methodology to select a relevant portfolio of articles that represent the state-of-the-art regarding this theme. The results indicated that the PCM application has a great potential to improve thermal comfort conditions and energy savings in housings located in the South and part of Southeast of Brazil. However, it is estimated the need for adjustments in current Brazilian building envelope systems to enable the proper incorporation of PCM into the climate. From this study, it is expected that further research will be developed to assess the potential impact of PCM applications in Brazil and to promote market awareness on this matter in the national territory.

Keywords: phase change materials, housing, thermal performance, warm temperate climate.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as edificações residenciais são responsáveis por 26% do total consumido de energia elétrica (BRASIL, 2020). Segundo Abrahão e Souza (2021), cerca de 18% desse consumo é relacionado ao uso de equipamentos voltados para conforto térmico, como ar condicionado e ventiladores. Espera-se que essa demanda aumente drasticamente até 2050, devido a fatores como o crescimento populacional e o aumento das demanda por conforto térmico nas edificações (IEA, 2013).

As características termofísicas e arquitetônicas da envoltória são fatores determinantes no desempenho térmico da edificação, sendo responsáveis por 20% a 60% da demanda energética em edifícios (IEA, 2013; SORGATO, 2009). Portanto, adequar o projeto arquitetônico ao clima é fundamental para ampliar os ganhos em racionalização de energia (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Visando o aprimoramento do desempenho térmico de edificações, as técnicas de refrigeração passiva na envoltória têm sido o principal foco de pesquisadores e projetistas, visto que mitigam o consumo de energia e emissões simultaneamente (AKEIBER *et al*., 2016). Dentre elas, a incorporação de Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* - PCM) em elementos construtivos tem se destacado devido ao seu grande potencial em reduzir a amplitude térmica no interior de edificações (SILVA *et al.*, 2012). Os PCMs são materiais capazes de armazenar calor durante a sua mudança de fase de sólido para líquido, à medida que a temperatura aumenta, ou dissipar calor durante a sua solidificação quando a temperatura cai, ajudando a regular a temperatura interna do ar de forma passiva e sustentável (KUZNIK *et al*, 2011).

Os PCMs são classificados em três grandes grupos baseados em sua composição química: orgânicos (parafinas, ácidos graxos, álcoois e glicóis), inorgânicos (sais hidratados e metais) ou eutéticos (mistura de dois ou mais PCMs) (ABHAT, 1983). Sua aplicação na construção civil varia conforme o tipo de sua impregnação em materiais de construção, que pode ser incorporação direta, imersão, encapsulamento ou estabilização por forma (HAWES; FELDMAN, 1992; ZHOU *et al*., 2012). Cada tipo apresenta suas vantagens e limitações, de modo que sua seleção deve considerar requisitos de aplicação (GRACIA; CABEZA, 2015).

Os PCMs podem ser incorporados em gesso, madeira, tijolos, concreto, vermiculita, entre outros materiais para a composição de paredes, telhados, tetos e pisos, bem como em vidros, brises e venezianas, para aquecimento ou resfriamento passivo de edificações (POMIANOWSKI *et al*., 2013; KUZNIK *et al*., 2011). Além disso, os PCMs podem ser utilizados em sistemas ativos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) para melhorar a eficiência energética desses sistemas (ZHANG *et al*., 2007).

De modo geral, o emprego de PCM na edificação pode promover uma redução de até 4,2 ºC na temperatura máxima de ambientes (CUI *et al*., 2017). No entanto, vários fatores podem afetar a sua eficácia, como suas propriedades termofísicas (principalmente temperatura de mudança de fase e capacidade de calor latente), características arquitetônicas e construtivas do edifício, condições climáticas locais e a utilização de sistemas AVAC (SOARES *et al.*, 2014). Neste sentido, *softwares* de simulação podem fornecer informações valiosas sobre o desempenho térmico destes materiais (SAFFARI *et al.*, 2017a).

A aplicação de PCM em edificações tem recebido frequente atenção em vários países durante a última década, principalmente na Ásia, Europa, Estados Unidos e Austrália (CUI *et al*., 2017), demonstrando-se como tendência em publicações internacionais voltadas para a melhoria do desempenho térmico de edificações (OLIVEIRA *et al*., 2021). No Brasil, Brito *et al.* (2016) e Pons e Stanescu (2017) verificaram que os PCMs apresentam melhor desempenho quando empregados em regiões climáticas amenas, sobretudo nas zonas bioclimáticas[1] 1 a 5. Entretanto, ainda há poucos estudos sobre a sua utilização no Brasil.

Diante disto, neste trabalho, buscou-se investigar o potencial de PCM em melhorar o desempenho térmico de habitações localizadas no Sul e parte do Sudeste brasileiro. Estas regiões possuem clima subtropical, comparável aos climas Subtropical Úmido (Cfa) e Temperado Oceânico (Cfb) (ALVARES *et al*., 2013), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger[2] (KOTTEK *et al*., 2006). Para isto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura por meio da metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process - Constructivist*), proposta por Ensslin e Ensslin (2007), a qual permite a seleção de um portfólio bibliográfico que representa o estado da arte sobre o tema proposto (MARTINS; AZEVEDO, 2018).

2. OBJETIVO

Investigar o potencial de melhoria do desempenho térmico de habitações localizadas em climas semelhantes ao subtropical brasileiro pela aplicação de Materiais de Mudança de Fase na envoltória.

---

[1] "Região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano" (ABNT, 2005a, p. 5). O zoneamento bioclimático brasileiro é estabelecido pela NBR 15220 - Parte 3 (ABNT, 2005b).

[2] O clima Cfa apresenta verão quente, com temperatura máxima a partir de 22 ºC e temperatura mínima entre -3 e 18 °C, enquanto o clima Cfb apresenta verão temperado e temperatura máxima menor que 22 °C, ambos sem estação seca (KOTTEK *et al*., 2006).

3. MÉTODO

A metodologia ProKnow-C (ENSSLIN *et al.*, 2010) desenvolvida neste trabalho consiste em três etapas:

1. Seleção do portfólio bibliográfico;
2. Análise bibliométrica do portfólio;
3. Análise sistêmica da literatura.

3.1. Seleção do portfólio bibliográfico

A seleção do portfólio bibliográfico consiste em três etapas principais: definição dos termos de busca, investigação preliminar e seleção dos artigos que irão compor o portfólio. Esta última envolve a aplicação de filtros de acordo com o direcionamento do tema de pesquisa e exclusão de artigos com baixa representatividade do portfólio bibliográfico (ENSSLIN; ENSSLIN, 2007).

A pesquisa preliminar consistiu na busca de artigos relacionados ao desempenho térmico de edificações com PCM nas bases de dados de engenharia. O clima ainda não foi considerado nesta etapa para não limitar a obtenção de resultados. Assim, definiu-se o seguinte termo de busca: "*phase change material**" AND (*building** OR *envelope**) AND (*thermal* OR *energy* OR *heat*) AND (*performance* OR *storage* OR *efficiency*). Este termo foi aplicado em 18 bases de dados nos campos "título", "resumo" e "palavras-chave", considerando-se apenas artigos completos de periódicos acadêmicos publicados entre 2010 e 2020. Tais bases de dados foram estabelecidas a partir de uma consulta prévia do termo de busca no Portal Periódicos Capes, as quais resultaram em 5.798 artigos. Dentre elas, selecionou-se aquelas que representaram 80% do total: *Scopus*; *Web of Science*; *ScienceDirect* e *ProQuest*, totalizando em 4.724 artigos. Na sequência, uma nova busca foi realizada nas bases selecionadas, aplicando-se filtros para excluir artigos totalmente desalinhados com o tema de pesquisa, o que reduziu o total de artigos para 3.963. Em seguida, uma séria de filtragens de exclusão foram realizadas para a seleção do portfólio com auxílio do *software* gerenciador de referências Mendeley, cujo processo realizado está resumido na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo do processo se seleção dos artigos para o Portifólio Bibliográfico

Etapa	Processo	Quantidade de artigos
1	Extração dos artigos das bases de dados	3.963
2	Eliminação de redundâncias (artigos duplicados)	1.960
3	Artigos com o título alinhado com o tema de pesquisa	840
4	Artigos com reconhecimento cientifico (80% do total de citações)	228
5	Artigos com o resumo alinhado com o tema de pesquisa	70
6	Resgate de artigos com baixo reconhecimento científico (pouco citados no Google Acadêmico, publicados nos últimos dois anos, ou cuja autoria fosse de algum dos autores presentes na etapa 5)	142
7	Artigos disponibilizados integralmente pela CAPES	140
8	Artigos adicionados à parte	7
9	Artigos com alinhamento total com o tema de pesquisa	20

Cabe esclarecer que, devido à relevância de seus autores e do local de pesquisa ao objetivo deste trabalho, considerou-se pertinente adicionar ao portifólio bibliográfico 7 artigos que não estavam presentes no extrato inicial. Dentre eles, 4 representaram os únicos artigos nacionais encontrados, dos quais 2 avaliaram os PCMs em edificações comerciais e públicas no Brasil. Eles foram localizados em periódicos não cobertos pelas bases de dados e em anais de congresso na base da ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído) nos últimos 5 anos. Os outros 3 artigos foram identificados por estarem presentes nas referências dos artigos selecionados, por possuírem autoria de algum dos autores já presentes no grupo de artigos da etapa 7 e por terem sido publicados após a extração do portifólio nas bases de dados.

A etapa final consistiu na leitura integral dos artigos e na exclusão daqueles que não apresentassem alinhamento total com o tema de pesquisa. As análises visaram a seleção de artigos que avaliaram por meio de simulação computacional o efeito de aplicações de PCM em habitações localizadas em condições climáticas semelhantes ao subtropical brasileiro. Para auxiliar nesta identificação, adotou-se como referência os climas Subtropical Úmido (Cfa) e Temperado Oceânico (Cfb), conforme classificação climática de Köppen-Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006), devido à sua popularidade na literatura. Além disso, selecionou-se apenas os estudos que utilizaram o *software* de simulação EnergyPlus, por ser a ferramenta mais proeminente para avaliar os efeitos de aplicações passivas de PCM em edifícios (SAFFARI *et al.*, 2017a). Ao final, obteve-se 20 artigos para a composição do portfólio bibliográfico.

3.2. Análise bibliométrica do portfólio

Esta etapa compreendeu a apresentação quantitativa de dados estatísticos dos artigos do portfólio. Dentre as análises realizadas, será apresentado a seguir apenas o grau de relevância de periódicos.

O grau de relevância dos periódicos foi estimado pela associação entre a quantidade de artigos do portifólio em cada periódico e a sua classificação no sistema Qualis da CAPES. Assim, verificou-se que 87% da relevância do portifólio se enquadra em periódicos com classificação superior (A1) e que o número máximo de artigos foi publicado pela revista *Energy and Buildings* (vide Figura 1).

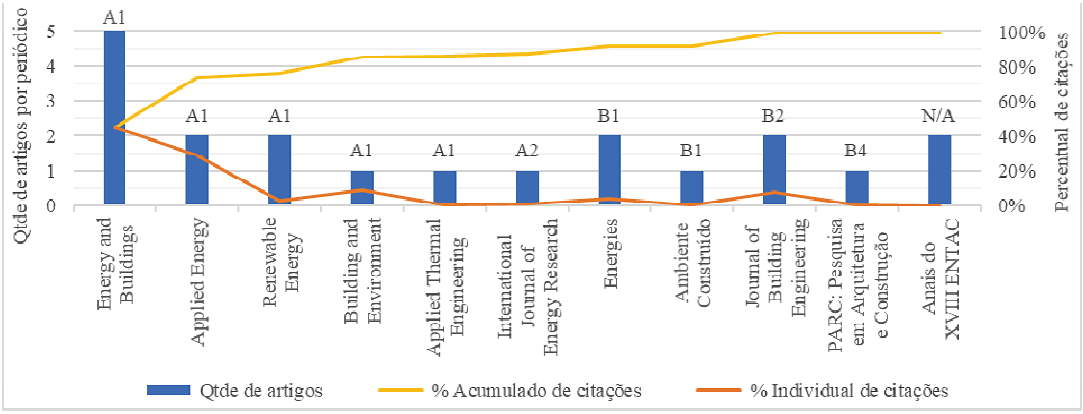

Figura 1 – Relevância dos periódicos de acordo com o sistema Qualis Capes

3.3. Análise sistêmica da literatura

Conforme recomendado pelo método ProKnow-C (ENSSLIN *et al.*, 2010), seis lentes de pesquisa foram definidas para auxiliar no direcionamento da análise do portfólio e na obtenção de contribuições relevantes ao objetivo deste trabalho (Quadro 1).

Quadro 1 – Lentes de pesquisa usadas na revisão sistêmica da literatura

N	Lente	Objetivo
1	Clima	Identificar se o clima analisado é Subtropical Úmido (Cfa) ou Temperado Oceânico (Cfb)
2	Modelo da edificação	Identificar o modelo energético utilizado na simulação numérica do EnergyPlus
3	Peso da construção	Identificar se o sistema construtivo é leve ou pesado com base na composição da envoltória
4	Características do PCM	Analisar a temperatura de fusão, a capacidade de calor latente e a espessura do PCM
5	Superfície(s) de instalação	Analisar o local de instalação do PCM na envoltória
6	Efeito do PCM	Avaliar se o efeito do PCM foi positivo ou negativo no conforto e na economia de energia

4. RESULTADOS

As pesquisas relativas à aplicação de PCM em edificações vem sendo desenvolvidas extensivamente desde a década de 1980 e têm se intensificado nas últimas décadas (MOHSENI; TANG, 2021; POMIANOWSKI *et al.*, 2013). Neste trabalho, os artigos selecionados foram publicados a partir de 2014, dos quais quase metade se concentraram nos anos de 2016 e 2017. Além disso, 20% do portfólio foi publicado no ano de 2020.

A maioria dos artigos apresentou informações de grande relevância relativas ao método de utilização do *software* EnergyPlus para a simulação termoenergética de PCM em edificações. Na Tabela 2 seguir, estão apresentados os resultados obtidos na revisão sistemática deste trabalho, resumidos em subitens de acordo com as 6 lentes de pesquisa desenvolvidas pelo método Proknow-C. Para cada uma dessas lentes, serão apresentados os pontos positivos e negativos evidenciados no portifólio bibliográfico.

Tabela 2 – Lentes de pesquisa usadas na revisão sistêmica da literatura

N	Clima	Modelo da edificação	Peso	Características do PCM			Superfície(s) de instalação	Efeito do PCM	Referência
				Calor latente [kJ/kg]	Ponto de fusão [°C]	Esp. [mm]			
1	(Cfa): Brisbane; Tóquio (Cfb): Berlim; Paris	Edifício de 4 andares	Leve	110	23 - 26	12,5	Interna da envoltória	- Economia de energia em todas as cidades.	Saffari *et al.* (2017b)
2	(Cfb): Melbourne	Moradia térrea	Pesado	219	25 - 31	7,5 – 30	Interna da envoltória	- Melhoria do conforto térmico no verão.	Ramakrishnan *et al.* (2017)

Tabela 2 – Lentes de pesquisa usadas na revisão sistêmica da literatura (continuação)

N	Clima	Modelo da edificação	Peso	Características do PCM			Superfície(s) de instalação	Efeito do PCM	Referência
				Calor latente [kJ/kg]	Ponto de fusão [°C]	Esp. [mm]			
3	(Cfa): Brisbane; Sydney (Cfb): Canberra; Hobart; Melbourne	Casa de um cômodo Moradia térrea	Pesado	219	20 - 25	5	Internas do teto e/ou paredes	- Economia de energia em todas as cidades.	Alam *et al.* (2014)
4	(Cfa): Brisbane; Tóquio (Cfb): Berlim; Auckland; Bogotá; Quito	Zona única residencial	Muito leve	46	25	12,5	Interna da envoltória	- Melhoria do conforto térmico em todas cidades. - Economia de energia desprezível em Tóquio e Berlim.	Marin *et al.* (2016)
5	(Cfa): Milão (Cfb): Paris	Moradia térrea	Leve	70	18 - 28	10 - 40	Interna da envoltória	- Economia de energia em todas as cidades.	Soares *et al.* (2014)
6	(Cfb): Vancouver, BC	Edifício de 6 andares	Leve	200	23	15	Interna das paredes externas	- Impacto desprezível no conforto térmico no verão; Economia de energia para aquecimento.	Nghana e Tariku (2016)
7	(Cfb): Quito	Habitação popular térrea	Pesado	45,3 - 260,7	21 - 29,9	10	Externa da envoltória	- Economia de energia em todos os casos.	Beltran e Martinez-Gomez (2019)
8	(Cfa): Brisbane; Sydney (Cfb): Melbourne	Moradia térrea	Pesado	204	23 - 31	3,75 - 30	Interna do teto	- Economia de energia em todas as cidades; - Baixo impacto no conforto térmico no cenário não otimizado.	Ramakrishnan *et al.* (2016)
9	(Cfb): Auckland	Casa de 2 andares	Pesado	33,5	20 - 24	13	Interna da envoltória	- Impactos positivos e negativos no conforto térmico e economia de energia, dependendo do ponto de operação do AVAC.	Vautherot *et al.* (2015)
10	(Cfb): Nottinghamshire; Aberdeen	Casa de 2 andares	Leve e pesado	86	24	200	Interna das paredes externas	- Melhoria do conforto térmico durante o verão.	Auzeby *et al.* (2016)
11	(Cfa): Gwangju	Moradia térrea	Leve	156,5 – 207,8	20 – 26	19	Interna de paredes externas	- Impactos positivos na economia de energia.	Park *et al.* (2019)
12	(Cfa): Milão	Edifício de 4 andares	Leve	110	23 - 26	12,5	Interna da envoltória	- Economia de energia para refrigeração.	Piselli *et al.* (2020)
13	(Cfa): Changsha	Zona única residencial	Pesado	153	27	10	Interna das paredes externas de maior exposição solar	- Melhoria no conforto térmico e economia de energia no verão apenas quando o PCM foi aliado à ventilação mecânica.	Zhang *et al.* (2017)
14	(Cfa): Guangzhou	Cubículo	Pesado	200	14 - 31	5 - 15	Externa ou interna de paredes externas ou teto	- Impactos positivos na economia de energia.	Ji *et al.* (2018)
15	(Cfa): Gwangju; Jeju; Mokpo	Moradia térrea	Pesado	44,4 38,6	30 20	4,3 3,8	Externa de paredes externas	- Impactos positivos na economia de energia.	Park *et al*. (2020)
16	(Cfa): Newcastle	Zona única residencial	Pesado	200	19 - 29	5 10	Interna de paredes externas e/ou do teto	- Impactos positivos na economia de energia.	Mohseni e Tang (2021)
17	(Cfb): São Paulo Curitiba	Cubículo simplificado	Leve e Pesado	70	22 - 34	5 - 20	Interna da envoltória	- Melhoria do conforto térmico no edifício leve durante o verão; Impactos desprezíveis no edifício pesado.	Brito *et al.* (2017)

Tabela 2 – Lentes de pesquisa usadas na revisão sistêmica da literatura (continuação)

N	Clima	Modelo da edificação	Peso	Características do PCM			Superfície(s) de instalação	Efeito do PCM	Referência
				Calor latente [kJ/kg]	Ponto de fusão [°C]	Esp. [mm]			
18	(Cfa): Santa Maria (Cfb): São Paulo; Curitiba	Escritório	Pesado	126,9	26,5	25 50	No meio da parede externa	- Impactos positivos na economia de energia.	Pons e Stanescu (2017)
19	(Cfa): Santa Maria	Habitação popular térrea	Leve	190 230	22 25	NE*	Externa de paredes externas	- Impactos positivos no conforto térmico.	Brandalise *et al.* (2020)
20	(Cfa): Porto Alegre	Escola pública	Pesado	227 230 185	23 25 27	25 50	Interna de teto ou paredes externas	- Impactos positivos no conforto térmico.	Filippini *et al.* (2020)

*NE = Não especificado.

4.1. Lente 1: Clima

Nesta análise, foi possível identificar estudos que avaliaram a aplicação de PCM na envoltória de edificações em climas semelhantes ao subtropical brasileiro, classificados como Subtropical Úmido (Cfa) e Oceânico temperado (Cfb) (KOTTEK *et al*., 2006; ALVARES *et al*., 2013).

Na Figura 2, verifica-se um equilíbrio na distribuição dos artigos do portifólio por condição climática Cfa ou Cfb. No total, os climas de 26 cidades e de 14 países diferentes foram avaliados, destacando-se a Austrália (28%), o Brasil (15%), Coreia do Sul (9%) e Itália (9%). Porém, essa representatividade brasileira tem como origem os 4 únicos artigos nacionais encontrados e adicionados à parte no portifólio, publicados em 2017 e 2020. Isso demonstra que os PCMs estão começando a ganhar atenção no Brasil e que mais estudos precisam ser desenvolvidos para avaliar seu desempenho em regiões de clima ameno do país.

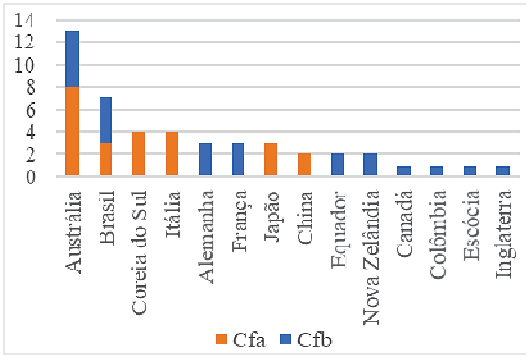

Figura 2 - Representatividade dos países no portifólio

Em suma, o uso de PCM em edificações localizas no clima Cfa propiciou maiores benefícios durante os meses mais quentes, com maior redução das cargas de resfriamento. Por outro lado, nas cidades de clima Cfb, o PCM foi mais eficaz nos meses mais frios, reduzindo em maior parte as cargas de aquecimento (MARIN *et al.*, 2016). No estudo de Nghana e Tariku (2016), por exemplo, a instalação de PCM nas paredes externas de um edifício gerou impacto desprezível no conforto térmico durante o verão de Vancouver (Cfb). No entanto, o PCM foi capaz de economizar energia de aquecimento em até 57% nas demais estações, principalmente no inverno, época de maior demanda energética na edificação.

No entanto, o contrário aconteceu no estudo de Alam *et al.* (2014): o PCM apresentou baixa eficácia na economia de energia durante o verão em cidades de australianas de clima Cfa, enquanto que em cidades de clima Cfb, a baixa eficácia ocorreu durante o inverno. Isso demonstra que, para comparar os resultados entre diferentes regiões climáticas, outros fatores geográficos e climáticos também devem ser levados em consideração, como altitude, irradiância solar, perfil do vento, intensidade da precipitação, nebulosidade e temperaturas extremas diárias (SAFFARI *et al.*, 2017b).

4.2. Lente 2: Modelo da edificação

Segundo Lamberts *et al.* (2014), a forma arquitetônica pode influenciar significativamente nas condições de conforto térmico e no consumo de energia de uma edificação.

O estudo de Nghana e Tariku (2016) demosntrou que o aumento da exposição solar e da ventilação pode influenciar significativamente no desempenho do PCM, de modo a tornar necessária a otimização da área de envidraçamento e orientação solar do edifício para permitir que a flutuação da temperatura interna esteja dentro da faixa de temperatura de fusão do PCM.

Modelos reais de uma edificação são necessários para prever a real economia de energia pelo uso de PCM. No estudo de Alam *et al.* (2014), por exemplo, a aplicação PCM no teto um modelo simplificado foi capaz de reduzir o consumo de energia em até 23% em Sydney (Cfa) e 19% em Melbourne (Cfb). No entanto, ao considerar uma edificação real, essa redução caiu para 10% e 3%, respectivamente. Por outro lado, modelos simplificados podem ser utilizados na otimização do PCM para gerar maior economia de energia, bem como para analisar fatores que podem influenciar na sua eficácia (ALAM *et al.*, 2014).

4.3. Lente 3: Peso da construção

O acréscimo de PCM na construção aumenta substancialmente a inércia térmica dos ambientes, o que contribui para a redução da amplitude térmica diária e da temperatura máxima do ar interno (BRITO *et al.*, 2017). No entanto, nem sempre o aumento da massa térmica pode ser benéfico em relação ao conforto térmico e ao consumo de energia (CABEZA; CHÀFER, 2020).

A maioria dos estudos deste portifólio avaliou o uso de PCM em edifícios pesados, os quais já apresentam inércia térmica significativa. Assim, ocorreram casos em que o conforto térmico na edificação durante o verão foi pouco afetado pela capacidade de armazenamento térmico adicional propiciada pelos PCMs. No estudo de Brito *et al.* (2017), a aplicação de PCM na envoltória de concreto minimizou a temperatura máxima do ar interno em até 1,5 °C em São Paulo (Cfb), enquanto essa redução foi de até 5,9 °C quando aplicado em sistemas construtivos leves. No estudo de Auzeby *et al.* (2016), a eficácia do PCM em edifícios leves do Reino Unido (Cfb) também foi maior que em edifícios pesados. Além disso, Zhang *et al.* (2017) demonstraram a necessidade de combinar PCM com ventilação mecânica em edifícios pesados na China (Cfa) para que o calor acumulado interno fosse efetivamente liberado.

Por outro lado, edificações com alto nível de isolamento térmico podem necessitar mais de PCMs durante o verão do que aquelas com pouco isolamento (AUZEBY *et al.*, 2016). Além disso, grande parte dos estudos em edifícios pesados apresentou benefícios devido ao PCM, mostrando a importância de avaliar o seu desempenho real na edificação para possibiliar que o seu uso seja coerente (SOARES *et al.* (2013).

4.4. Lente 4: Características do PCM

Para Zhang *et al.* (2007), o PCM ideal deve apresentar estabilidade físico-química, baixo custo, segurança ao usuário, alta condutividade térmica, alta capacidade de armazenamento de calor latente e temperatura de fusão dentro da faixa de conforto. A análise desses aspectos é essencial para selecionar um PCM adequado aos requisitos de sua aplicação, sendo os dois últimos os fatores determinantes de seu desempenho térmico (GRACIA; CABEZA, 2015; BRITO *et al*., 2017).

Segundo Ramakrishnan *et al.* (2016), a temperatura de fusão do PCM deve ser 3 a 5 °C mais alta do que a temperatura média do ar externo para gerar maior eficácia no conforto térmico, o que está em acordo com o encontrado nos demais estudos. De maneira geral, em cidades com maior demanda por resfriamento (Cfa), a temperatura ideal de fusão do PCM foi mais alta (entre 23 e 27 °C), enquanto em climas dominantes por aquecimento (Cfb), o PCM apresentou temperaturas de fusão mais baixas (entre 20 e 22 °C). Segundo Saffari *et al*. (2017b), isso ocorre porque, em climas frios com maior demanda por aquecimento, um PCM ideal necessita ter temperatura de fusão mais baixa para ser efetivamente derretido e solidificado pelo calor solar. Apesar disso, em alguns estudos, algumas cidades de clima Cfb apresentaram temperaturas de fusão do PCM mais altas (entre 24 e 26,6 °C). Segundo Saffari *et al*. (2017b), isto pode ser devido à elevação, radiação solar e perfil do vento destas cidades, além dos níveis de massa térmica e isolamento térmico da edificação.

A eficácia de diferentes faixas de fusão do PCM varia com as estações do ano, de modo que a seleção do PCM ideal para economia de energia deve ser feita com base na maior demanda de climatização do edifício, seja por aquecimento ou resfriamento (ALAM *et al.*, 2014). No estudo de Brandalise *et al.* (2020), por exemplo, o PCM a 22 °C propiciou melhores condições de conforto térmico no inverno de Santa Maria (Cfa), enquanto o PCM a 25 °C foi o a mais indicado para uso no verão, o que pode ser devido à grande amplitude térmica do município ao longo do ano.

No estudo de Brito *et al.* (2017), os melhores resultados para conforto térmico durante o verão nas Zonas Bioclimáticas brasileiras 1 a 5 foram obtidos pelo aumento do ponto de fusão do PCM para 30°C e da capacidade de armazenamento térmico latente para 1260 kJ/m² (pelo aumento da sua espessura). Por outro lado, pontos de fusão mais baixos poderiam ser adotados, desde que a capacidade de armazenamento térmico latente do PCM fosse maior que 315 kJ/m² (BRITO *et al*., 2017).

A este respeito, em Brisbane (Cfa), Saffari *et al*. (2017b) verificaram que ao dobrar a espessura do painel de PCM, a economia total de energia na edificação aumentou de 6,9% para cerca de 10%, sem alteração do ponto de fusão ótimo do PCM. Soares *et al.* (2014) e Ramakrishnan *et al.* (2017) também observaram aumento do potencial de conforto térmico e economia de energia pelo aumento da espessura da camada de PCM em todas as condições de aplicação e climas considerados. Por outro lado, para uma mesma quantidade de volume de PCM, Alam *et al.* (2014) constataram que a eficácia do PCM aumenta com a diminuição da sua espessura e com o aumento da área superficial até um nível ótimo. Segundo Alam *et al.* (2014), isto se deve ao aumento da taxa de transferência de calor gerada entre o PCM e a zona, melhorando a eficiência dos ciclos de derretimento e solidificação do PCM ao longo das variações de temperatura.

4.5. Lente 5: Superfície(s) de instalação

O PCM tem sido comumente aplicado às superfícies internas e externas de paredes, tetos, telhados e pisos. No estudo de Auzeby *et al.* (2016), a aplicação de PCM em paredes externas e divisórias internas apresentou desempenho muito melhor do que em tetos, pisos e telhados. Por outro lado, no estudo de Ji *et al.* (2018), a maior economia de energia foi obtida pelo uso do PCM no telhado devido à maior radiação solar.

Na grande maioria dos estudos, o PCM foi adicionado à superfície interna desses elementos. Por outro lado, a aplicação de PCM na camada mais externa pode ser eficaz para as condições de conforto térmico de edificações em climas mais quentes, conforme demonstrado por Ji *et al.* (2018) e Beltran e Martinez-Gomez (2019), Brandalise *et al.* (2020) e Park *et al*. (2020). Dessa forma, o PCM pode auxiliar mais facilmente à dissipar o calor durante a noite, segundo Saffari *et al*. (2017b).

Quanto aos tipos de elementos construtivos com PCM adotados, um número considerável da literatura foi publicado sobre o uso de mantas de BioPCM macrencapsulado (Figura 3), devido à sua origem orgânica de fonte renovável e fácil instalação. A utilização de placas de gesso com parafina microencapsulada (Figura 4) também se destacou devido à sua alta contribuição na economia de energia de resfriamento, facilidade de instalação e por serem mais baratas. Uma quantidade considerável de estudos avaliou o uso de containers metálicos preenchidos por PCM macroencapsulado (Figura 5). Além disso, alguns estudos avaliaram painéis de alumínio, argamassa, concreto e gesso contendo PCM de forma estabilizada impregnados em polímeros, agregados leves ou em nanoplacas de grafite. Cerca de 52% dos estudos avaliaram o emprego de parafinas, 41% o uso de ácidos graxos e apenas 7% o uso de sais hidratados.



Figura 3 – Inclusão de BioPCM™ na parede (NGHANA; TARIKU, 2016)

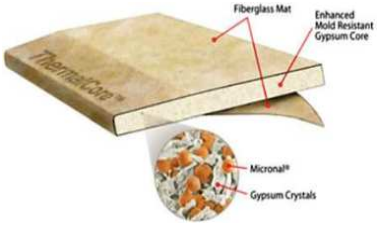

Figura 4 – *National Gypsum ThermalCORE*® - Painel de gesso contendo PCM microencapsulado (ZHOU *et al.*, 2012)

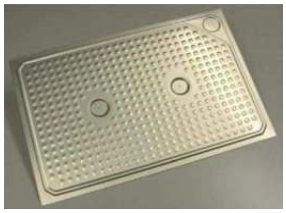

Figura 5 – Rubitherm® CSM – PCM macroencapsulado em módulo de alumínio (RUBITHERM, [20--?])

4.6. Lente 6: Efeito do PCM

A maioria dos estudos investigou o efeito do PCM na economia de energia da edificação e a influência de parâmetros de projeto na sua eficácia. De modo geral, o emprego de PCM na envoltória de residências foi benéfico para as condições de conforto térmico e a economia de energia em quase todas as regiões analisadas. Fato que demonstra o potencial de aplicação desses materiais no clima subtropical brasileiro e a necessidade de otimização do PCM para a obtenção de melhor custo-benefício.

Em Santa Maria (Cfa), o uso de PCM nas paredes externas foi capaz de aumentar as temperaturas mínimas internas em até 3,67 °C no inverno e reduzir as temperaturas máximas em até 1,76 °C no verão (BRANDALISE *et al.*, 2020). Em Porto Alegre (Cfa), o PCM reduziu a quantidade de dias em desconforto térmico na edificação em até 7,49% (FILIPPINI *et al.*, 2020). Em São Paulo e Curitiba (Cfb), o uso de PCM na envoltória poderia reduzir a temperatura máxima do ar interno entre 1,1 e 5,9 °C (BRITO *et al.*, 2017).

Vários autores enfatizaram a importância do uso de ventilação para potencializar os processos de descarga-carga de calor armazenado pelo PCM e maximizar a economia de energia. No estudo de Pons e Stanescu (2017), o emprego de PCM na parede externa de um escritório reduziu o consumo anual de energia em cerca de 2% em Curitiba e São Paulo (Cfb) e de 4,8% em Santa Maria (Cfa). Por outro lado, com o uso de ventilação forçada, essa redução alcançou valores entre 40% e 46%. Na Itália (Cfa), o PCM com 26 °C de temperatura de fusão foi capaz de reduzir as cargas anuais de resfriamento em até 1,2%, enquanto que essa redução foi de até 59,3% pelo uso de ventilação natural noturna e de até 84,5% pelo uso ventilação controlada por temperatura (PISELLI *et al.*, 2020). No entanto, a ventilação mecânica excessiva também consome uma grande quantidade de energia, tornando necessário otimizar o período e intensidade de ventilação de acordo com a tarifa de energia local (ZHANG *et al.*, 2017).

Poucos estudos avaliaram a viabilidade econômica e ambiental do PCM na edificação. Na Austrália, Mohseni e Tang (2021) mostraram que o PCM poderia gerar uma economia de energia de até 38%, com um tempo de retorno viável de 16,6 anos, e reduzir as emissões de CO_2 na atmosfera em até 264 toneladas em 50 anos. No estudo de Ramakrishnan *et al.* (2016), o menor período de retorno foi de 31 a 35 anos. Quanto ao impacto de mudanças climáticas, Alam *et al.* (2014) demonstram a necessidade considerar projeções climáticas futuras na otimização do ponto de fusão do PCM em locais de climas mais quentes, como Sydney

(Cfa). Por outro lado, segundo Auzeby *et al.* (2016), os PCMs poderão beneficiar todas as regiões do Reino Unido (Cfb) em 2050, reduzindo a ocorrência de superaquecimento a um nível aceitável de até 10%.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisao sistemática da literatura quanto à aplicação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) em simulações térmicas computacionais no EnergyPlus para a melhoria do desempenho térmico de residências localizadas em clima temperado úmido. A metodologia de pesquisa aplicada foi o Proknow-C, permitindo a garantia de um portifólio que representassem o estado da arte nesta temática.

A partir da análise da literatura, verificou-se que a maioria dos estudos está preocupada com o efeito do PCM na economia de energia na edificação e a influência de parâmetros na sua eficácia. Este trabalho também demonstrou que, apesar da temática ser ainda recente no Brasil, existem vários estudos que podem direcionar o desenvolvimento de pesquisas relativas à simulação termoenergética de edifícios com a aplicação de PCM como estratégia de controle passivo da temperatura.

Por meio da análise das lentes de pesquisa, verificou-se que a aplicação de Materiais de Mudança de Fase tem grande potencial de melhorar as condições de conforto por frio e calor nas condições climáticas do Sul e parte do Sudeste do Brasil. No entanto, com base nos resultados menos satisfatórios ocorridos para modelos construtivos pesados, levanta-se como hipótese inicial a necessidade de modificar os sistemas de vedação de edificações brasileiros, predominantemente de alvenaria cerâmica e de concreto, por modelos construtivos mais leves para aumentar a eficácia do PCM.

Este estudo proporcionou, portanto, contribuição acadêmica, ao explorar a aplicabilidade e os benefícios da utilização de PCM em climas semelhantes aos do Sul e parte do Sudeste do Brasil. Espera-se que o mesmo possa continuar a ser expandido para promover a sensibilização do mercado para o uso desta tecnologia promissora no território nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. **Solar Energy**, [*S.l.*], v. 30, n. 4, p. 313-332, jan. 1983. Elsevier BV.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**. Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, [*s.l.*], v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. FapUNIFESP (SciELO).

AKEIBER, H.; NEJAT, P.; MAJID, M. Z. A.; WAHID, M. A.; JOMEHZADEH, F.; FAMILEH, I. Z.; CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R.; ZAKI, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s.l.*], v. 60, p. 1470-1497, july 2016. Elsevier BV.

ALAM, M.; JAMIL, H.; SANJAYAN, J.; WILSON, J., John. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. **Energy and Buildings**, [*s.l.*], v. 78, p. 192-201, aug. 2014. Elsevier BV.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dec. 2013. Schweizerbart.

AUZEBY, M; WEI, S; UNDERWOOD, C; TINDALL, J; CHEN, C.; LING, H.; BUSWELL, R. Effectiveness of Using Phase Change Materials on Reducing Summer Overheating Issues in UK Residential Buildings with Identification of Influential Factors. **Energies**, [*s.l.*], v. 9, n. 8, p. 605, 1 aug. 2016. MDPI AG.

BELTRAN, R D.; MARTINEZ-GOMEZ, J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. **Journal of Building Engineering**, [*s.l.*], v. 24, p. 100726, july 2019. Elsevier BV.

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

BRASIL; EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2020**: ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

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**, [*s.l.*], v. 17, n. 1, p. 125-145, jan./mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

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

CUI, Y.; XIE, J.; LIU, J.; WANG, J.; CHEN, S. A review on phase change material application in building. **Advances in Mechanical Engineering**, [*s.l.*], v. 9, n. 6, p. 1-15, june 2017. SAGE Publications.

EENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. O; TASCA, J. E. **ProKnow-C, Knowledge Development Process – Construtivist**. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil, 2010.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. **Orientações para elaboração dos artigos científicos do LabMCDA-C**: apostila da disciplina avaliação de desempenho do programa de pós-graduação em engenharia de produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2007.

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

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

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

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap**: energy efficient building envelopes. Paris: IEA, 2013. 64 p.

JI, R.; ZOU, Z.; CHEN, M.; ZHENG, Y.; QU, S. Numerical assessing energy performance for building envelopes with phase change material. **International Journal of Energy Research**, [*s.l.*], v. 43, n. 12, p. 6222-6232, 27 dec. 2018. Wiley.

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

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

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

MARIN, P.; SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M. M., CABEZA, L. F., USHAK, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, [*s.l.*], v. 129, p. 274-283, oct. 2016. Elsevier BV.

MARTINS, C. S.; AZEVEDO, R. C. Selection and Analysis of Bibliographical Research Set of Disaster Risk Assessment Using ProKnow-C. **International Journal of Science and Engineering Investigations**, [*s.l.*], v. 7, n. 82, nov. 2018.

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

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

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

PARK, J. H.; LEE, J.; WI, S.; JEON, J.; CHANG, S. J.; CHANG, J. D.; KIM, S. Optimization of phase change materials to improve energy performance within thermal comfort range in the South Korean climate. **Energy and Buildings**, [*s.l.*], v. 185, p. 12-25, fev. 2019. Elsevier BV.

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

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

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

PONS, V.; STANESCU, G. Materiais com mudança de fase: análise de desempenho energético para o brasil. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [*s.l.*], v. 8, n. 2, p. 127, jun. 2017. Universidade Estadual de Campinas.

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

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

RUBITHERM (Berlin). **Products**. [20--?]. Disponível em: https://www.rubitherm.eu/en/. Acesso em: 5 maio 2021.

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

SAFFARI, M; DE GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, C.; CABEZA, L. F. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, [*s.l.*], v. 202, p. 420-434, sept. 2017b. Elsevier BV.

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

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

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

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VAUTHEROT, M.; MARÉCHAL, F.; FARID, M. M. Analysis of energy requirements versus comfort levels for the integration of phase change materials in buildings. **Journal of Building Engineering**, [*s.l.*], v. 1, p. 53-62, mar. 2015. Elsevier BV.

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFETMG) pelo auxílio técnico e financeiro prestados ao desenvolvimento deste trabalho.