

Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: revisão integrativa de literatura

Phase change materials in building systems: an integrative literature review

Matheus Menezes Oliveira 

Caio de Carvalho Lucarelli 

Joyce Correna Carlo 

Resumo

Os materiais de mudança de fase – *phase change materials* (PCMs) possuem alta capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente e potencial para proporcionar conforto térmico aos usuários e economia de energia em edificações. Entretanto, muitos parâmetros devem ser analisados para sua escolha e utilização adequada. O objetivo deste artigo é discutir as potencialidades do uso de PCMs em sistemas construtivos a partir de uma revisão integrativa de literatura em repositórios nacionais e internacionais, identificando as classificações, critérios de seleção, incorporação, aplicação, tendências e lacunas das pesquisas. Foram encontradas 134 publicações, dentre as quais 103 representam o estado da arte nos últimos cinco anos. De maneira geral, as pesquisas encontradas demonstram que a utilização de PCMs em sistemas construtivos apresenta potencial para aumento das horas de conforto e redução do consumo de energia. As condições climáticas configuraram o parâmetro mais importante para a escolha adequada de PCMs, evidenciando a importância de pesquisas em regiões tropicais com clima quente e úmido, principalmente em baixas latitudes, como grande parte do Brasil. Também foi observado o enfoque crescente em pesquisas que utilizam simulações e otimizações multiobjetivo para avaliação simultânea dos diversos parâmetros envolvidos na associação de PCMs a sistemas construtivos.

Palavras-chave: Material de mudança de fase. Revisão integrativa. Inércia térmica. Estratégias passivas. Conforto térmico. Eficiência energética.

Abstract

Phase Change Materials (PCMs) have a high latent heat storage capacity and the potential to provide thermal comfort to users and energy savings in buildings. However, many parameters must be analysed for the adequate selection and application of these materials. This article discusses the potential of applying PCMs in construction systems based on an Integrative Literature Review of national and international publications, identifying the classification, selection, incorporation and application criteria, trends, and research gaps. The review covers 134 articles, 103 of which are state-of-the-art from the past five years. Most of the research studies examined demonstrate that using PCMs in constructive systems leads to increased comfort hours and lower energy consumption. Climate conditions proved to be the most crucial parameter for an adequate choice of PCMs, highlighting a gap in the research on tropical regions with hot and humid climates and low latitudes, such as a large portion of Brazil. This study also detected a significant growth in research using multi-objective simulations and optimisation to simultaneously evaluate the parameters involved in the association of PCMs and building systems.

Keywords: Phase change material. Integrative review. Thermal inertia. Passive strategy. Thermal comfort. Energy efficiency.

¹Matheus Menezes Oliveira

¹Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG - Brasil

²Caio de Carvalho Lucarelli

²Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG - Brasil

³Joyce Correna Carlo

³Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG - Brasil

Recebido em 05/11/21

Aceito em 02/02/22

Introdução

Edificações consomem mais de 40% da energia primária gerada no planeta e o uso de eletricidade em edifícios cresce em média 2,5% ao ano desde 2010. Em países em desenvolvimento, e sobretudo em locais de clima quente e parcialmente úmido, há uma demanda significativa para climatização de edificações comerciais com o intuito de proporcionar conforto térmico aos usuários (ÜRGE-VORSATZ *et al.*, 2015; INTERNATIONAL..., 2021). Nesse contexto, estratégias passivas de climatização possibilitam o aquecimento ou o resfriamento de ambientes sem acréscimos no consumo de energia elétrica.

Dentre as estratégias passivas de climatização, a inércia térmica é recomendada para edificações situadas em locais com grande amplitude diária da temperatura do ar externo e incidência de radiação solar intensa. Normalmente, edificações com alta capacidade térmica possuem envoltórias compostas por elementos construtivos espessos e pesados, recintos parcialmente enterrados, pequenas aberturas e elementos de sombreamento. Em oposição, edificações contemporâneas geralmente possuem baixa capacidade térmica por priorizarem o uso de fechamentos leves, devido às limitações econômicas e técnicas (BRITO, 2015). Sendo assim, o desempenho térmico de envoltórias exerce influência direta na manutenção das condições ambientais internas e no gasto de energia elétrica (NATEPHRA *et al.*, 2017).

Em situações em que se deseja aumentar a inércia térmica de ambientes com fechamentos leves, a literatura sugere como uma das opções o uso de materiais inteligentes. Esses materiais, também conhecidos como ativos, adaptativos ou multifuncionais (em inglês *smart materials*), com alto desempenho e propriedades diversas, são capazes de gerar respostas para estímulos externos como temperatura, pressão, umidade e outros (FERREIRA; NÓVOA; MARQUES, 2016).

Nessa classificação, os materiais de mudança de fase (em inglês *phase change materials* – PCMs) funcionam como elementos passivos integrados ou adicionados a componentes construtivos das edificações. Em sua forma original, possuem alta capacidade de armazenamento de energia em calor latente e potencial para promover atraso térmico e amortecimento da amplitude da temperatura do ar interno em relação à amplitude do ar externo. Comparados a componentes construtivos tradicionalmente associados a alta capacidade térmica, como materiais rochosos e argila, os PCMs possuem baixos volume e massa para capacidades térmicas equivalentes. Dessa forma, quando adequadamente empregados, podem promover melhoria do desempenho térmico, aumento das horas em que os usuários sentem conforto e redução da necessidade de climatização artificial (WAHID *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2018).

De acordo com Brito *et al.* (2017), a incorporação de PCMs a componentes construtivos é mais expressiva no Hemisfério Norte, e principalmente em altas latitudes, a despeito do maior gasto de energia em relação aos climas quentes e úmidos.

Destaca-se, nesse contexto, os artigos que apresentam revisões de literatura com foco no uso de PCM em edificações com uma compilação média de mais de 100. Esses estudos proporcionam ao leitor/pesquisador uma visão global do tema que é especialmente interessante em etapas iniciais de pesquisa. Dentro do tema PCM e edificações, podem ser encontrados artigos de revisão mais abrangentes, que apresentam o material, suas propriedades e aplicações (ZALBA *et al.*, 2003; SHARMA *et al.*, 2007; BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010; KALNÆS; JELLE, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019; MARANI; NEHDI, 2019) ou mais específicos:

- (a) com foco na eficiência energética (CUNHA; AGUIAR, 2020);
- (b) PCMs para resfriamento ou em climas quentes (WAHID *et al.*, 2017; OROPEZA-PEREZ; ØSTERGAARD, 2018; FARAJ *et al.*, 2020; OLIVEIRA; GONZALES; CARVALHO, 2021);
- (c) PCM em argamassas (FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019);
- (d) PCMs em paredes (MEMON, 2014; CUI *et al.*, 2015);
- (e) sistemas envidraçados (LI *et al.*, 2020a); e
- (f) pesquisas em PCM a partir de simulação (SAFFARI *et al.*, 2017).

Embora apresentadas as vantagens desse tipo de publicação, o comum em todos estudos, com exceção de Oliveira, Gonzáles e Carvalho (2021), é a inexistência de procedimentos metodológicos bem descritos e replicáveis. Todos os artigos mencionados não apresentam seções destinadas aos procedimentos metodológicos, limitando-se a indicar o estudo como revisão no título, resumo, objetivos ou conclusão. Em alguns poucos casos a palavra revisão é acompanhada por um substantivo, como “*literature*”, “*state-of-the-art*”, “*comprehensive*”, “*extensive*” ou “*critical*”, que são genéricos e insuficientes para compreensão da abordagem metodológica proposta.

Portanto, o objetivo deste artigo é identificar e discutir as características, potencialidades, restrições, aplicações e propriedades dos PCMs empregados em sistemas construtivos, a partir de uma metodologia estruturada e replicável para condução de uma revisão integrativa de literatura. Também faz parte do objetivo deste trabalho apresentar o estado da arte das aplicações de PCMs em sistemas passivos de acordo com o tipo de envelope construtivo utilizando tabelas resumo, além do mapeamento e análise crítica da rede de coautores, palavras-chave e distribuição geográfica das pesquisas.

Método

O método adotado neste trabalho consiste em uma revisão integrativa de literatura com definição do estado da arte e revisão bibliométrica¹. A abordagem integrativa é normalmente utilizada em revisões de literatura nas áreas das ciências da saúde (MAHMUD *et al.*, 2021) e ciências agrárias (BASSOTTO *et al.*, 2022) e é uma das maneiras de gerar novos conhecimentos sobre determinado tema a partir de uma revisão crítica e sintética das publicações e pesquisas representativas de uma forma integrada. Além disso, ela fomenta novas estruturas e perspectivas sobre assuntos específicos (TORRACO, 2016).

Uma revisão integrativa inclui pesquisas com diferentes metodologias e escopos, o que permite que estudos teóricos e empíricos gerem uma amostra maior, ampliando as análises e fornecendo conclusões diversificadas (MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008). Revisões integrativas são recomendadas para a investigação de temas dinâmicos ou emergentes, caracterizados por um aumento rápido no número de produções em que muitas vezes são encontradas contradições ou discrepância entre as publicações (TORRACO, 2016).

Embora apresentadas as vantagens dessa abordagem metodológica, não foram encontradas revisões integrativas de literatura em periódicos nacionais ou internacionais sobre assuntos relacionados a PCMs. Pelo fato das pesquisas em PCMs serem um tema em crescente investigação e que apresentam resultados divergentes, justifica-se a aplicação dessa metodologia.

O fundamento de uma revisão integrativa é sua sistematização em tópicos ou etapas de análise. Autores como Souza, Dias e Carvalho (2010) dividem a revisão em seis tópicos, enquanto Mendes, Silveira e Galvão (2008) e Whittemore e Knafl (2005) dividem em cinco. O conteúdo das etapas apresentadas pelos autores citados é essencialmente o mesmo. Portanto, a diferença no número de etapas ocorre pela junção ou divisão de alguns dos seguintes tópicos:

- (a) identificação do tema, seleção da questão de pesquisa e da base de dados;
- (b) estabelecimento de critérios de busca, inclusão e exclusão;
- (c) definição das informações que foram extraídas dos estudos;
- (d) forma de apresentação e agrupamento dos resultados; e
- (e) interpretação dos resultados.

Na primeira etapa (a), de identificação do tema, seleção da questão de pesquisa e da base de dados, foi definido como objeto levantar e analisar as principais publicações sobre PCMs em sistemas construtivos.

Portanto, elabora-se a seguinte pergunta de pesquisa: quais as características, potencialidades, restrições, aplicações, abordagens metodológicas e propriedades do uso de PCMs em sistemas passivos em edificações?

Essa seleção e pergunta de pesquisa partem do raciocínio teórico adquirido ao longo de leituras prévias que seguiram abordagens semelhantes, como Baetens, Jelle e Gustavsen (2010), Rodriguez-Ubinas *et al.* (2012), Memon (2014), Kalnæs e Jelle (2015), Jelle e Kalnæs (2017) e Faraj *et al.* (2020).

Como base de dados, foi escolhida a biblioteca virtual Periódicos Capes, disponibilizada gratuitamente para as instituições públicas de ensino superior pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e pelo Ministério da Educação.

Justifica-se a escolha do Periódicos Capes por conter um amplo catálogo de publicações em periódicos nacionais e internacionais, dissertações e teses, compilando pesquisas que aparecem em diretórios como Google Scholar, Scopus, SciELO e outros indexadores. O uso de uma única plataforma apresentou vantagens como o número reduzido de resultados duplicados e análise concomitante de pesquisas em inglês

¹De acordo com Allison (2013) e Mustapha *et al.* (2021), uma análise bibliométrica apresenta informações críticas para a compreensão de estudos, incluindo rede de autores, grupos de pesquisa, atividade de pesquisa de acordo com a localização geográfica e principais instituições de pesquisa.

e português. Como limitação, o Periódicos Capes permite menos critérios de seleção de pesquisa, reduzindo o número de termos e operadores booleanos em cada pesquisa, gerando *strings de busca*² mais simplificadas.

Na segunda etapa (b) são estabelecidos os critérios de busca, inclusão e exclusão. Foram considerados artigos de periódicos e anais de congresso nacionais e internacionais revisados por pares, além de pesquisas em andamento ou finalizadas. Foram descartadas teses e dissertações devido à duplicidade de informações, já que todas encontradas possuíam publicações em periódicos. Também foram descartadas publicações em anais quando existiam correspondência entre o trabalho apresentado em congresso e posteriormente publicado em periódicos. De forma semelhante, publicações em livros não foram selecionadas ou tabuladas como estado da arte. Contudo, a construção teórica da pesquisa e o entendimento do objeto de pesquisa se embasaram em publicações teóricas também presentes nos livros dos principais pesquisadores na área de PCMs.

Foram consideradas publicações em inglês e em português com recorte temporal de 2016 a 2021. Após uma análise inicial, percebeu-se que artigos selecionados publicados em 2016 pertenciam a uma sequência de artigos que contemplavam pesquisas maiores, datando de antes de 2016. Essas publicações anteriores a 2016 traziam informações fundamentais para o entendimento das pesquisas e, por esse motivo, foram incluídas manualmente em regime de exceção.

Com a finalidade de estabelecer as principais bases de dados, palavras-chave recorrentes e as lacunas nas pesquisas em PCM uma análise anterior a este estudo foi conduzida, utilizando os artigos de revisão já mencionados anteriormente. Logo, foram selecionadas as seguintes palavras-chave para compor as *strings* de pesquisa:

- (a) materiais de mudança de fase;
- (b) PCM;
- (c) inércia térmica;
- (d) edificações;
- (e) arquitetura; e
- (f) sistemas passivos.

As palavras-chave foram inseridas em inglês e português, de maneira individual e combinada com auxílio dos operadores booleanos: AND, OR e NOT para pesquisas em inglês, e, OU e NÃO para pesquisas em português. Termos compostos foram inseridos entre aspas duplas e acentos, cedilhas e palavras não indexadas foram excluídas. Para os termos “materiais” e “edificações” foi utilizado um asterisco para buscas de palavras semelhantes com qualquer número de caracteres.

O termo “sistemas passivos” foi inicialmente incluído nas *strings* de pesquisa. Porém, após as primeiras tentativas de busca, percebeu-se que o termo não resultava efetivamente em uma filtragem dos resultados. Muitos autores não classificam os sistemas como passivos ou ativos, o que gerou aumento de complexidade e número de buscas sem resultados efetivos.

Logo, a seleção de artigos que avaliaram sistemas passivos foi feita de forma individualizada e manualmente, após a leitura das publicações obtidas a partir das *strings* descritas a seguir. Devido à limitação de caracteres, foram utilizadas *strings* múltiplas, relacionando diferentes termos secundários (i.e., arquitetura e edificações), mantendo os termos principais (i.e., relacionados aos PCMs).

Foram construídas as seguintes *strings* de pesquisa em inglês: (TITLE-ABS-KEY (phase OR "change*" OR "material") AND (thermal inertia) AND (build*)); (TITLE-ABS-KEY (pcm*) AND (thermal inertia) AND (build*)); (TITLE-ABS-KEY (phase OR "change*" OR "material") OR (thermal inertia) AND (architecture)); (TITLE-ABS-KEY (pcm*) AND (thermal inertia) AND (architecture*)).

Para buscas em português: (TITLE-ABS-KEY (material* OU "mudanca" OU "fase") E (inercia termica) E (edifica*)); (TITLE-ABS-KEY (pcm*) E (inercia termica) E (edifica*)); (TITLE-ABS-KEY (material* OU "mudanca" OU "fase") E (inercia termica) E (arquitetura)); (TITLE-ABS-KEY (pcm*) E (inercia termica) E (arquitetura)).

Uma *search string* (*strings* de busca neste trabalho) é a combinação dos termos de interesse para a pesquisa, agrupados por temas e inter-relacionados utilizando operadores booleanos. As *strings* são inseridas nos mecanismos de pesquisa das bases de dados a fim de retornar resultados que respondam o objetivo da pesquisa.

Na opção “Personalizar meus resultados” disponível no Periódicos Capes, foram determinadas as seguintes restrições: ordenar por “Data – Mais recente”; disponibilidade “Periódicos revisados por pares”; tipo de recurso “Artigos”; Assunto “todas as opções”; data de criação “01/01/2016 a 31/12/2021”; coleção “todas as opções”; idioma “Inglês” e “Português”; título do periódico, “todas as opções”. Além disso, o campo filtro das buscas foi deixado em “qualquer campo”, o que permitiu pesquisas em títulos, autores/criadores e assuntos.

Após a leitura dos títulos, palavras-chave e resumos, foram excluídas eventuais publicações duplicadas e pesquisas que não possuíssem relação com os temas de interesse ou estivessem em outro idioma, mesmo que o resumo estivesse em inglês. Como exemplo, foram encontrados e excluídos estudos de PCM em tecidos, roupas de proteção individual, produtos hospitalares, recipientes de transporte de alimentos e fármacos, PCMs em sistemas e componentes eletrônicos, PCMs aplicados em equipamentos ou maquinários industriais e desenvolvimento de novos PCMs ou novas formas de armazenamento e encapsulamento ainda sem aplicação avaliada para construção civil.

Após essa etapa de exclusão, os artigos foram lidos na íntegra e organizados e sintetizados utilizando o *software* Excel. Nessa etapa foram feitas inclusões manuais de artigos que se repetissem mais de três vezes entre os estudos encontrados, além de estudos continuados fora dos cinco anos do escopo.

Na terceira etapa (c) foram definidas quais informações seriam extraídas das publicações. O fator norteador dessa seleção foi a identificação de propriedades do PCM e características de instalação conflitantes apresentadas como melhores soluções nos respectivos artigos. Por esse motivo buscou-se entender os fatores, condicionantes e procedimentos metodológicos que levaram aos resultados encontrados.

Logo, foram selecionadas como informações extraídas:

- (a) os autores;
- (b) tipo de PCMs estudados;
- (c) forma de incorporação;
- (d) temperatura de mudança de fase;
- (e) capacidade de armazenamento de calor latente;
- (f) abordagem metodológica;
- (g) local de instalação do PCM no sistema construtivo;
- (h) localização geográfica do estudo; e
- (i) principais resultados e conclusões.

Na quarta etapa (d) foi definida a forma de apresentação e agrupamento dos resultados. Os estudos foram classificados e divididos a partir do tipo de sistema construtivo investigado nas respectivas publicações. Essa divisão se deu em dois grupos, o primeiro classificado com sistemas construtivos opacos e o segundo com sistemas construtivos translúcidos e outros sistemas/dispositivos.

Em relação ao primeiro grupo, a revisão contemplou estudos com PCMs em paredes externas, internas, divisórias, coberturas e envoltórias no geral. Embora apresentados resultados de paredes e coberturas separadamente, a criação da categoria “Envoltória” se deu pela combinação do uso de PCMs em mais de um sistema construtivo concomitantemente, geralmente paredes e lajes. Soma-se à justificativa anterior o entendimento de que as características térmicas e o desempenho com incorporação de PCMs nos ambientes classificados como “Envoltória” é diferente dos classificados como “Paredes” ou “Coberturas”.

No segundo grupo foram considerados PCMs em fechamentos translúcidos (esquadrias e coberturas envidraçadas), persianas, venezianas, brises, fachadas duplas, chaminés solares e paredes trombe.

A partir da classificação mencionada e das informações extraídas na terceira etapa (c), foram criadas cinco tabelas referentes à incorporação de PCMs, apresentadas em “PCMs em componentes construtivos”.

É importante destacar que parte dos artigos não apresentou todas as informações levantadas. Nesses casos, os campos foram deixados em branco ou completados parcialmente com as informações disponibilizadas.

Na quinta etapa (e) de interpretação dos resultados, os artigos foram discutidos, comparados e os principais resultados foram apresentados. Também foram discutidas as concordâncias e discordâncias entre as pesquisas, em que foram analisadas informações baseadas nas diferentes abordagens, climas e métodos adotados por cada estudo.

Nessa etapa foi utilizado o *software* VOSviewer, versão 1.6.1.7, para elaborar uma análise bibliométrica parcial e posteriormente agrupar as redes de autores, coautores e de palavras-chave. O objetivo dessa análise bibliométrica foi identificar a relação entre os autores e palavras-chave na busca por artigos em uma revisão integrativa.

O programa utiliza uma base de dados .ris exportada do *software* de gestão de referências bibliográficas Mendeley. O VOSviewer elabora organogramas que apresentam a frequência com a qual os autores aparecem e suas conexões como coautores de diferentes publicações. De forma semelhante, as palavras-chave são destacadas e conectadas a partir da frequência de ocorrência. O agrupamento ainda considera palavras-chave relacionadas por estudo. Logo, quanto mais publicações de determinado autor ou quanto maior a frequência em que palavras-chave se repetem, maior será o tamanho de sua fonte, e consequentemente, maior o destaque.

Para gerar a rede de palavras-chave foram selecionadas palavras com cinco ou mais ocorrências nos campos título, palavras-chave, e resumo utilizando a opção de contagem "*full counting*" que contabiliza o número de aparições de cada palavra. Para a rede de autores e coautores, foram selecionadas as coautorias utilizando o mesmo método de contagem das palavras-chave; o número de documentos por autor deveria ser de, no mínimo, dois.

A disposição dos nomes ocorreu pela normalização por associação de força, com configurações padrão para *layout* e *clusterings*. As cores dos dados foram configuradas no próprio programa a partir de composições já incluídas em sua biblioteca.

Ainda como parte da análise bibliométrica, foi elaborado um mapa com a distribuição geográfica e climática das pesquisas usando a classificação de Köppen-Geiger. As informações dos climas/cidades em que os PCMs foram estudados (medições ou simulações) foram levantadas na terceira etapa (c) e posteriormente localizadas em um *mapa-múndi* a partir das suas coordenadas geográficas.

Destaca-se que parte dos artigos investigou mais de uma condição climática e que na elaboração do mapa não foi considerada a frequência de ocorrência das cidades. Dessa forma, algumas cidades que foram mencionadas mais de uma vez nas tabelas resumo aparecem como uma marcação no mapa. Também foram observados estudos em laboratório que consideraram, por exemplo, uma temperatura de bulbo seco constante em ambiente teste controlado, em que não foi apresentado nenhuma característica ou definição climática. Nesses casos, nenhuma condição climática foi atribuída para a publicação.

O *mapa-múndi* com as localizações geográficas foi então sobreposto pelo mapa com a classificação climática de Köppen-Geiger. Para essa sobreposição foi utilizada a versão de Peel, Finlayson e McMahon (2007). Dessa forma, foi possível analisar a distribuição geográfica dos estudos e entender em quais climas existem lacunas nas pesquisas com PCMs.

Referencial teórico

Os PCMs armazenam ou liberam energia na forma de calor latente durante a mudança de fase e podem ser utilizados para auxiliar no controle das condições térmicas ambientais dentro de uma faixa específica de temperatura (KALNÆS; JELLE, 2015). Quando a temperatura atinge o ponto de fusão, as ligações químicas no material começam a se romper e há absorção de energia em um processo endotérmico. Nesse processo, geralmente há a mudança do estado físico do PCM de sólido para o líquido. À medida que a temperatura do ar próxima ao PCM cai, o material libera a energia armazenada e retorna ao estado sólido original. Em edificações, a energia utilizada para alterar sua fase poderá levar a uma temperatura do ar interna mais estável e com maior potencial de proporcionar conforto térmico aos usuários. Esse efeito também pode reduzir as cargas de pico e o consumo energético com arrefecimento e aquecimento (KALNÆS; JELLE, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019).

O armazenamento de energia na forma de calor latente em PCMs é de 5 a 14 vezes maior por unidade de volume se comparado aos materiais tradicionalmente utilizados para essa finalidade na forma de calor sensível. Além disso, a mudança de fase, e por consequência parte significativa do armazenamento de energia, ocorre a uma temperatura praticamente constante. Devido a essas propriedades e à ciclicidade do material, os PCMs são utilizados para o armazenamento de energia térmica em diversas aplicações. Dentre elas, em edificações para redução do consumo de energia e aumento do conforto térmico dos usuários (HUANG *et al.*, 2017; WAHID *et al.*, 2017; BRITO *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2018).

Classificação dos PCMs

A maneira mais difundida de classificar PCMs é pela sua divisão em três grupos: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (PASUPATHY; VELRAJ; SEENIRAJ, 2008; KALNÆS; JELLE, 2015; WAHID *et al.*, 2017; RATHORE; SHUKLA, 2019; FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019; FARAJ *et al.*, 2020).

PCMs orgânicos consistem principalmente de cadeias de carbono e hidrogênio e podem ser divididos em parafinados e não parafinados. Os PCMs não parafinados podem ser classificados como ácidos graxos, polietilenoglicol, álcoois, polímeros e seus derivados (FARAJ *et al.*, 2020). Apresentam ponto de fusão constante, não apresentam segregação ou sobrefusão durante os ciclos de mudança de fase e produzem pouca pressão de vapor, com redução no volume de 10% durante a solidificação. Além disso, são quimicamente inertes, não corrosivos, incolores, duráveis, baratos, abundantes, ecológicos e atóxicos (WAHID *et al.*, 2017).

Podem apresentar baixo desempenho nas mudanças de fase devido à baixa condutividade térmica, mas essa desvantagem pode ser contornada com a utilização de elementos metálicos em sua composição (AZIZ *et al.*, 2018). Outra desvantagem ocorre ao atingirem temperaturas elevadas. Nessas condições, as ligações químicas podem ser quebradas e levar à evaporação das cadeias moleculares (WAHID *et al.*, 2017).

Os *PCMs inorgânicos* são subdivididos em dois grupos, os sais hidratados e os metálicos. Esses materiais apresentam níveis de armazenamento de calor latente semelhante aos PCMs orgânicos por unidade de massa, entretanto seu calor latente por unidade volumétrica tende a ser maior devido à maior densidade. Além disso, apresentam maior condutividade e não são inflamáveis. Os sais hidratados possuem temperaturas de fusão que variam de 5 °C a 130 °C, o que os torna ideais para aplicações na construção civil (KALNÆS; JELLE, 2015). Esse intervalo de temperatura de fusão não é encontrado em PCMs metálicos, fator que os exclui desse levantamento bibliográfico.

Os sais hidratados geralmente contêm alta densidade de armazenamento de calor latente, em grande parte devido à sua alta densidade. Esses materiais são compostos majoritariamente por um sal e água e compreendem diversas combinações de elementos. A mudança de fase envolve a hidratação ou desidratação dos sais em um processo que se assemelha à fusão e solidificação (SHARMA *et al.*, 2007). Como desvantagens, apresentam mudanças de fase não congruentes, instáveis e problemas relacionados a sobrefusão. Além disso, possuem alta pressão de vapor no processo de mudança de fase e são potencialmente corrosivos em contato com elementos metálicos (MEHLING; CABEZA, 2008).

Os *PCMs eutéticos* são compostos pela união de dois ou mais PCMs com ciclos de mudança de fase concordantes. Durante a sua fabricação, os dois materiais são combinados de maneira que o PCM final apresente comportamento de um material único (JELLE; KALNÆS, 2017). Essa categoria pode ser composta por misturas entre PCMs orgânicos, inorgânicos, e orgânicos e inorgânicos, o que possibilita arranjos personalizados para aplicações específicas (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

Embora haja aumento de pesquisas sobre PCMs eutéticos, seu uso em sistemas de armazenamento de calor latente não é difundido se comparado aos PCMs orgânicos e inorgânicos. Portanto, combinações de materiais ainda precisam ser testadas e suas propriedades termofísicas são um campo para novas investigações (KALNÆS; JELLE, 2015).

Utilização de PCMs em elementos construtivos

A forma de incorporação do PCM em elementos construtivos é um dos parâmetros mais importantes para garantir o seu desempenho térmico e energético em edificações. Como o PCM passa por mudanças de fase relativamente rápidas, na maior parte dos casos de sólido para líquido e de líquido para sólido, existem limitações em relação à sua incorporação direta. Essa complexidade também inclui parâmetros de projeto, como seleção da temperatura de mudança de fase do PCM, quantidade do material e localização do sistema de armazenamento de energia térmica dentro da edificação (RATHORE; SHUKLA, 2019). Além disso, as temperaturas de mudança de fase dos PCMs tendem a sofrer modificações quando utilizados junto aos materiais de construção (WAHID *et al.*, 2017).

Logo, a utilização dos PCMs na construção civil depende da sua classificação (orgânico, inorgânico e eutético), do seu princípio de funcionamento (ativo ou passivo) e da sua forma de incorporação em elementos construtivos (como componente, integrado ou como unidade de armazenamento).

O princípio de funcionamento *passivo* aproveita o ganho térmico da radiação solar direta e difusa, bem como os ganhos térmicos devido à carga térmica interna. Os PCMs utilizados em sistemas com princípio *ativo* utilizam energia térmica fornecida por equipamentos mecânicos (ZHOU; EAMES, 2019).

Quando o PCM faz parte de uma das camadas de um elemento construtivo, é classificado como *componente*. Por outro lado, quando o PCM é misturado ou impregnado a um material de construção, ele é classificado como *integrado*.

Para PCMs *integrados*, diversas técnicas podem ser aplicadas. A *incorporação direta* constitui a técnica mais simples, em que os PCMs em pó ou líquido são misturados diretamente aos materiais de construção que incluem, por exemplo, gesso e concreto. Esse método não requer nenhum equipamento adicional, porém pode acarretar em incompatibilidade entre os materiais construtivos e os PCMs e gerar possíveis vazamentos (WAHID *et al.*, 2017).

Na *imersão*, os materiais construtivos em estado sólido são imersos em PCMs líquidos para a absorção por capilaridade. Alguns estudos apontam que essa técnica também ocasiona vazamentos do PCM, o que prejudica seu uso de forma continuada (MEMON, 2014).

O PCM na *forma estabilizada* consiste em sua mistura com outros componentes de suporte. Nesse composto, as partículas de PCM na ordem de dezenas de micrômetros estão dispersas uniformemente em uma matriz polimérica. A concentração de PCM deve ser a mais alta possível, idealmente em torno de 80%. Como principais características, esses compostos apresentam a possibilidade de combinação entre PCMs e materiais de suporte de forma personalizada, de acordo com a necessidade do ambiente. Além disso, os PCMs estabilizados podem realizar vários ciclos de mudança de fase sem deformações ou vazamentos, possuem alta condutividade térmica e capacidade de armazenamento de calor (ZHANG *et al.*, 2006).

PCMs como *componentes* geralmente aparecem em formas encapsuladas. No *encapsulamento* (microencapsulamento e macroencapsulamento), o PCM é revestido com outro material antes de ser utilizado. Essa técnica é a mais utilizada em pesquisas (CUNHA; AGUIAR, 2020) e possui como vantagens alta resistência, durabilidade, estabilidade térmica, além de evitar vazamentos e perdas de PCM durante a mudança de fases (WAHID *et al.*, 2017).

Em geral, o material da cápsula deve conter as seguintes características:

- (a) alta condutividade térmica, resistência e flexibilidade;
- (b) atoxidade e não corrosividade;
- (c) resistência ao fogo;
- (d) estabilidade química e física; e
- (e) estabilidade à exposição de raios UV e umidade (RATHORE; SHUKLA, 2019).

O encapsulamento do PCM aumenta sua superfície de contato, melhora a transferência de calor e condutividade térmica. Logo, impede que o PCM entre em contato direto com o material de construção e o ambiente circundante, o que aumenta sua estabilidade (SU; DARKWA; KOKOGIANNAKIS, 2015; RATHORE; SHUKLA, 2019).

O encapsulamento do PCM pode ser classificado como microencapsulamento ou macroencapsulamento com base na dimensão do material do invólucro. O PCM microencapsulado, embora haja variação entre os autores, possui entre 0,1 μm e 1 mm. Já o macroencapsulamento possui dimensões maiores que 1 mm (WAHID *et al.*, 2017; RATHORE; SHUKLA, 2019).

PCMs na construção civil

Na construção civil os PCMs funcionam, quase sempre, como elementos passivos que aumentam a capacidade térmica de componentes e a inércia térmica de ambientes. Como exemplos de PCMs aplicados de forma ativa temos, por exemplo: sistemas fotovoltaicos, bombas de calor, sistemas de recuperação de calor e sistemas de aquecimento de piso (FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019).

A utilização de PCMs é recomendada para edificações localizadas em climas com grande variação de temperatura do ar externo (na ordem de 10 °C) e com fechamentos leves e de baixa capacidade térmica, como edifícios estruturados em aço, *light steel framing* e madeira que, de maneira geral, possuem fechamentos com baixa capacidade térmica. Essa alta amplitude térmica da temperatura externa ao longo do dia impacta os ciclos de carga e descarga dos PCMs incorporados em sistemas passivos. Se o material não conseguir solidificar completamente a eficácia do sistema poderá ser consideravelmente reduzida. Para situações em que a descarga não ocorre naturalmente, é necessário fornecer mecanismos para desencadear a troca de fase, como, por exemplo, a ventilação noturna (KALNÆS; JELLE, 2015; SOLGI *et al.*, 2019).

Para atingir os benefícios esperados, é necessário avaliar os parâmetros relativos à associação PCM + Edificação. Os principais parâmetros investigados na literatura são as condições climáticas do local, projeto e orientação da edificação, localização, forma de incorporação, quantidade de PCM por componente construtivo, tipo de material, temperatura de mudança de fase, capacidade de armazenamento de calor latente, carga térmica interna, questões relacionadas ao uso dos espaços e questões econômicas e ambientais (PASUPATHY; VELRAJ; SEENIRAJ, 2008; WAHID *et al.*, 2017; FRIGIONE; LETTIERI; SARCINELLA, 2019; BAI *et al.*, 2020).

Também é necessário avaliar as propriedades isoladas do PCM. Portanto, a escolha de um PCM para um sistema de armazenamento de energia térmica deve levar em conta as propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, econômicas e ambientais (MEMON, 2014).

Se levadas em consideração apenas as condições de contorno de maneira isolada, Kalnæs e Jelle (2015) apontaram a dificuldade de selecionar um PCM que funcione de maneira ideal para cada estação do ano. Os autores destacam que, além da dificuldade de selecionar o PCM correto para climas específicos, o efeito dos PCMs terá variações a partir das diferentes condições climáticas ao longo do ano. Logo, a seleção de um PCM com base em uma temperatura específica de mudança de fase pode não ser apropriada para estações diferentes.

Soma-se às dificuldades em selecionar as propriedades de um PCM as limitações das informações disponibilizadas pelos fabricantes. Memon (2014) afirma que pesquisadores e fabricantes utilizam abordagens diferentes para obter as propriedades dos PCMs. Há uma falta de uniformidade na apresentação de dados que caracterizam o material, o que dificulta o entendimento de suas características e consequentemente sua escolha. Além disso, devido à falta de normatização, as propriedades térmicas dos PCMs podem estar incorretas, imprecisas e superestimadas (KALNÆS; JELLE, 2015).

Em relação à viabilidade econômica, pelo fato de os PCMs potencialmente oferecerem uma diminuição no consumo geral de energia, é importante ter conhecimento de qual é o retorno do investimento inicial. Entretanto, poucas pesquisas foram realizadas sobre esse tema devido à falta de conhecimento prático sobre como os PCMs se comportam nas edificações em diferentes climas. Como ainda há incertezas em relação ao efeito geral dos PCMs, mostrar os benefícios econômicos em longo prazo poderia ajudar a aumentar o interesse de usuários, investidores e projetistas (KALNÆS; JELLE, 2015).

Resultados e discussões

Resultados da busca e seleção de artigos a partir da revisão integrativa

O número de resultados das diferentes buscas é apresentado na Tabela 1 com suas respectivas *strings de busca*.

A busca inicial resultou em 4.988 artigos que, após uma pré-seleção (i.e., leitura do título, palavras-chave e resumo), foram reduzidos para 307. A partir da leitura integral dos artigos pré-selecionados, 103 foram selecionados e compõem as Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6, apresentadas a seguir.

As demais publicações citadas ao longo do texto e referenciadas ao final desse artigo compõem referências para a introdução, justificativa e desenvolvimento do método.

Tabela 1 - Número de publicações por *strings* de busca

<i>Strings</i> de Pesquisa	phase OR "change*" OR "material" AND thermal inertia AND build*	pcm* AND thermal inertia AND build*	phase OR "change*" OR "material" OR thermal inertia) AND architecture	pcm*AND thermal inertia AND architecture*	material* OU "mudanca" OU "fase" E inercia termica E edifica*	pcm* E (inercia termica E edifica*	material* OU "mudanca" OU "fase" E inercia termica E arquitetura	pcm* E (inercia termica E arquitetura
Nº resultados	3.173	405	1.274	130	3	0	3	0

PCMs em componentes construtivos

Os PCMs podem ser utilizados de forma passiva em vários elementos construtivos como em coberturas, paredes, em toda a envoltória da edificação, divisórias internas, forros, fechamentos translúcidos, e sistemas como fachadas duplas e chaminés solares.

Existem várias pesquisas que investigaram o desenvolvimento de novos tipos de PCM ou de uma nova forma de incorporação ou estabilização desses materiais em elementos construtivos. Como exemplo, podem ser citadas:

- (a) estabilização de PCMs (MEHRALI *et al.*, 2016; CHENG; FENG, 2020);
- (b) estudos com novos PCMs parafinados (LUO *et al.*, 2015; XU *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2020);
- (c) PCMs compostos por ácidos graxos (HE *et al.*, 2015);
- (d) PCMs compostos por polietileno (WEINGRILL *et al.*, 2020);
- (e) misturas eutéticas (KAHWAJI *et al.*, 2016; KAHWAJI; WHITE, 2018); e
- (f) capsulas com a união entre dois PCMs (ZHAO; ZHANG; KONG, 2020).

Esses trabalhos não serão explorados nessa revisão, cujo foco é o desempenho térmico/energético e conforto térmico de usuários em edificações com PCMs e sua aplicação em sistemas construtivos.

PCMs em paredes externas e internas

Uma vantagem da utilização de PCM em paredes está na elevada área de contato com o ambiente interno e externo, o que possibilita maiores trocas de energia e, conseqüentemente, maior eficiência na utilização do material. Portanto, essa é a solução mais comum para a implementação de PCMs em edificações (CUNHA; AGUIAR, 2020) com destaque para utilização dos PCMs em painéis pré-fabricados de vedação como componentes.

Ao discutir o estado da arte em fechamentos pré-fabricados para vedação, Memon (2014) destaca que, ao serem aprimorados com PCM, os painéis foram capazes de reduzir o consumo de energia, a temperatura máxima e a flutuação interna da temperatura do ar. O autor destaca a eficiência do sistema na redução do consumo de energia em momentos de pico e das emissões de CO₂ associadas ao aquecimento e resfriamento.

Embora apresentadas as vantagens da utilização de PCMs em painéis para vedação, Memon (2014) afirma que a sua eficiência dependerá de parâmetros como:

- (a) o tipo de PCM selecionado e sua temperatura de mudança de fase;
- (b) a capacidade de armazenamento de calor por unidade de área;
- (c) orientação da parede;
- (d) condições climáticas e de contorno;
- (e) ganhos solares diretos;
- (f) taxa de ventilação; e
- (g) cor da superfície.

A Tabela 2 apresenta pesquisas que investigaram a utilização de PCMs em paredes internas e externas, em painéis leves, e em sistemas pesados como alvenaria e concreto.

A partir dos estudos apresentados, é possível afirmar que a utilização de PCM em paredes tem grande potencial para aumento das horas em conforto e redução do consumo de energia. Porém, é necessária uma análise de diferentes parâmetros como a camada onde o PCM será alocado, a orientação solar da parede, o clima e a estação do ano, a temperatura de fusão do PCM, a temperatura de *setpoint* desejada no ambiente interno e aspectos construtivos.

Consonantemente, é necessário fornecer mecanismos para os ciclos completos de carga e descarga do PCM. Autores como Laaouatni *et al.* (2019), Mathis *et al.* (2018), Guarino *et al.* (2017), Liu *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2020) apontaram a importância da ventilação natural seletiva para garantir os benefícios esperados com a utilização do PCMs.

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (Continua...)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura Mudança de Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Aketouane <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafinas, ácido graxo e ácido cáprico)	Preenchimento de blocos de vedação	24,0 a 37,0	144 a 243 kJ/kg	Análise numérica; Simulação Termoenergética (Comsol Multiphysics)
Al-Saadi e Zhai (2015)	***	***	19,0 a 28,0	50 a 300 kJ/kg	Simulação termoenergética (TRNSYS); Ensaio em laboratório
Arici <i>et al.</i> (2020)	***	***	-10,0 a 40,0	250 kJ/kg	Análise numérica
Baniassadi, Sailor e Bryan (2019)	Orgânico (BioPCM™)	***	29,0	250 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Chang <i>et al.</i> (2017)	Orgânico (n-Octadecan)	Macroencapsulado	28,0	256 kJ/kg	Simulação Termoenergética (WUFI PRO 5.3)
Gounni e El Alami (2017)	Orgânico (polietileno, 40% e parafina 60%)	Incorporação direta	21,7 a 31,0	140 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Gracia <i>et al.</i> (2018)	***	Microencapsulado	20,0 a 22,0	***	Ensaio em modelo físico
Guarino <i>et al.</i> (2017)	***	Incorporação direta/Folhas de PCM	18,0 a 24,0	70 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Jin, Medina e Zhang (2016)	Orgânico (RT27 Rubitherm Technologies)	***	27,0	178 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em laboratório
Jin <i>et al.</i> (2017)					Análise numérica
Laaouatni <i>et al.</i> (2019)	Orgânico (styrene-type polymer)	Incorporação direta	27,0	179 kJ/kg	Ensaio em laboratório; Simulação Termoenergética (Comsol Multiphysics)
Lagou <i>et al.</i> (2019)	***	***	1,0 a 35,0	***	Análise numérica (Comsol Multiphysics)
Lee <i>et al.</i> (2015)	Inorgânico (Sal Hidratado)	Incorporação direta/Folhas de PCM	31,4	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Lee <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Rubitherm)	Incorporado por mistura direta no isolante	26,0 a 28,0	147 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Lee, Medina e Sun (2015)	Orgânico (Parafina)	Incorporação direta/Folhas de PCM	20,6	73 kJ/kg	Medições
Lei, Yang e Yang (2016)	***	***	22,0 a 32,0	223 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Li <i>et al.</i> (2015)	***	***	18,0 a 26,0	178 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Markarian e Fazelpour (2019)	Orgânico	***	21,0 a 29,0	200 e 250 kJ/kg	Simulação Multiobjetivo (DesignBuilder/ EnergyPlus/ NSGA-II)

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura Mudança de Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Matera <i>et al.</i> (2018)	Inorgânico (Sal Hidratado)	***	32,0	254 kJ/kg	Simulação Termoenergética (TRNSYS)
Mathis <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (PT23 Puretemp [®])	Macroencapsulado	23,4	201 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Mazzeo, Oliveti e Arcuri (2017)	S15 (EPS)/ LATEST20T (TEAP)/ HS22P (savENRG)/ SP26E (Rubitherm)/C32 (CLIMATOR)	***	15,0 a 32,0	160 a 190 kJ/kg	Simulação Termoenergética (TRNSYS)
Mi <i>et al.</i> (2016)	***	Incorporado direta	27	280 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Nghana e Tariku (2016)	Orgânico (Parafina)	Incorporado direta	23	200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Pons e Stanescu (2017)	Orgânico (ácido cáprico e álcool dodecílico)	***	26,5	127 kJ/kg	Análise numérica
Sun <i>et al.</i> (2016)	Orgânico (n-octadecane)	Estabilizado	27,4	243 kJ/kg	Análise numérica
Thiele <i>et al.</i> (2015)	Orgânico (Polietileno, PureTemp 20, Entropy Solutions Inc.)	Microencapsulado	10,0 a 25,0	180 kJ/kg	Análise numérica;
Thiele, Sant e Pilon (2015)	Orgânico (Polyethylene)	Microencapsulado	21,5	180 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em laboratório
Vrachopoulos <i>et al.</i> (2015)	Orgânico (GR 27, Rubitherm)	Incorporação direta	27,5/ 18,0 a 26,0	72 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em modelo físico;
Yao <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina, Sinopec Nanyang Branch)	Estabilizado	27,6	67 kJ/kg	Simulação Termoenergética (TRNSYS); Ensaio em modelo físico;
Zhou e Eames (2019)	***	***	23,4	***	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Zhu <i>et al.</i> (2016a)	Orgânico (Parafina)	Estabilizado	18,0 a 33,0	***	Análise numérica
Zhu <i>et al.</i> (2016b)	Orgânico (Parafina n-Heptadecane)	Estabilizado	19,0 e 28,0	206 e 225 kJ/kg	Simulação Termoenergética (TRNSYS)
Wang <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina MPCM 37-D, Microtek)	Microencapsulado	37	166 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Wang <i>et al.</i> (2020)	Orgânico	***	18,0 a 30,0	200 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Local de instalação do PCM. Composição do sistema construtivo	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Aketouane <i>et al.</i> (2018)	3 tipologias de habitação de 100 a 400 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em tijolo furado de argila	5 cidades no Marrocos	A temperatura de fusão média do PCM em 37 °C foi a solução mais otimizada. Com 27 °C, economia de energia de 25% no clima desértico e 40% no clima oceânico.
Al-Saadi e Zhai (2015)	Habitação de 167 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em <i>Drywall</i> /Madeira e isolante	4 cidades nos EUA	Carga de resfriamento anual reduzida em até 15,8% com PCM em camadas internas, sem efeitos no aquecimento.
Arici <i>et al.</i> (2020)	Apenas a parede foi testada	***	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto, isolante e gesso	2 cidades na Turquia	Melhores resultados para temperatura de fusão entre 6 °C a 34 °C e espessura e posição do PCM variável: de 1mm a 20 mm. PCM mais externo para efeito de aquecimento e mais interno para resfriamento.
Baniassadi, Sailor e Bryan (2019)	Habitação de 112 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Tipo de material variou conforme o clima	16 cidades nos EUA	Aumento da resiliência do edifício em relação ao calor extremo com destaque para habitações de interesse social.
Chang <i>et al.</i> (2017)	Habitação Rural	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em cimento, gesso, madeira e isolante	6 cidades na Coreia	Melhoria das condições de conforto térmico e redução do risco do crescimento de fungos nas paredes.
Gounni e El Alami (2017)	Célula teste de 0,4 x 0,4 x 0,4 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira	***	Localização ideal para o PCM afetada pela temperatura de mudança de fase e pela fonte de calor com redução da temperatura superficial em 2 °C.
Gracia <i>et al.</i> (2018)	Células teste de 2,4 x 2,4 x 2,4 m e 2,4m x 5,5 x 2,4 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto pré-fabricado	Lérida (Espanha)	Curva de temperatura interna com oscilações menores devido ao PCM. No protótipo de concreto com PCM foi registrado atraso térmico de 2h.
Guarino <i>et al.</i> (2017)	Célula teste de 2,8 x 1,3 x 2,4 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Parede em painel polimérico com PCM e alumínio	Montreal (Canadá)	Atraso térmico de 6 a 8 h no período frio: redução das oscilações de temperaturas diárias em até 10 °C e economia média de 17%. Necessidade da associação do sistema a ventilação natural para reduzir o superaquecimento.

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Local de instalação do PCM. Composição do sistema construtivo	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Jin, Medina e Zhang (2016)	Apenas a parede foi testada	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em gesso e isolante	Lawrence; Kansas (EUA)	Local ideal para a instalação do PCM mais próximo da superfície externa considerando o aumento da espessura da camada de PCM, do calor de fusão e da temperatura de mudança de fase.
Jin <i>et al.</i> (2017)		***		Nanjing (China)	Melhor localização nas camadas interna. Melhores resultados para as condições de verão.
Laaouatni <i>et al.</i> (2019)	Apenas a parede foi testada	Natural e Artificial	PCM nas paredes. Paredes com bloco de concreto preenchido com PCM	***	Aumento da capacidade térmica da parede com deslocamento e redução da carga térmica, com destaque para o uso da ventilação natural.
Lagou <i>et al.</i> (2019)	***	Natural	PCM nas paredes externas. Paredes em argamassa cimentícia, placa de gesso e isolante	6 cidades na Europa	Os melhores desempenhos foram encontrados para o PCM instalado na superfície mais interna da parede externa. Parâmetros como clima podem influenciar a definição da solução construtiva ideal em relação à posição e tipo PCM a serem empregados.
Lee <i>et al.</i> (2015)	Células teste de 1,8 x 1,8 x 1,2 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e isolante	Lawrence (EUA)	A localização do PCM no meio da parede foi ideal para sul com reduções no pico do fluxo de calor de 51,3%, enquanto a localização próxima a superfície interna foi a ideal para oeste com reduções de 29,7%.
Lee <i>et al.</i> (2018)	Célula teste de 1,8 x 1,8 x 1,5 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e isolante	Lawrence (EUA)	PCM proporcionou atraso térmico de 1,5 h e redução diária do pico de fluxo de calor de 25,4% com variações entre orientações cardinais.
Lee, Medina e Sun (2015)	Edificação institucional de 4400 m	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em painéis pré-fabricados	Lawrence (EUA)	Para o melhor caso foi obtido uma menor variação das temperaturas superficiais e redução média do fluxo de calor de 27,4%, com máximo de 67% e atraso térmico de 3 h.
Lei, Yang e Yang (2016)	Ambiente de 3,0 x 3,0 x 2,8 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto	Singapura	Temperatura de mudança de fase influenciada pela localização e pela curva de entalpia/temperatura. Os PCMs aplicados nas superfícies externas mostraram melhor desempenho.

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Local de instalação do PCM. Composição do sistema construtivo	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Li <i>et al.</i> (2015)	Célula teste de 0,8 x 1,0 x 1,3 m	***	PCM nas paredes externas. Paredes em gesso, isolante e alumínio	5 cidades na China	O PCM evitou a transferência de calor e tem efeitos de atenuação do fluxo de calor e atraso térmico. Esse efeito é maior em cidades que possuem uma maior variação da temperatura ao longo do dia.
Markarian e Fazelpour (2019)	Habitação multipavimento de 828m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em alvenaria, blocos de concreto, isolante e gesso	5 cidades no Irã	A utilização de PCM resulta em economia de eletricidade de 4,5–5,5% para todos os climas. O <i>payback</i> foi de mais de 70 anos para todas as cidades.
Matera <i>et al.</i> (2018)	Edifício dois pavimentos, dimensão de 10,0 x 10,0 x 6,0 m	Artificial	PCM nas paredes internas. Paredes em tijolo, gesso e isolante	Roma (Itália)	No inverno, foi observado o pior desempenho, com aumento na demanda energética para aquecimento. No verão, houve uma redução significativa da demanda de arrefecimento.
Mathis <i>et al.</i> (2018)	Célula teste de 2,2 x 1,5 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira, gesso e isolante	Quebec (Canadá)	O PCM não foi eficiente no frio extremo: redução mensal do consumo por aquecimento de 8,1% a 41% em condições amenas. No verão, a eficiência foi limitada pela baixa descarga térmica noturna.
Mazzeo, Oliveti e Arcuri (2017)	Apenas a parede foi testada	Artificial	***	Turim; Cosenza (Itália)	O PCM com temperatura de fusão intermediária entre os <i>setpoints</i> de inverno e verão apresentaram a melhor relação entre as demandas energéticas das duas estações.
Mi <i>et al.</i> (2016)	Edifício de escritório multipavimento de 41,8 x 15,4 x 3,3 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em argamassa e concreto	5 cidades na China	A economia de energia mais significativa em escritórios localizados em regiões frias ou com verão quente e inverno frio. Uso de PCMs não é indicado para regiões quentes.
Nghana e Tariku (2016)	Edificação residencial de 49,0 x 37,0 x 2,40 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em madeira e gesso	Vancouver (Canadá)	Eficaz na estabilização da temperatura com reduções de 1,4 °C na temperatura do ar, 2,7 °C na temperatura superficial das paredes e redução na temperatura operativa, mas sem efeitos no conforto.
Pons e Stanescu (2017)	Sala comercial de 8,0 x 5,0 x 3,0 m	Natural e Artificial	PCM na parede externa. Paredes em argamassa e alvenaria	8 cidades brasileiras	Os PCMs têm potencial para reduzir o consumo de energia com destaque para as regiões com climas mais frios do país.

Tabela 2 - PCM em paredes externas e internas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Local de instalação do PCM. Composição do sistema construtivo	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Sun <i>et al.</i> (2016)	Edifício de escritórios/Teste apenas na parede	Natural	PCM nas paredes externas	5 cidades chinesas	A temperatura de fusão ideal variou entre 24,1 °C e 25,5 °C. Para a cidade com clima quente, não foi possível proporcionar benefícios com a utilização do PCM.
Thiele <i>et al.</i> (2015)	Habitação de 240 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto	São Francisco; Los Angeles (EUA)	PCM reduziu a carga de resfriamento no verão mais do que a carga de aquecimento no inverno. Economia maior para as paredes orientadas a sul.
Thiele, Sant e Pilon (2015)	***	Artificial	PCM nas paredes. Paredes em concreto	São Francisco; Los Angeles (EUA)	Uso de PCM resultou em redução e atraso no fluxo máximo de calor quando submetido à temperatura externa diurna e radiação solar.
Vrachopoulos <i>et al.</i> (2015)	Célula teste de 2,0 x 2,0 x 2,0 m	Natural	PCM nas paredes externas. Paredes em placas cimentícias e gesso, estruturadas em madeira	Eubeia (Grécia)	Durante o período de fusão do PCM não foi possível observar fluxo de calor para a célula teste, o que resultou numa temperatura interna praticamente constante.
Yao <i>et al.</i> (2018)	Célula teste de 1,7 x 1,7 x 2,2 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em metal e isolante	Tianjin (China)	PCM pode beneficiar o conforto interno e a eficiência energética. Análise do <i>payback</i> indicou um retorno de investimento de 5,84 anos.
Zhou e Eames (2019)	Edifício de escritório de 12,0 x 8,0 x 3,0 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em alvenaria, e gesso	Birmingham (Inglaterra)	A temperatura ótima de fusão foi de 23,4 °C. No verão, economia de energia é de até 40%. Percentual de horas em conforto térmico melhorado em até 7,2%.
Zhu <i>et al.</i> (2016a)	Ambiente de 5,0 x 4,0 x 3,0 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto e isolante	5 cidades na China	Temperatura otimizada do PCM depende das temperaturas externas e internas, com melhor desempenho para as condições de inverno
Zhu <i>et al.</i> (2016b)	Edifício de escritório de 9,0 x 5,0 x 3,0 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto e isolante	Wuhan (China)	Consumo de energia foi 6,4% menor no verão e 17,8% menor no inverno no ambiente com PCM.
Wang <i>et al.</i> (2018)	Teste apenas na parede	Natural e Artificial	***	Taiwan	A parede pôde dissipar calor efetivamente quando o ambiente interno está sujeito a uma condição de convecção forçada ou natural.
Wang <i>et al.</i> (2020)	Ambiente comercial/ industrial de 8,0 x 6,0 x 2,7 m	Artificial	PCM nas paredes externas. Paredes em concreto, gesso e isolante	Xangai (China)	PCM proporcionou melhoria do conforto térmico e redução das oscilações na temperatura do ambiente, com melhores resultados para a condição de inverno, com <i>payback</i> de 5 anos.

Em relação ao clima, não foi possível estabelecer um consenso entre as pesquisas. Estudos como os de Mathis *et al.* (2018), no Québec, Lei, Yang, Yang (2016), em Singapura, Matera *et al.* (2018), em Roma, e Jin *et al.* (2017), em Nanjing obtiveram resultados positivos em condições de verão ou em climas quentes. Para 5 cidades chinesas, Sun *et al.* (2016), Mi *et al.* (2016) e Zhu *et al.* (2016a) obtiveram resultados positivos para o inverno, bem como Zhu *et al.* (2016b). Wuhan, Mazzeo, Oliveti e Arcuri (2017) recomendam um PCM com temperatura de fusão intermediária entre os *setpoints* de inverno e verão para Turim e Cosenza, enquanto Nghana e Tariku (2016) obtiveram, de maneira geral, resultados positivos para as duas estações em Vancouver.

Em relação à orientação solar da parede, Lee *et al.* (2018) obtiveram resultados melhores em relação à redução do fluxo de calor para orientação norte (Hemisfério Norte) e Lee, Medina e Sun (2015) para orientação oeste (Hemisfério Norte).

Sobre a camada onde o PCM deve ser instalado, há desacordo entre as pesquisas, o que reforça a necessidade do estudo dos parâmetros mencionados anteriormente. É possível concluir que a escolha da camada depende do efeito desejado, aquecimento ou resfriamento, conforme apontado por Gounni e El Alami (2017) e Arici *et al.* (2020).

Os resultados divergentes nas pesquisas apresentadas eram esperados, uma vez que os autores utilizaram diferentes PCMs, geometrias, abordagens metodológicas, aspectos construtivos e condições de contorno. No entanto, recomenda-se que, ao avaliar a utilização de PCMs em paredes, sejam selecionados estudos com parâmetros semelhantes ao do ambiente a ser analisado. Essa busca não elimina a necessidade de analisar todos os parâmetros envolvidos, mas pode ser uma forma de filtrar e restringir o número de variáveis necessárias para estabelecer uma relação entre os PCMs e os benefícios desejados com a sua utilização.

Coberturas

Elementos horizontais como coberturas possuem grande área superficial e geralmente estão em contato próximo com os usuários. Ademais, dentre as envoltórias, coberturas apresentam maiores ganhos de radiação solar e maiores fluxos de calor em baixas latitudes. Por esse motivo, são elementos importantes para a manutenção das condições de conforto térmico na região tropical, com potencial para incorporação de PCMs.

A Tabela 3 apresenta pesquisas que investigaram a utilização de PCMs em sistemas de coberturas.

As pesquisas sobre utilização de PCMs em coberturas avaliam atraso e redução no fluxo de calor descendente devido aos ganhos térmicos pela radiação solar. Nesses casos, conforme apresentado pelos autores revisados nesse estudo, os PCMs reduzem o fluxo de calor, o consumo de energia e aumentam as horas em conforto dos usuários. Porém, não foram observadas influências ou diferenças devido ao clima ou latitude.

Observa-se que, se comparado aos PCMs utilizados em paredes e fechamentos verticais, a temperatura de fusão dos PCMs utilizados em lajes e coberturas é quase sempre mais alta, em torno de 30 °C a 40 °C.

Envoltórias

Embora já tenha sido apresentada uma revisão da utilização de PCMs em paredes e coberturas, os estudos apresentados focaram na utilização de PCMs em apenas um tipo de elemento construtivo. Nesta seção serão revisadas pesquisas com PCMs em mais de um tipo de elemento construtivo, na maioria dos casos em paredes, pisos e coberturas de maneira combinada (Tabela 4).

Tabela 3 - PCM em coberturas (Continua)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura de Mudança Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Akeiber, Wahid e Hussien (2016)	Orgânico (Óleo e Parafina)	***	19,0 a 44,0	***	Ensaio em modelo físico
Bhamare, Rathod e Banerjee (2020)	***	***	25,8	188 kJ/kg	Análise numérica; Simulação Termoenergética (FLUENT)
Dong <i>et al.</i> (2015)	***	***	30,0 a 38,0	Entre 138 e 238 kJ/kg	Análise numérica; Simulação Termoenergética no (FLUENT6.3)
Guichard <i>et al.</i> (2015)	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	21,7 a 23,4	71 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação (ISOLAB)
Jayalath <i>et al.</i> (2016)	Orgânico	***	23,0	210 kJ/kg	Simulação Termoenergética (TRNSYS e EnergyPlus)
Lu <i>et al.</i> (2016)	Eutético (Tetradecanol e myristate)	Encapsulado em canos	35,0	186 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Mohseni, Tang e Wang (2019)	Orgânico (Pure-Temp 23, Pure-Temp)	Impregnação; Macroencapsulado	23,0	***	Ensaio em laboratório
Reddy e Mudgal (2017)	***	***	28,8 a 33,8	Entre 132 e 197 kJ/kg	Análise numérica; Simulação Termoenergética no (FLUENT)
Tokuç, Basaran e Yesügey (2015)	***	Incorporado direta/Folhas de PCM	27,0	179 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação CFD (ANSYS FLUENT)
Yu <i>et al.</i> (2020)	Orgânico (Parafina e Poliestireno)	Forma estabilizada	34,0 a 38,0	200 kJ/kg	Simulação CFD
Zhou <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina, Microtek)	Microencapsulado	37,0 a 43,0	167 kJ/kg	Ensaio em modelo físico

Tabela 3 - PCM em coberturas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condição- namento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Akeiber, Wahid e Hussen (2016)	Célula teste de 1,0 × 1,0 × 1,1 m	***	PCM na cobertura. Cobertura em concreto e alumínio	Bagdá (Iraque)	Menor fluxo de calor através da cobertura para todos os casos, destaque para o PCM com temperatura de mudança de fase entre 40 °C e 44 °C.
Bhamare, Rathod e Banerjee (2020)	Ambiente de 1,2 x 1,2 x 2,4 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em alvenaria e concreto	Chennai (Índia)	A cobertura integrada com PCM mantém a temperatura no intervalo de 25,5 a 27,5 °C e reduz as cargas de pico de calor em comparação com um telhado sem PCM.
Dong <i>et al.</i> (2015)	Habitação	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto, argamassa e alumínio	Daqing (China)	O efeito positivo do PCM na redução do fluxo de calor e no aumento do atraso térmico, superior a 3h. O parâmetro mais impactante foi a espessura da camada de PCM e o coeficiente de absorção da cobertura.
Guichard <i>et al.</i> (2015)	Célula teste de 3,0 × 3,0 × 3,0 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em madeira, placa de gesso e telha galvanizada	Ilha da Reunião	PCM capaz de reter a fluxo de calor da cobertura, reduzir a temperatura no interior da célula teste em 2°C.
Jayalath <i>et al.</i> (2016)	Edificação residencial de 186 m	Natural	PCM na cobertura. Cobertura em aço e isolante	Melbourne (Austrália)	PCM na cobertura pode reduzir as cargas de resfriamento e aquecimento, fornece conforto térmico para ocupantes com menores flutuações de temperatura interna.
Lu <i>et al.</i> (2016)	Célula teste de 2,0 × 2,0 × 2,4 m	***	PCM na cobertura. Cobertura argamassa, camada de revestimento reflexivo e isolante	Tianjin (China)	A cobertura proposta foi capaz de reduzir os picos de temperatura e fluxo de calor, além de apresentar um efeito positivo na capacidade térmica e isolamento.
Mohseni, Tang e Wang (2019)	Célula teste 1,0 x 1,0 x 1,0m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto	***	Resistência à compressão diminuiu com PCM. A absorção de água e o encolhimento por secagem foram reduzidos. A associação dos dois materiais pode reduzir o consumo de energia e temperatura interna.
Reddy e Mudgal (2017)	Avaliado apenas a cobertura	***	PCM na cobertura. Cobertura em tijolo, concreto e gesso	Chennai (Índia)	Redução no ganho de calor de 17% a 26% para um telhado com uma única camada de PCM e 25% a 36% para multicamadas.

Tabela 3 - PCM em coberturas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condição- namento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Tokuç, Basaran e Yesügey (2015)	Avaliado uma placa de 0,5 x 0,5 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto e isolante	Istambul (Turquia)	Espessura de 2 cm se mostrou a mais eficiente no controle da temperatura. Não foi possível garantir a carga/descarga no material em todas as estações do ano.
Yu <i>et al.</i> (2020)	Avaliado apenas a cobertura	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em concreto	5 cidades na China	Temperaturas ótimas de mudança de fase com variações de acordo com os climas. Para os melhores casos, foram observadas reduções da temperatura interna entre 3,7 °C a 4,0 °C.
Zhou <i>et al.</i> (2018)	Avaliado uma placa de 0,1 x 0,1 m	Artificial	PCM na cobertura. Cobertura em estrutura de colmeia em alumínio	Taiwan	Telhado com PCM de temperatura de fusão de 37 °C aumentou o deslocamento de carga de pico. Porém, houve ganho de calor interno ligeiramente aumentado.

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (Continua)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura de Mudança Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Ahangari e Maerefat (2019)	***	Forma estabilizada	23,0 a 21,0	60 a 63 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Auzeby <i>et al.</i> (2016)	Orgânico (Parafina + Poliestireno)	Forma estabilizada	23,1 a 24,0	86 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Bai <i>et al.</i> (2020)	***	***	17,0 a 25,0	***	Análise numérica; Ensaios em modelo físico
Beltrán e Martínez-Gómez (2019)	Orgânico e Inorgânico (GR25, RT25 a 30, nOctadecane, BioPCM Q21, 23, 25, 27 e 29)	***	21,0 a 29,9	45 a 261 kJ/kg	Métodos de decisão multicritério e Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Berardi e Soudian (2019)	Orgânico (BioPCM TM e Energain)	Microencapsulado	21,7 a 25,0	70 e 165 a 200 kJ/kg	Ensaios em modelo físico e Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Bouguerra e Retiel (2015)	Orgânico (parafina)	Microencapsulado	24,0 a 32,0	160 kJ/kg	Análise numérica
Brito <i>et al.</i> (2017)	PCM Teórico	***	Recomendado de 30,0 a 34,0	Recomendado maior que 315 kJ/m	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (continuação)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura de Mudança Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Hasan, Basher e Shdhan (2018)	Orgânico (Parafina)	Incorporado direta/Folhas de PCM	44,0	174 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Jangeldinov <i>et al.</i> (2020)	PCM Teórico	***	18,0 a 28,0	219 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Kenzhekhanov, Memon e Adilkhanova (2020)	PCM Teórico	***	19,0 a 27,0	220 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Kharbouch <i>et al.</i> (2018)	***	***	21,0 a 27,0	200 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em modelo físico
Kim <i>et al.</i> (2017)	Orgânico (Parafina hexadecane e octadecane)	Estabilizada em chapas de alumínio	19,0 a 26,0	62 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Konstantinidou, Lang e Papadopoulou (2018)	Inorgânico (MicronalBasf®)	Microencapsulado	23,0 a 24,0 (Base); 18,0 a 26,0 (otimização)	70128 kJ/kg (Base); 40195 kJ/kg (otimizado)	Simulações multiobjetivo (EnergyPlus + NSGA- II)
Lei <i>et al.</i> (2017)	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	28,0	39 kJ/kg	Análise numérica; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Lira-Oliver e Vilchis-Martínez (2017)	Orgânico (Rubitherm)	Macroencapsulado	17,019,0; 20,023,0; 22,026,0	260; 190; 230 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Liu <i>et al.</i> (2020)	Orgânico (Gordura animal e óleo de palma)	***	19,0 a 33,0	219 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Marin <i>et al.</i> (2016)	(Micronal®)	Microencapsulado	25,0	200 kJ/m	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Memarian <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	21,0 a 29,0	200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (Ecotect 2011 e EnergyPlus)
Meng, Yu e Zhou (2017)	(Rubitherm)	Macroencapsulado	17,019,0 e 28,030,0	225 kJ/kg e 190 kJ/kg	Análise numérica; Ensaio em modelo físico
Muthuvel <i>et al.</i> (2015)	6 PCMs Orgânicos e 3 Inorgânicos	Macroencapsulado	22,0 a 30,0	***	Ensaio em modelo físico; Simulação CFD (Creo Elements/Pro)
Ozdenefe e Dewsbury (2016)	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	26,0	90 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Ramakrishnan, Sanjayan e Wang (2019)	Orgânico (parafina/perlita expandida hidrofóbica)	Forma estabilizada	27,0	81 J/g	Ensaio em modelo físico
Rathore e Shukla (2020)	Inorgânico (SavE® OM37, Pluss Advanced Technologies Pvt)	Macroencapsulado	36,0 a 40,0	218 J/g	Ensaio em modelo físico
Saffari <i>et al.</i> (2016)	Orgânico (Parafina, Rubitherm)	Estabilizada em chapas de alumínio	23,0 a 27,0	250 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Saffari <i>et al.</i> (2017)	Orgânico (Parafina)	Microencapsulado	Resfriamento: 24,0 a 28,0; Aquecimento 18,0 a 22,0	110 J/g	Otimização baseada em Simulação (EnergyPlus e GenOpt)
Selka, Korti e Abboudi (2015)	Orgânico (parafina)	***	22,0 a 23,0	240 kJ/kg	Análise numérica e Simulação CFD (FLUENT)
Sharma e Rai (2020)	Orgânico (Rubitherm)	***	24,0 a 50,0	60 ou 240 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Sinka <i>et al.</i> (2019)	Orgânico (DuPont Energain e BioPCM)	Estabilizada em chapas de alumínio	21,6 e 25,0	121 e 200 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Simulação Termoenergética (EnergyPlus)
Sovetova, Memon e Kim (2019)	Orgânico	***	20,0 a 32,0	219 kJ/kg	Simulação Termoenergética (EnergyPlus)

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/ Dimensão do ambiente	Condiçiona- mento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Ahangari e Maerefat (2019)	Ambiente de 3,0 x 3,0 x 3,0 m	Artificial	PCM nas paredes, piso e cobertura. Envoltória em gesso, concreto e isolante	4 cidades no Irã	Temperatura de fusão ótima para a camada mais interna é de 1 °C abaixo da temperatura desejada para o ambiente interno no inverno. A segunda camada deverá ter a temperatura de fusão de 2 °C a 3 °C acima da temperatura desejada para o ambiente interno no verão.
Auzeby <i>et al.</i> (2016)	Edificação residencial de 81,6 m	Natural	PCM nas paredes internas, telhado e pisos. Paredes externas em tijolos, gesso e isolante, paredes internas em gesso e lajes em concreto	Nottin-ghamshire (Inglaterra)	O uso de PCM atuou na diminuição do superaquecimento. Edificações mais isoladas necessitam de mais PCMs do que aquelas menos isoladas. Os edifícios "leves" tem maior benefício com PCMs do que os edifícios "pesados".
Bai <i>et al.</i> (2020)	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 2,4 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes e teto. Paredes em gesso	Auckland (Nova Zelândia)	A eficácia dos PCMs em edificações é influenciada pelo clima e parâmetros de construção. Se a temperatura média do ar externo for maior do que o limite do nível de conforto do humano, o superaquecimento ocorrerá mesmo com PCMs.
Beltrán e Martínez-Gómez (2019)	Edificação residencial de 36 m	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Cobertura em telha metálica e gesso e paredes em tijolos e concreto	3 cidades no Equador	O uso de PCM apresenta um bom comportamento térmico durante o dia e a noite em locais frios, principalmente à noite, quando o PCM mantém a temperatura interna em uma temperatura confortável. Em algumas situações o PCM aumentou a sensação de desconforto térmico em locais mais quentes e úmidos.
Berardi e Soudian (2019)	Célula teste na escala de 1:10 de um apartamento	Natural e Artificial	PCM nas paredes e teto. Célula teste em estrutura de alumínio com fechamento em polietileno e isolante	Toronto (Canadá)	PCMs contribuíram para estabilização das temperaturas internas em condições extremas com variações bruscas de temperatura. Necessidade da ventilação noturna para acelerar o processo de carga/descarga do material.
Bouguerra e Retiel (2015)	Edificação residencial de 104 m	Natural e Artificial	PCMs nas paredes e coberturas. Paredes em alvenaria e cobertura em concreto	Djelfa (Argélia)	Redução no consumo para resfriamento entre 20% e 30%. Benéficos relacionados a interações entre PCM e às condições climáticas e sistema construtivo. Necessário PCMs com diferentes temperaturas de fusão para diferentes superfícies.

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/ Dimensão do ambiente	Condição- mento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Brito <i>et al.</i> (2017)	Ambiente de 2,6 x 2,6 x 2,6 a 3 m	1 renovação por hora	PCMs nas paredes e teto. Sistema construtivo leve (paredes em placa cimentícia, isolante e gesso e cobertura em forro de gesso e telha cerâmica); e pesado (paredes e forro em concreto e cobertura em telha cerâmica)	8 cidades no Brasil	PCMs teóricos com ponto de fusão entre 30 °C e 34 °C apresentaram resultados melhores para as ZBs mais frias. Nas zonas mais quentes necessário ponderação, pois o uso de PMCs pode piorar as condições de conforto térmico.
Hasan, Basher e Shdhan (2018)	Célula teste de 1,5 x 1,5 x 1,0 m	***	PCMs nas paredes e teto. Paredes em alvenaria e argamassa cimentícia, cobertura em placa metálica com isolante	Kut (Iraque)	Uso de PCM reduziu a temperatura interna, melhorou conforto térmico, reduziu a carga de resfriamento e consumo de energia elétrica.
Jangeldinov <i>et al.</i> (2020)	Edificação Residencial de dois pavimentos de 12,2 x 9,2 x 6,5 m	Artificial	PCMs nas paredes e teto. Variação dos materiais de acordo com o clima, na sua maioria estruturas de <i>Ligth Steel frame</i> , gesso, isolante e concreto	8 cidades com clima frio	A economia anual de energia variou entre 196 kWh a 391 kWh. Em cidades que a economia de energia de resfriamento foi mais alta, os PCMs ideais possuíam temperaturas de fusão entre 24 °C e 26 °C, nas que a energia de aquecimento foi mais alta, 21 °C.
Kenzhekhanov, Memon e Adilkhanova (2020)	Edificação Residencial de quatro pavimentos com dimensão de 46,0 x 15,0 x 3,2 m cada	Artificial	PCMs nas paredes e teto. Paredes em placa de gesso e isolante, lajes em concreto e cobertura em concreto, isolante e chapas metálicas	8 cidades com clima frio	PCMs com baixas temperaturas de fusão foram eficientes durante a estações de transição, os PCMs com maiores temperaturas de fusão foram eficientes no período de verão. PCMs com temperatura de fusão de 23 °C e 24 °C podem ser usados para todo o clima subártico com <i>payback</i> de 16 a 32 anos.
Kharbouch <i>et al.</i> (2018)	Célula teste de 1 m	Artificial	PCM nas paredes e telhado. Paredes em tijolos, argamassa cimentícia, isolante e placa de gesso. Cobertura em concreto, isolante e placa de gesso	Tangier (Marrocos)	Uso de PCM apresentou uma melhoria no desempenho térmico. Nas paredes com PCM na camada interna foi obtido um maior atraso térmico, com influência negativa no amortecimento térmico.
Kim <i>et al.</i> (2017)	3 Células teste	Natural e Artificial	PCM no piso, parede e cobertura. Paredes e cobertura em chapas de compensado, laminado e isolante, piso em concreto, compensado e isolante	Chiba (Japão)	Redução no pico máximo de temperatura interna de 2,3 °C e 3,1 °C durante o dia, e a temperatura máxima noturna aumentou 1,9 °C e 2,5 °C. Redução no consumo de energia para aquecimento das células testes entre 9,2% e 18,4%.
Konstantinidou, Lang e Papadopoulos (2018)	2 ambientes de escritório com 144m	Artificial	Paredes externas, internas e cobertura. Os fechamentos analisados foram classificados como leve, médio e pesado	Atenas (Grécia)	O uso de PCMs contribuiu na redução do número de horas em desconforto e no consumo energético para resfriamento em escritórios. Necessidade da ventilação natural para o processo de carga/descarga do PCM.

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/ Dimensão do ambiente	Condição- amento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Lei <i>et al.</i> (2017)	Ambiente de 9,7 x 3,4 m	Artificial	PCM nas paredes e cobertura	Singapura	Economia de energia mensal de 5% a 12%, com interação entre a baixa absorvância e o PCM, cuja integração viabiliza um bom desempenho térmico ao longo do ano.
Lira-Oliver e Vilchis-Martínez (2017)	Célula teste de 1 m	Artificial	PCMs nas paredes e cobertura. Fechamentos em placa de gesso e concreto aerado	Cidade do México (México)	PCM com temperatura de fusão próxima a 18 °C, combinado com um material de baixa condutividade térmica, resultou em mais horas em conforto.
Liu <i>et al.</i> (2020)	Edificação de 4 pavimentos de 3,6 x 31,9 x 15,8 m	Natural (Ventilação noturna) e artificial	PCM nas paredes externas, internas e no teto. Fechamentos em concreto e tijolo	10 cidades na China	O PCM + estratégia de ventilação noturna reduziu as horas de desconforto nas estações de transição em 16% se comparado apenas com a ventilação noturna. Necessário avaliar cada caso, pois as condições climáticas tem impacto na eficiência.
Marin <i>et al.</i> (2016)	Ambiente de 2,4 x 2,4 x 2,4m	Natural e Artificial	PCMs nas paredes e cobertura. Fechamentos em aço galvanizado com isolante	25 cidades com diferentes condições climáticas	Redução no consumo de energia em envoltórias de edifícios leves (para aquecimento em climas áridos, temperados quentes). Não houve uma adaptação do PCM para cada clima analisado: piores resultados para cidades de clima tropical e frio com neve.
Memarian <i>et al.</i> (2018)	Célula teste de 2,1 x 2,1 x 0,9 m. Ambiente simulado 3,6 x 4,9 x 2,4m	Natural e Artificial	PCMs no piso, parede e cobertura. Fechamentos em placa cimentícia, concreto e isolante	Teerã (Irã)	O PCM com temperatura de fusão de 29 °C reduziu o consumo anual de energia em 15% e com 5 trocas/h de renovação de ar a economia aumentou para 20%.
Meng, Yu e Zhou (2017)	Células teste de 1 m	Natural	PCMs no piso, parede e cobertura. Chapas de poliestireno expandido	Shanghai (China)	Melhoria no comportamento térmico para verão e inverno. Se comparada a uma célula teste sem PCM, redução da flutuação térmica durante os dias ensolarados de verão entre 28,8% e 67,8%, no inverno entre 17,7% e 25,4%.
Muthuvel <i>et al.</i> (2015)	Células teste de 1 m	Natural	PCMs nas paredes e cobertura. Paredes em alvenaria e cobertura em telhas	Virudhunagar (Índia)	Para as condições avaliadas, o PCM foi capaz de reduzir em até 6 °C a temperatura do ambiente.
Ozdenefe e Dewsbury (2016)	Edificação residencial de 186 m	Natural e Artificial	PCM nas paredes externas, internas e cobertura. Estrutura em concreto e paredes em tijolos furados	Chipre	Redução na temperatura em até 1,7 °C e na demanda energética em até 14%. Necessidade de ventilação noturna para melhoria no desempenho do PCM.
Ramakrishnan, Sanjayan e Wang (2019)	Célula teste de 1,1 x 0,7 x 0,7 m	Natural	PCMs no piso e parede. Estrutura e fechamentos em madeira, isolante e chapa metálica	Melbourne (Austrália)	Houve redução de até 2,4 °C na temperatura interna e 3,7 °C na temperatura superficial das células teste devido a utilização do PCM.

Tabela 4 - PCMs em envoltórias (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/ Dimensão do ambiente	Condição- amento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Rathore e Shukla (2020)	Célula teste de 1,1 x 1,1 x 1,1 m	Natural	PCM nas paredes e cobertura. Fechamentos em concreto e argamassa cimentícia	Mathura (Índia)	A utilização de PCM reduziu de 40,67% a 59,79% a amplitude térmica, com redução de 7,19% a 9,18% na temperatura de pico de todas as paredes, cobertura e ambiente interno da célula teste. Foi alcançado de 60 a 120 minutos de atraso e redução de 38,76% na demanda de resfriamento.
Saffari <i>et al.</i> (2016)	Ambiente de 8,0 x 6,0 x 2,7 m	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Fechamentos em placa de gesso, isolante e madeira	Madrid (Espanha)	Para PCM com temperatura fusão de 27 °C, maior economia de energia no verão e com 23 °C maior economia no inverno. Economias de energia de resfriamento em todos os casos, com exceção do período de inverno, com consumo aumentado com PCM no caso base. <i>Payback</i> de 2 a 3 anos (residencial) e de 6 anos (comercial).
Saffari <i>et al.</i> (2017)	Edificação residencial multipavimentos 3100 m (46,3 x 16,9 x 3,0 m/pavimento)	Artificial	PCM nas paredes externas e cobertura. Paredes em estuque, placa de gesso, isolante e cobertura em telha metálica e isolante	57 cidades com diferentes condições climáticas	Em um clima com necessidade de resfriamento: melhor temperatura de fusão do PCM entre 24 °C e 28 °C. Climas com necessidade de aquecimento: 18 °C e 22 °C. Para uso de PCM em edificações, considerar classificação climática, elevação em relação ao nível do mar, irradiância solar, umidade relativa e ventilação.
Selka, Korti e Abboudi (2015)	Edificação residencial	Natural	PCM nas paredes e cobertura. Laje em concreto e paredes em tijolos e concreto	Tlemcen (Argélia)	O uso PCMs na parede podem reduzir a temperatura ambiente em cerca de 6 °C a 7 °C.
Sharma e Rai (2020)	Edificação residencial	Artificial	PCM nas paredes e cobertura. Paredes em alvenaria, argamassa cimentícia e isolante. Cobertura em concreto, argamassa cimentícia e isolante	Délhi (Índia)	As simulações com isolante térmico apresentaram um potencial maior na redução da carga térmica, se comparada às com PCM.
Sinka <i>et al.</i> (2019)	5 células teste	Natural e Artificial	PCM no piso, paredes e cobertura. Paredes externas com diferentes materiais, entre eles placas de madeira, alvenaria e isolante	Riga (Letônia)	Necessidade de sistemas de resfriamento adicionais junto do PCM no período noturno. Melhores resultados quando utilizado um sistema de resfriamento ativo na cobertura, redução da temperatura de 3 °C a 4 °C durante o dia.
Sovetova, Memon e Kim (2019)	Edificação comercial de 4 pavimentos de 15,5 x 42,0 m/pavimento)	Artificial	PCM nas paredes externas e cobertura. Variação dos fechamentos de acordo com o clima	8 cidades com clima quente e seco	Para todas as oito cidades, a economia mensal de energia foi maior durante os meses de verão. Economia aumentou com o aumento da área superficial e diminuiu com o aumento da espessura da camada de PCM.

A utilização de PCMs em envoltórias se destaca pelo aumento das horas em conforto térmico dos usuários e economia de energia, conforme apresentado por Saffari *et al.* (2017), Sovetova, Memon e Kim (2019), Ramakrishnan, Sanjayan e Wang (2019), Konstantinidou, Lang e Papadopoulos (2018), Kharbouch *et al.* (2018) e Kenzhekhanov, Memon e Adilkhanova (2020). Entretanto, autores como Brito *et al.* (2017) e Bai *et al.* (2020) apresentaram situações em que o uso de PCMs pode piorar o desempenho térmico dependendo do clima. Já Sharma e Rai (2020) concluíram que o uso de isolante térmico apresentou mais vantagem se comparado ao uso de PCMs.

Autores como Bouguerra e Retiel (2015), Bai *et al.* (2020) e Brito *et al.* (2017) afirmaram a necessidade de avaliar o clima externo, pois sua influência é significativa para o comportamento do PCM. Além da análise climática, Saffari *et al.* (2017) apontaram que condições de contorno como elevação em relação ao nível do mar, radiação solar, umidade relativa e perfil do vento influenciaram no resultado do uso de PCM, mesmo entre cidades classificadas com o mesmo clima.

Conforme já discutido, a necessidade de carga e descarga do PCM foi apontada como fator fundamental para a eficiência na sua utilização em envoltórias, principalmente com a adoção da ventilação seletiva no período noturno (KONSTANTINIDOU; LANG; PAPAPOULOS, 2018; BERARDI; SOUDIAN, 2019; OZDENEFE; DEWSBURY, 2016; BAI *et al.*, 2020).

Por se tratarem de superfícies diferentes, com cargas e trocas térmicas diferentes, autores como Ahangari e Maerefat (2019), Marin *et al.* (2016), Bouguerra e Retiel (2015) e Berardi e Soudian (2019) investigaram a utilização de mais de um tipo de PCM, ou PCMs com temperaturas de fusão diferentes, em elementos construtivos diferentes. Os estudos mencionados mostraram resultados promissores e foram considerados, com base nessa revisão, como a abordagem mais assertiva para utilização de PCMs em envoltórias.

Fechamentos translúcidos

Os elementos translúcidos, por possuírem baixas resistência e capacidade térmicas, representam parte do edifício responsável por maior perda ou ganho energético.

Muitas soluções foram desenvolvidas para a amenizar a baixa resistência térmica dos elementos translúcidos: estudos sobre vidros multicamadas, vidros duplos, preenchimento do espaço entre os painéis de vidro com gás ou aerogel e vidros com baixa emissividade (LI *et al.*, 2020a). Entretanto, nenhuma delas resolve efetivamente a baixa capacidade térmica dos componentes. Como solução para aumentar a capacidade térmica desses elementos, algumas pesquisas propuseram sua associação ao uso de PCMs (Tabela 5).

A utilização de PCMs em vidros apresenta vantagens em relação ao aumento do conforto térmico, da eficiência energética e diminuição da temperatura superficial (DURAKOVIC; TORLAK; SCIENCES, 2017; BERTHOU *et al.*, 2015; GRYNNING; GOIA; TIME, 2015; BERTHOU *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2020b).

Autores como Grynning, Goia e Time (2015), Berthou *et al.* (2015) e Li *et al.* (2016) destacaram a importância da incidência de radiação solar na superfície dos vidros para a eficiência desses sistemas.

Uma característica discutida pelos autores é que, mesmo o PCM no estado líquido, não é obtida a mesma transparência de um vidro comum. Já no estado sólido, na maioria das vezes o PCM não é transparente e permite apenas a passagem de luz difusa. Alguns autores apresentaram aplicações vantajosas para essa característica, como a utilização do sistema como proteção solar (GOIA; PERINO; SERRA, 2014). Porém, mesmo a utilização apenas de iluminação difusa deve ser avaliada, já que pode acarretar desconforto luminoso interno e ofuscamento (GIOVANNINI *et al.*, 2018).

Outra associação de PCM e vidros que foi explorada nessa revisão foram os estudos de Liu *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2017), que investigaram sistemas zenitais. A utilização de coberturas envidraçadas com PCM pode ser uma solução para minimizar as limitações relacionadas à transparência do material. Em climas quentes, as coberturas translúcidas podem ser utilizadas para iluminar ambientes internos com o mínimo de ganho de calor utilizando apenas radiação difusa. Logo, a utilização de PCMs nesses fechamentos é uma possível solução que necessita maior investigação.

Apesar das vantagens apresentadas, a incorporação de PCMs em superfícies translúcidas não representa uma situação economicamente viável para janelas convencionais em edificações residenciais. Seu potencial deve ser explorado em edificações comerciais, caracterizados por grandes fachadas e coberturas envidraçadas com elevados ganhos térmicos e baixa inércia térmica de ambientes. Além disso, destaca-se que os sistemas translúcidos com PCM podem ser eficazes apenas se o PCM permanecer na fase de transição na maior parte do tempo. Fora da fase de transição, a capacidade térmica desses materiais não é muito melhor do que aquelas encontradas em câmaras de ar (GOIA *et al.*, 2015).

Tabela 5 - PCM em fechamentos translúcidos (Continua)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura de Mudança Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Durakovic, Torlak e Sciences (2017)	Orgânico (Parafina Rubitherm GmbH)	***	24,5 a 26,5	189 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Análise numérica
Berthou <i>et al.</i> (2015)	Eutético (Orgânico Ácido graxo)	***	22,2 a 24,6	162 kJ/kg	Ensaio em modelo físico;
Giovannini <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina)	***	35,0	170 J/g	Simulação Termoenergética e Luminosa (Radiance/Honeybee)
Goia, Perino e Serra (2014)	Orgânico (nalkanos e ceras, RT35HC)	***	33,0 a 37,0	245 J/g	Ensaio em modelo físico
Goia <i>et al.</i> (2015)	Orgânico (Parafina)	***	21,0 a 35,0	***	Ensaio em modelo físico
Goia e Boccaleri (2016)	Orgânico (Parafina: aliphatic hydrocarbons e straightchain alkanes)	***	35,0	170 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Goia, Perino e Serra (2014)	Orgânico. (Parafina, (Rubitherm)	***	35,0	170 J/g	Ensaio em modelo físico
Grynning, Goia e Time (2015)	Inorgânico (Sal Hidratado)	Macro.	28,5	***	Ensaio em modelo físico;
Hu e Heiselberg (2018)	Orgânico (Parafina)	***	22,0	216 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Análise numérica
Koláček, Charvátová e Sehnálek (2017)	Inorgânico (Sal Hidratado).	***	***	***	Ensaio em modelo físico; Análise numérica
Li <i>et al.</i> (2020a)	Orgânico (Parafina)	***	27,0 e 29,0	206 kJ/kg	Análise numérica
Li <i>et al.</i> (2018)	Orgânico (Parafina Shanghai Joule Wax Industry)	***	18,0; 26,0; 32,0	185; 174; 172 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Li <i>et al.</i> (2020b)	Orgânico (Parafina)	***	8,0	185 kJ/g	Análise numérica (FLUENT6.3)
Liu <i>et al.</i> (2016)	Orgânico (Parafina)	***	27,0 a 29,0	205 kJ/kg	Análise numérica
Liu <i>et al.</i> (2017)					Medição Protótipo; Análise numérica
Zhong <i>et al.</i> (2015)	Orgânico (Parafina)	***	27,0 e 29,0	205 kJ/kg	Modelo físico; Análise numérica

Tabela 5 - PCM em fechamentos translúcidos (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Durakovic, Torlak e Sciences (2017)	Célula teste com 1,0 x 0,5 x 0,5 m	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Sarajevo (Bósnia)	PCM reduziu as variações de temperatura e acumulou energia convectiva e radiante na forma de calor latente, com manutenção da temperatura da superfície interna mais baixa.
Berthou <i>et al.</i> (2015)	Painel de 1m	Artificial	PCM no sistema envidraçado de uma parede <i>trombe</i> composto por vidro, aerogel de sílica e PCM	SophiaAntipolis (França)	Sistema mais eficaz no inverno, com diferenças entre as temperaturas externas e internas de cerca de 10 °C. Melhor desempenho em climas frios e ensolarados. Durante o verão, foi observado superaquecimento. Foram encontrados índices de 500 lux no ambiente interno.
Giovannini <i>et al.</i> (2018)	Ambiente de 3,6 x 5,0 x 2,7m abertura envidraçada 100% da fachada	***	PCM no interior de janela de vidro duplo	Östersund (Suécia), Turin (Itália); Abu Dhabi (EAU)	A janela com PCM permitiu uma maior incidência de luz no ambiente interno. Porém, o aumento da quantidade de luz não resultou em maior conforto visual.
Goia, Perino e Serra (2014)	Célula teste com 1,6 x 3,6 x 2,5 m	Natural	PCM no interior de painel envidraçado com 3 e 4 camadas de vidro. Um dos casos com argônio	Torino (Itália)	O PCM colocado na cavidade mais interna da unidade envidraçada apresenta um desempenho melhor se comparado a externa.
Goia <i>et al.</i> (2015)	Teste em área envidraçada de 0,25 x 0,25 m	***	6 variações da combinação entre PCM no interior de janela de vidro duplo	***	Vantagens: uso da iluminação natural, redução do risco de ofuscamento e redução e mudança do pico de ganho solar. Desvantagens: aumento de peso, mudança de volume e limitação do aspecto translúcido.
Goia e Boccaleri (2016)	Teste em área envidraçada de 1,4 x 1,1 m	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Torino (Itália)	Há estabilidade no armazenamento de calor latente após o processo de envelhecimento forçado. Entretanto, foi observada uma diminuição da faixa de temperatura de fusão e degradação química com envelhecimento.
Goia, Perino e Serra (2014)	Teste em área envidraçada de 1,40 x 0,70 m	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Torino (Itália)	No verão, permite redução no ganho de energia superior a 50% pela obstrução da radiação solar. No inverno, houve uma redução na perda de calor durante o dia, mas o ganho de radiação solar foi reduzido.

Tabela 5 - PCM em fechamentos translúcidos (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Grynning, Goia e Time (2015)	Teste em área envidraçada de 1,2 x 1,2 m	Artificial	PCM no interior de janela com 4 camadas de vidro	***	Necessário períodos longos de incidência de radiação combinados com altas temperaturas externas para proporcionar melhorias no desempenho. PCM torna a visão pela janela limitada.
Hu e Heiselberg (2018)	Teste em área envidraçada de 1,5 x 0,7 m	Artificial	PCM no sistema envidraçado com vidro duplo e camada de ar para efeito chaminé	Copenhague (Dinamarca)	O melhor resultado foi capaz de resfriar o ar que passa pela janela em média 6,5 °C com um tempo de resfriamento de 3,9 h.
Koláček, Charvátová e Schnálek (2017)	Teste em área envidraçada de 1,0 x 1,0 m	Artificial	PCM no interior de janela com 4 camadas de vidro	***	Redução de 66% na energia térmica incidente no interior do edifício. PCM utilizado no experimento tem uma taxa de transmissão de luz no estado líquido máxima de 45% e no estado sólido máxima de 28%.
Li <i>et al.</i> (2020a)	***	***	PCM no interior de janela de vidro duplo	Daqing (China)	Importância da radiação solar na temperatura superficial e na transmissão do fluxo de calor. A incidência de luz é maior quando o PCM está no estado líquido.
Li <i>et al.</i> (2018)	Células teste de 0,76 x 0,71 x 0,61 m e área envidraçada de 0,50 x 0,45 m	Natural e artificial	PCM no interior de painel envidraçado com 4 camadas de vidro	Daqing (China)	A economia de energia pode chegar a 47,5%. Payback de 3,3 anos se considerada a melhor seleção do ponto de fusão do PCM.
Li <i>et al.</i> (2020b)	***	***	PCM no interior de janela com 3 camadas de vidro e aerogel de sílica	Daqing (China)	Importância do aerogel (isolamento) + PCM (armazenamento de energia térmica) na manutenção do conforto térmico em regiões frias.
Liu <i>et al.</i> (2016)	Cobertura de estádio	***	PCM no interior de painel envidraçado com 2 camadas de vidro	Daqing (China)	Parâmetros como espessura, inclinação, coeficientes de absorção e índice de refração do PCM nos estados sólido e líquido afetam diretamente o desempenho térmico e luminoso das coberturas.
Liu <i>et al.</i> (2017)	Células teste de 0,76 x 0,71 x 0,61 m e área envidraçada de 0,50 x 0,45 m		PCM no interior de painel envidraçado com 4 camadas de vidro		
Zhong <i>et al.</i> (2015)	***	Artificial	PCM no interior de janela de vidro duplo	Nanjing (China)	Deslocamento do pico de carga do sistema de ar condicionado e potencial promissor de economia de energia.

PCMs em outros sistemas

A associação de PCMs em persianas, venezianas e brises pode reduzir as trocas térmicas com o meio externo pelas aberturas, com pouca ou nenhuma intervenção na edificação.

Em relação aos dispositivos que utilizam do efeito chaminé, como chaminés solares e fachadas duplas, a sua associação com PCMs tem potencial para melhorar o condicionamento dos ambientes internos e economizar energia no sistema de climatização (MONGHASEMI; VADIEE, 2018). Porém, assim como ocorre com a associação PCM a persianas, venezianas e brises, o número de pesquisas que levaram em consideração esses dispositivos é bastante reduzido se comparado àquelas em outros sistemas construtivos como paredes, coberturas, envoltórias e vidros (Tabela 6).

Monghasemi e Vadiee (2018) realizaram um levantamento bibliográfico dos trabalhos que investigaram a associação de chaminés solares com PCM. Os autores destacaram algumas potencialidades dessa associação:

- (a) a utilização de PCMs pode diminuir a sensibilidade da chaminé solar a flutuações repentinas de calor;
- (b) é possível garantir maior número de horas de ventilação natural, especialmente durante a noite ou dias nublados; e
- (c) são necessárias pequenas modificações na configuração das chaminés solares para a incorporação de PCMs (Tabela 6).

Tabela 6 - PCMs em outros sistemas (Continua)

Autores (Ano)	Tipo do PCM (Composição e fabricante)	Forma de Incorporação	Temperatura de Mudança Fase (°C)	Cap. de Armazenamento de calor latente	Abordagem metodológica
Li, Darkwa e Kokogiannakis (2017)	(PX35, Rubitherm)	Microencapsulado	29,0 a 36,0	***	Ensaio em modelo físico; Simulação CFD (ANSYS FLUENT)
Gracia <i>et al.</i> (2013a)	Inorgânico (Sal Hidratado SP-22, Rubitherm)	Macroencapsulado	22,0	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Gracia <i>et al.</i> (2013b)					
GRACIA <i>et al.</i> , 2015a	Inorgânico (Sal Hidratado SP-22, Rubitherm)	Macroencapsulado	18,0 a 23,0	93 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Análise numérica
GRACIA <i>et al.</i> , 2015b		***	22,0	150 kJ/kg	Ensaio em modelo físico; Análise numérica
Li, Liu e Lu (2017)	Orgânico (Parafina)	***	38,0 a 43,0	175 kJ/kg	Análise numérica e medição em protótipo
Liu e Li (2015)		Macroencapsulado			Ensaio em modelo físico
Moradi, Kianifar e Wongwises (2017)	Orgânico (Parafina)	Incorporada em containers plásticos	51,8 a 55,8	250 kJ/kg	Simulação CFD (FLUENT); Ensaio em modelo físico
Saxena <i>et al.</i> (2020)	Orgânico (Parafina)	Tubos de cobre com PCM	41,0 a 44,0	250 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Silva <i>et al.</i> (2015a)	Orgânico (Parafina, RT28HC®)	Macroencapsulado	27,0 a 29,0	245 kJ/kg	Ensaio em modelo físico
Silva <i>et al.</i> (2015b)					

Tabela 6 - PCMs em outros sistemas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Li, Darkwa e Kokogiannakis (2017)	Célula teste de 1,0 x 0,9 x 0,4 m	Natural	PCM em brises compostos por chapas de alumínio dentro de uma fachada dupla	Ningbo (China)	Sistema capaz de reduzir a temperatura média do ar e a temperatura de saída na fachada dupla. Foi possível melhorar a transferência de calor entre o ar da cavidade e as lâminas com PCM, com absorção do calor excessivo na fachada dupla.
Gracia <i>et al.</i> (2013a)	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 5,1 m com área da superfície absorvedora de 6,4 m	Natural e artificial	PCM na superfície absorvedora de uma fachada dupla. Célula teste em alvenaria e argamassa cimentícia	Lleida (Espanha)	Sistema melhorou o comportamento térmico de todo o edifício com reduções no consumo elétrico dos sistemas de climatização.
Gracia <i>et al.</i> (2013b)					Necessidade do uso da ventilação noturna para carga/descarga do PCM. Sensibilidade do sistema em relação ao clima e demanda de resfriamento dos usuários.
Gracia <i>et al.</i> (2015a)	Célula teste de 2,4 x 2,4 x 5,1 m com área da superfície absorvedora de 6,4 m	Natural e artificial	PCM em fachada dupla	Lleida (Espanha)	Redução da temperatura em até 90%. Potencial do PCM para melhorar a regulação térmica de espaços internos.
Gracia <i>et al.</i> (2015b)			PCM na superfície absorvedora de uma fachada dupla. Célula teste em alvenaria e argamassa cimentícia	11 cidades	Benefícios energéticos dependem da incidência de radiação solar. As cidades com clima “temperado quente” e “neve” apresentaram potencial para fornecer refrigeração passiva. Potencial limitado em áreas “áridas” e “equatoriais”, exceto Brasília e Antofagasta.
Li, Liu e Lu (2017)	Chaminé solar teste de 1,0 x 1,6 x 0,4 m com PCM	***	PCM instalado na superfície absorvedora de uma chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	***	Impacto positivo no desempenho térmico com aumento da temperatura da superfície absorvedora e do fluxo de ar devido ao PCM. Necessária análise individual, pois, em algumas situações, pode aumentar o desconforto.
Liu e Li (2015)					Redução do fluxo de ar durante o período de carregamento do material e aumento do fluxo durante o período de descarga.
Moradi, Kianifar e Wongwises (2017)	Chaminé solar teste de 0,6 x 1,1 x 0,2 com PCM	Natural	PCM instalado na superfície absorvedora de uma chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	Bojnourd (Iran)	O momento de descarga do PCM apresenta aumento na eficiência total do sistema de 30%.

Tabela 6 - PCMs em outros sistemas (continuação)

Autores (Ano)	Tipo/Dimensão do ambiente	Condicionamento do ambiente	Tipo de sistema construtivo com PCM	Localização Geográfica do estudo	Principais Conclusões
Saxena <i>et al.</i> (2020)	Protótipo de uma chaminé solar com superfície absorvedora de 1,5 × 0,50 m	Natural e artificial	PCM preenchendo o interior de tubos de cobre que compõe a superfície chaminé solar feita em aço, vidro e isolante	Moradabad (Índia)	Foram obtidos resultados melhores em relação a transferência de calor, eficiência térmica, temperatura de exaustão devido ao uso do PCM.
Silva <i>et al.</i> (2015a)	Célula teste de 7,0 × 2,3 × 2,6 m	Natural	PCM em sistema janela/veneziana. Célula teste em aço galvanizado com painéis <i>drywall</i> com isolante	Aveiro (Portugal)	Redução nos picos de temperatura máxima e mínima de 6% e 11% respectivamente. Aumento em 45 minutos do atraso para atingir o mínimo e 60 minutos para atingir o pico máximo de temperatura.
Silva <i>et al.</i> (2015b)					Redução da temperatura em até 90%. Potencial do PCM para melhorar a regulação térmica de espaços internos.

Análise bibliométrica

Rede de autores e coautores

A partir do organograma relacionando os principais autores gerado no VOSviewer (Figura 1), foi possível identificar os grupos de pesquisas com o maior volume de publicações. Também foi possível identificar os possíveis coordenadores desses grupos de pesquisa, devido à repetição de seus nomes nas publicações.

Logo, destacam-se: as pesquisadoras Luisa F. Cabeza e Lidia Navarro da Universitat de Lleida e Alvaro de Gracia da Universitat Rovira, Espanha; Mario A. Medina da University of Kansas, EUA; Changyu Liu e Dong Li da Northeast Petroleum University e Yongcai Li da Chongqing University, China; e Shazim Ali Memon da Nazarbayev University, Cazaquistão.

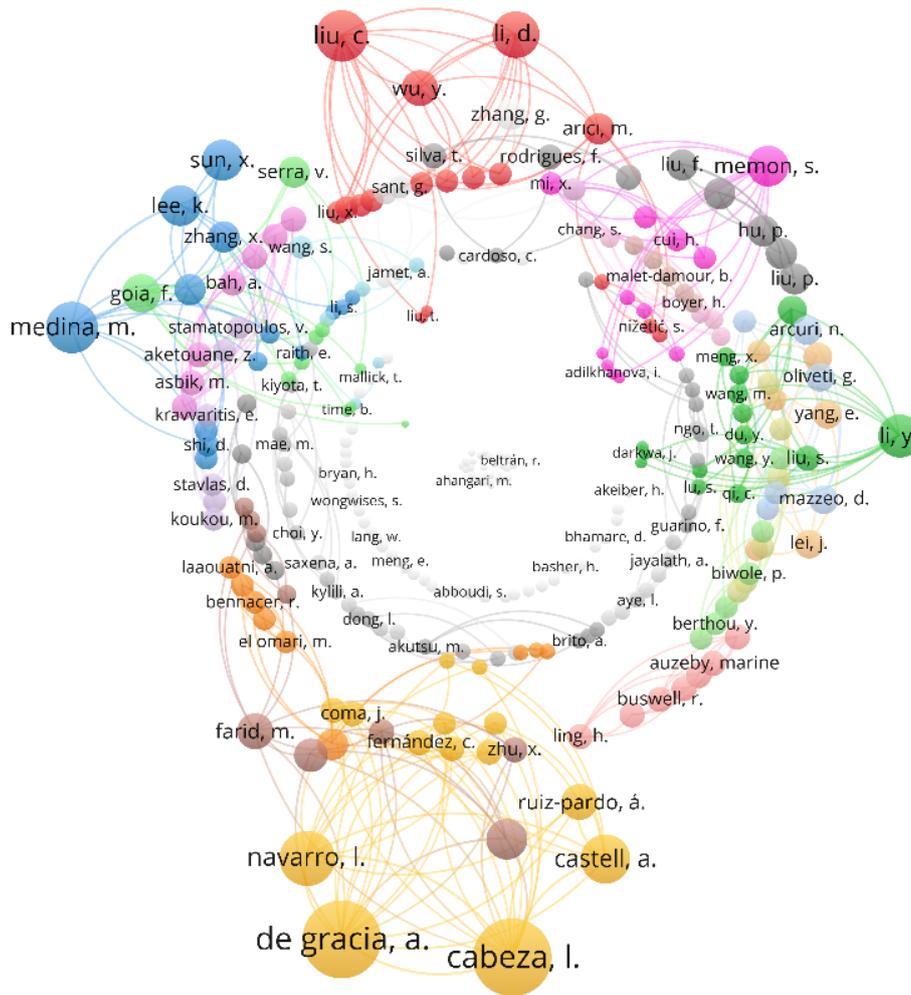
A identificação dos coordenadores de grupos de pesquisa pode ser uma forma de auxiliar as buscas de artigos em PCMs por autoria em paralelo com a busca de termos e palavras-chave. Dessa forma, é possível aprimorar a busca por assuntos específicos, como, por exemplo, PCMs em fachadas duplas a partir dos trabalhos de Alvaro de Gracia, com 4 publicações no tema.

O organograma ainda mostra 18 agrupamentos mais importantes (representados por cores saturadas) e agrupamentos menos representativos (representados por cores dessaturadas). Isso ocorre devido às opções de *clustering* do programa de análise bibliométrica que associa pesquisadores pela quantidade de pesquisas relacionadas, desconectando das redes os autores com menor número de publicações. Além disso, quando maior a opacidade dos grupos de autores, menor a associação com outros pesquisadores importantes no tema.

Palavras-chave

A partir do organograma apresentado na Figura 2 foi possível observar que as palavras-chave que mais se repetiram foram: a combinação entre PCM, PCMs, phase change material e conforto e performance térmica (*thermal comfort* e *thermal performance*). É possível observar seis maiores interconexões no meio do organograma, indicando a maior coocorrência de palavras associadas. Como exemplo, o termo PCM se relaciona fortemente com todas as palavras-chave no agrupamento laranja. Outros termos nos limites do *cluster* fazem paralelos com outros agrupamentos, i.e., *thermal performance* se relaciona igualmente com o agrupamento laranja e verde; no entanto, é incluída no agrupamento verde por ter ligação direta com modelos simulacionais e seus parâmetros. Devido ao diverso número de ligações, não é possível analisar conexões mais sutis como a relações entre *building envelope* e os caracterizantes de envoltória (*roof, location, configuration, construction* e *insulation*).

Figura 1 - Análise bibliométrica dos autores



Se comparadas às palavras-chave em destaque na Figura 2, as palavras que induziram a criação das *strings* de busca (materiais de mudança de fase, PCM, inércia térmica, edificações, arquitetura e sistemas passivos), possibilitam observar uma tendência na adoção de palavras-chave em diversas pesquisas em PCM. Observou-se algumas pequenas variações e sinônimos que não foram consideradas perdas de informações, mas podem ser levadas em consideração em pesquisas com recortes mais específicos. Como exemplo, pode ser citado massa térmica para se referir à inércia térmica e envelope, envelope da edificação e edificações residenciais como paralelo para edificações e arquitetura. O *software* VOSviewer permite inserção de sinônimos utilizando uma biblioteca *Thesaurus* em pesquisas mais avançadas. Para que o programa compreenda palavras relacionadas como sinônimos é necessário que o usuário compreenda a linguagem de programação *Python* para a criação do arquivo de definições, sinônimos, antônimos e substituições.

A partir da interpretação dos termos que mais se repetiram, é possível afirmar que existe uma tendência entre as áreas, métodos e parâmetros de maior interesse nas pesquisas de PCM e as palavras destacadas na Figura 2. Apesar do agrupamento em seis *clusterings*, as palavras podem ser divididas em três grupos maiores. Isso ocorre porque o *software* cria agrupamentos por conexão entre pesquisas e não por assuntos. O primeiro grupo se refere aos dados de saída e à forma como a incorporação dos PCMs foi analisada, com os termos traduzidos:

- (a) performance térmica;
- (b) conforto;
- (c) conforto térmico, economia de energia, simulação; e
- (d) EnergyPlus.

É importante destacar que intencionalmente não foram inseridos termos que levassem às buscas para recortes específicos. Os termos que se diferenciaram das palavras presentes nas *strings* surgiram a partir das buscas gerais.

Logo, para buscas sobre abordagens, características e climas específicos em pesquisas com PCMs recomenda-se uma combinação entre os termos citados, que nesse recorte podem ser considerados gerais, e a utilização de palavras-chave específicas.

Distribuição geográfica das pesquisas em PCMs

Com o objetivo de analisar a distribuição geográfica das pesquisas, foram mapeadas todas as cidades/climas contemplados na avaliação de sistemas construtivos com PCM. Foram identificadas 295 cidades/climas para os quais os estudos foram realizados levando em consideração medições e simulações. A Figura 3, na qual cada marcação representa uma cidade, foi elaborada a partir dos estudos apresentados nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 e sobreposta a classificação climatológica de Köppen-Geiger.

O levantamento mostra uma distribuição ampla das pesquisas com PCM, com a maioria dos estudos concentrados no Hemisfério Norte, acima do Trópico de Câncer. É possível observar estudos em todos os continentes, com exceção da Antártica, em diversas condições climáticas e em diferentes latitudes (Figura 3).

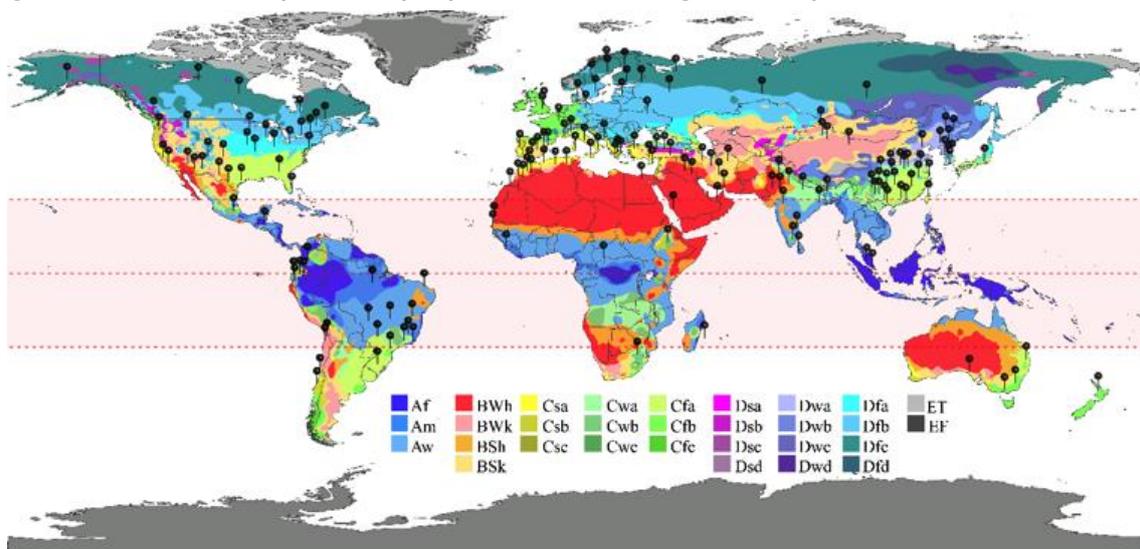
Pesquisas em climas temperados, característicos do grupo C de Köppen, são as mais recorrentes e representam 38% de todos os estudos encontrados. No grupo C, 64% dos estudos acontecem para o subtipo verão quente, seguido de 27% das ocorrências para verões frescos e apenas 9% para verões frios. Pouco menos da metade dos estudos em climas temperados se refere a invernos secos. Os trabalhos se concentram principalmente no sudeste asiático, com destaque para a China, sudeste dos Estados Unidos, Europa Ocidental, Oceania e América do Sul, com três estudos no sul do Brasil.

O grupo B de Köppen para climas com baixo índice de precipitação anual é o segundo mais expressivo, com 30% das ocorrências, principalmente para o tipo semiárido no oeste dos Estados Unidos e em maior quantidade no Oriente Médio.

O grupo continental e subártico aparece como o terceiro mais estudado com ênfase para tipo inverno seco e verão frio. As ocorrências se concentram principalmente nos países europeus setentrionais e ocidentais.

Desconsiderando o grupo polar/alpino que não apresenta nenhum estudo, o grupo tropical é o menos representativo dentre todos. Esse grupo é responsável por apenas 15% das ocorrências, especialmente para o tipo de savana, presente principalmente na região entre trópicos. Nota-se também que dentro do grupo tropical poucas pesquisas foram realizadas para os tipos equatorial e de monções.

Figura 3 - Cidades contempladas em pesquisas com PCMs - Região dos trópicos destacada em rosa



Fonte: adaptado de Peel, Finlayson e McMahon (2007).

A combinação do levantamento das cidades e da revisão integrativa de literatura demonstram a versatilidade dos PCMs e seu grande potencial de uso em diversas aplicações e em diversos climas. Essas regiões apresentam número significativo de horas em desconforto, principalmente por calor, e grandes gastos de energia para resfriamento, agravados pelo aumento crescente no consumo de energia pelos países em desenvolvimento nessas regiões.

Pesquisas como as realizadas por Brito *et al.* (2017), Pons e Stanescu (2017), Guichard *et al.* (2015), Saffari *et al.* (2017), Lei, Yang e Yang (2016), Reddy e Mudgal (2017) e Muthuvel *et al.* (2015) apresentaram os benefícios da utilização de PCMs nessas regiões. Evidentemente, é necessário estudar o desempenho térmico e energético da edificação em relação ao clima, os parâmetros construtivos e as características dos PCMs para alcançar os benefícios esperados. Além disso, existe a possibilidade de que no grupo equatorial e de monções, com temperaturas externas elevadas durante todo o ano e muitas vezes acima do intervalo de conforto, a utilização de PCM e consequentemente o aumento da capacidade térmica da edificação acarrete o aumento do desconforto dos usuários por calor e aumento no consumo de energia (BRITO *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2020).

Logo, vê-se a importância de mais estudos com PCMs em regiões tropicais com clima quente e úmido, com foco no aumento do desempenho térmico, na mitigação do desconforto por calor e na redução do consumo de energia por condicionamento artificial.

Considerações finais

Este artigo apresenta uma revisão integrativa de literatura do estado da arte e análise bibliométrica para publicações relacionadas à utilização de PCMs com aplicação em sistemas construtivos passivos em edificações. O uso da revisão integrativa de literatura como procedimento metodológico se mostrou uma ferramenta efetiva para o levantamento, seleção e análise de artigos. Embora esse método seja comum nas áreas das ciências agrárias e da saúde, a partir do que foi exposto, acredita-se no seu potencial também para uso nas áreas relacionadas a tecnologias do ambiente construído.

Inicialmente foram apresentados os PCMs, seu funcionamento, formas de aplicação, características térmicas, químicas, físicas e econômicas necessárias para seu uso na construção civil. Na sequência, foram discutidas as vantagens e desvantagens dos tipos de PCM e sua forma de incorporação em elementos construtivos.

De maneira geral, a utilização de PCMs em todos os sistemas construtivos apresentou potencial relacionado ao aumento das horas de conforto e redução do consumo de energia, com algumas exceções. Outras vantagens, como *payback* reduzido, redução do fluxo de calor, redução do risco de condensação e controle da umidade foram investigadas e se mostraram positivas.

Parte dos autores recomenda uso do PCM associado à ventilação seletiva, principalmente a noturna. Dessa forma, os PCMs têm condições de absorver energia durante o dia e liberá-la durante a noite. Sem esse ciclo, o material funcionará como um armazenador de calor sensível, sem grande parte dos benefícios esperados.

Sobre as propriedades dos PCMs, 66% das pesquisas utilizou PCMs orgânicos, compostos por parafinas e ácidos graxos. A forma de utilização foi diversificada, com uma tendência maior de uso na forma de componente encapsulado (micro e macro), presente em 28% dos trabalhos.

Em relação à temperatura de mudança de fase, 74% dos estudos investigou temperaturas entre 22 °C e 28 °C enquanto 50% das pesquisas adotaram capacidades de armazenamento de calor latente entre 150 kJ/kg a 210 kJ/kg. Temperaturas de mudança de fase mais altas, acima de 30 °C, foram observadas para PCMs utilizados em coberturas, sistemas envidraçados e chaminés solares, que são mais comumente expostos à radiação solar direta. Estudos em climas quentes, sejam eles secos ou úmidos, também apresentaram PCMs com temperaturas de mudança de fase mais altas, na ordem de 30 °C. De forma geral, as investigações consideram faixas de temperatura específicas, muitas vezes intrínsecas aos estudos, o que torna generalista a extrapolação da análise dos dados.

A maioria das pesquisas utilizou algum tipo de medição como abordagem metodológica, com destaque para medições em células testes com dimensões entre 1 m e 2 m, adotadas em 52% dos estudos. Destaca-se também que 28% dos trabalhos utilizaram de simulação termoenergética com o *software* EnergyPlus.

Em relação ao ambiente de análise, a maioria possui baixa capacidade térmica. Das pesquisas que avaliaram fechamentos opacos, 46% foram compostos por sistemas construtivos de camadas homogêneas como gesso, isolante, compensado, madeira, e painéis pré-fabricados em concreto e 69% foram avaliados com climatização artificial ou híbrida.

A partir dos parâmetros investigados, fica evidente a influência da relação entre as condições climáticas e a edificação no desempenho térmico dos PCMs. As condições climáticas vão além das diferenças entre regiões e climas, com impacto na variação das temperaturas entre dia e noite e durante as estações do ano.

Além do desempenho térmico da edificação frente ao clima, destacam-se a orientação solar da superfície, a camada em que o PCM está instalado, a espessura da camada de PCM, o tipo de material construtivo associado ao PCM, a geometria dos ambientes e da edificação, tipos de materiais e condições de contorno da edificação, a temperatura de mudança de fase, a capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente, questões relacionadas à ocupação dos espaços internos, seu padrão de uso e carga térmica.

O excesso de parâmetros associados ao uso dos PCMs e a possibilidade de ajustar cada um deles para correta aplicação é, possivelmente, o que garante a versatilidade do material e sua aplicação para vários locais com condições climáticas e de uso significativamente diferentes. Entretanto, isso também contribui para resultados discrepantes entre pesquisas. A grande variação dos parâmetros gera pesquisas com objetivos ou metodologias significativamente diferentes, o que dificulta a comparação entre os resultados e levou este trabalho a estabelecer o componente construtivo ao qual o PCM foi associado como subitem para agrupamento e classificação dos artigos.

É também vista como uma limitação a relativa pouca utilização de PCMs reais devido à falta de padronização por parte dos fabricantes. A falta de uniformidade na apresentação dos produtos contribui para continuação de pesquisas com PCMs teóricos ou para seleção incorreta, imprecisa ou superestimada de materiais não representativos.

Para além das características dos PCMs, poucas são as pesquisas que ofereceram informações sobre a viabilidade econômica da sua aplicação. De forma geral, os autores demonstram diminuição do consumo geral de energia, mas não oferecem informações sobre retorno do investimento. Isso ocorre principalmente devido à incerteza sobre o uso de PCMs em longo prazo.

Para a seleção dos PCMs, a maioria dos trabalhos cobre apenas um ou dois parâmetros utilizando otimizações mono-objetivo. Como metodologias promissoras, apontamos a pesquisa de Berardi e Soudian (2019), que investiga a utilização de diversos tipos de PCM, faixas de temperatura e elementos construtivos concomitantemente, levando a uma abordagem assertiva e reproduzível, mesmo com a utilização de PCMs teóricos.

É uma tendência para pesquisas futuras a utilização de simulações paramétricas para uma avaliação simultânea de diversas características e propriedades a fim de correlacionar as variáveis intervenientes no desempenho, incluindo análises de sensibilidade e otimizações multiobjetivo. Essa abordagem metodológica pode permitir uma série de investigações com uso de PCMs que não são possíveis em pesquisas que consideram apenas medições, por exemplo. Ainda pode ser citada a necessidade de avaliações pós-ocupação, que poderão surgir após o uso amplo do material em edificações, principalmente as comerciais.

Por fim, destaca-se a distribuição heterogênea das pesquisas ao redor do mundo. Existe o potencial do material proporcionar conforto e economia de energia para grande parte dos climas, entretanto o número de pesquisas em regiões temperadas, com latitudes médias, é maior do que em climas tropicais com baixas latitudes. A análise do emprego de PCMs nessas regiões é também uma lacuna para maiores investigações, visto o número reduzido de trabalhos que levaram em consideração PCMs com temperaturas de fusão acima de 30 °C associados ao uso da ventilação natural.

Portanto, a utilização de PCMs em edificações compostas por sistemas construtivos heterogêneos é uma demanda relevante e um campo de pesquisa a ser investigado em climas tropicais quentes e úmidos e de baixa latitude, como grande parte do Brasil.

Referências

- AHANGARI, M.; MAEREFAT, M. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions *Sustainable Cities and Society*, v. 44, p.120-129, 2019.
- AKEIBER, H. J.; WAHID, M. A.; HUSSEN, H. M. A newly composed paraffin encapsulated prototype roof structure for efficient thermal management in hot climate. *Energy*, v. 104, p. 99–106, 2016.
- AKETOUANE, Z. *et al.* Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of Moroccan buildings. *Building Simulation*, v. 11, n. 6, p. 1109–1122, 2018.

- AL-SAAD, S. N.; ZHAI, Z. A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls. **Energy and Buildings**, v. 109, p. 274–290, 2015.
- ALLISON, D. A. **The Patron-Driven Library**: a practical guide for managing collections and services in the digital age. Nebraska: Chandos, 2013.
- ARICI, M. *et al.* PCM integrated to external building walls: an optimization study on maximum activation of latent heat. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, p. 114560, 2020.
- AUZEBY, M. *et al.* Effectiveness of using phase change materials on reducing summer overheating issues in UK residential buildings with identification of influential factors. **Energies**, v. 9, n. 8, 2016.
- AZIZ, S. *et al.* CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement. **Applied Thermal Engineering**, v. 143, p. 1085–1092, 2018.
- BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361–1368, 2010.
- BAI, L. *et al.* Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. **Building and Environment**, v. 169, p. 106531, 2020.
- BANIASSADI, A.; SAILOR, D. J.; BRYAN, H. J. Effectiveness of phase change materials for improving the resiliency of residential buildings to extreme thermal conditions. **Solar Energy**, v. 188, p. 190–199, 2019.
- BASSOTTO, L. C. *et al.* Eficiência produtiva e riscos para propriedades leiteiras: uma revisão integrativa. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 4, p. 1–20, 2022.
- BELTRÁN, R. D.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. **Journal of Building Engineering**, v. 24, p. 100726, 2019.
- 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, 2019.
- BERTHOU, Y. *et al.* Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials. **Solar Energy**, v. 115, p. 733–742, 2015.
- BHAMARE, D. K.; RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101018, 2020.
- BOUGUERRA, E. H.; RETIEL, N. Effect of the switch temperature on the summer performance of phase change materials in buildings. **Journal of Energy Engineering**, v. 141, n. 4, 2015.
- BRITO, A. **Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo**. São Paulo, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- BRITO, A. *et al.* Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 125–145, jan./mar. 2017.
- CHANG, S. J. *et al.* Hygrothermal performance improvement of the Korean wood frame walls using macro-packed phase change materials (MPPCM). **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 457–465, 2017.
- CHENG, L.; FENG, J. Form-stable phase change materials based on delignified wood flour for thermal management of buildings. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 129, p. 105690, 2020.
- CHENG, T. *et al.* A newly designed paraffin@VO₂ phase change material with the combination of high latent heat and large thermal conductivity. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 559, p. 226–235, 2020.
- COSTA, J. A. C. *et al.* Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117167, 2019.
- CUI, Y. *et al.* Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 763–770, 2015.
- 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, 2020.

- DONG, L. *et al.* Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. **Energy Conversion and Management**, v. 100, p. 147–156, 2015.
- DURAKOVIC, B.; TORLAK, M.; SCIENCES, N. Experimental and numerical study of a PCM window model as a thermal energy storage unit. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 12, p. 272–280, 2017.
- FARAJ, K. *et al.* Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109579, 2020.
- FERREIRA, A.; NÓVOA, P. R. O.; MARQUES, A. T. Multifunctional material systems: a state-of-the-art Review. **Composite Structures**, v. 151, p. 3-35, 2016.
- FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.; SARCINELLA, A. Phase change materials for energy efficiency in buildings and their use in mortars. **Materials**, v. 12, p. 1260, 2019.
- GIOVANNINI, L. *et al.* A comparative analysis of the visual comfort performance between a PCM Glazing and a conventional selective double glazed unit. **Sustainability**, v. 10, 2018.
- GOIA, F. *et al.* Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 302–312, 2015.
- GOIA, F.; BOCCALERI, E. Physical-chemical properties evolution and thermal properties reliability of a paraffin wax under solar radiation exposure in a real-scale PCM window system. **Energy and Buildings**, v. 119, p. 41–50, 2016.
- GOIA, F.; PERINO, M.; SERRA, V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. **Solar Energy**, v. 100, p. 217–233, 2014.
- GOUNNI, A.; EL ALAMI, M. The optimal allocation of the PCM within a composite wall for surface temperature and heat flux reduction: an experimental Approach. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 1488–1494, 2017.
- GRACIA, A. *et al.* A simple model to predict the thermal performance of a ventilated facade with phase change materials. **Energy & Buildings**, v. 93, p. 137–142, 2015a.
- GRACIA, A. *et al.* Energy performance of a ventilated double skin facade with PCM under different climates. **Energy & Buildings**, v. 91, p. 37–42, 2015b.
- GRACIA, A. *et al.* Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings: lessons learnt. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1014–1026, 2018.
- GRACIA, A. *et al.* Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 324–332, 2013a.
- GRACIA, A. *et al.* Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 508–515, 2013b.
- GRYNNING, S.; GOIA, F.; TIME, B. Dynamic thermal performance of a PCM window system: characterization using large scale measurements. **Energy Procedia**, v. 78, p. 85–90, 2015.
- GUARINO, F. *et al.* PCM thermal storage design in buildings: experimental studies and applications to solarium in cold climates. **Applied Energy**, v. 185, p. 95–106, 2017.
- GUICHARD, S. *et al.* Experimental investigation on a complex roof incorporating phase-change material. **Energy & Buildings**, v. 108, p. 36–43, 2015.
- HASAN, M. I.; BASHER, H. O.; SHDHAN, A. O. Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 36, p. 42–58, 2018.
- HE, H. *et al.* A novel polynary fatty acid/sludge ceramsite composite phase change materials and its applications in building energy conservation. **Renewable Energy**, v. 76, p. 45–52, 2015.
- HU, Y.; HEISELBERG, P. K. Energy & Buildings a new ventilated window with PCM heat exchanger: performance analysis and design optimization. **Energy & Buildings**, v. 169, p. 185–194, 2018.
- HUANG, X. *et al.* Morphological characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 128–145, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives 2020**: flagship report. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>. Acesso em: 02 nov. 2021.

- JANGELDINOV, B. *et al.* 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, 2020.
- JAYALATH, A. *et al.* Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney. **Energy & Buildings**, v. 121, p. 152–158, 2016.
- JELLE, B. P.; KALNÆS, S. E. Phase change materials for application in energy-efficient buildings. In: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Cost-effective energy efficient building retrofitting: materials, technologies, optimization and case studies**. Trondheim: Elsevier, 2017.
- JIN, X. *et al.* Optimal location of PCM layer in building walls under Nanjing (China) weather conditions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 129, n. 3, p. 1767–1778, 2017.
- JIN, X.; MEDINA, M. A.; ZHANG, X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1057–1063, 2016.
- KAHWAJI, S. *et al.* Stable, low-cost phase change material for building applications: the eutectic mixture of decanoic acid and tetradecanoic acid. **Applied Energy**, v. 168, p. 457–464, 2016.
- KAHWAJI, S.; WHITE, M. A. Prediction of the properties of eutectic fatty acid phase change materials. **Thermochimica Acta**, v. 660, p. 94–100, 2018.
- KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 150–176, 2015.
- KENZHEKHANOV, S.; MEMON, S. A.; ADILKHALANOVA, I. Quantitative evaluation of thermal performance and energy saving potential of the building integrated with PCM in a subarctic climate. **Energy**, v. 192, p. 116607, 2020.
- KHARBOUCH, Y. *et al.* Thermal performance investigation of a PCM-enhanced wall/roof in northern Morocco. **Building Simulation**, v. 11, n. 6, p. 1083–1093, 2018.
- KIM, H. B. *et al.* Experimental analysis of thermal performance in buildings with shape-stabilized phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 524–533, 2017.
- KOLÁČEK, M.; CHARVÁTOVÁ, H.; SEHNÁLEK, S. Experimental and numerical research of the thermal properties of a PCM window panel. **Sustainability**, v. 9, 2017.
- KONSTANTINIDOU, C. A.; LANG, W.; PAPADOPOULOS, A. M. Multiobjective optimization of a building envelope with the use of phase change materials (PCMs) in Mediterranean climates. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 9, p. 3030–3047, 2018.
- LAAOUATNI, A. *et al.* Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. **Energy and Buildings**, v. 187, p. 50–63, 2019.
- LAGOU, A. *et al.* Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 452–464, 2019.
- LEE, K. O. *et al.* Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. **Applied Energy**, v. 137, p. 699–706, 2015.
- LEE, K. O. *et al.* Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls. **Solar Energy**, v. 163, p. 113–121, 2018.
- LEE, K. O.; MEDINA, M. A.; SUN, X. On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: evaluation of a thin phase change material (PCM) layer. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 86–92, 2015.
- LEI, J. *et al.* Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategies for building cooling load reduction in tropics. **Applied Energy**, v. 190, p. 57–63, 2017.
- LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. **Applied Energy**, v. 162, p. 207–217, 2016.
- LI, D. *et al.* Influence of glazed roof containing phase change material on indoor thermal environment and energy consumption. **Applied Energy**, v. 222, p. 343–350, 2018.
- LI, D. *et al.* Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: a review. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117327, 2020a.

- LI, D. *et al.* Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China. **Applied Thermal Engineering**, v. 165, p. 114547, 2020b.
- LI, D. *et al.* Thermal performance of a PCM-filled double glazing unit with different optical properties of phase change material. **Energy & Buildings**, v. 119, p. 143–152, 2016.
- LI, Y. *et al.* Research on indoor thermal environment improvement of lightweight building integrated with phase change material under different climate conditions. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1628–1634, 2015.
- LI, Y.; DARKWA, J.; KOKOGIANNAKIS, G. Heat transfer analysis of an integrated double skin façade and phase change material blind system. **Building and Environment**, v. 125, p. 111–121, 2017.
- LI, Y.; LIU, S.; LU, J. Effects of various parameters of a PCM on thermal performance of a solar chimney. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 1119–1131, 2017.
- LIRA-OLIVER, A.; VILCHIS-MARTÍNEZ, S. Thermal inertia performance evaluation of light-weighted construction space envelopes using phase change materials in Mexico city's climate. **Technologies**, v. 5, n. 4, p. 69, 2017.
- LIU, C. *et al.* Investigations on thermal and optical performances of a glazing roof with PCM layer. **International Journal of Energy Research**, v. 41, p. 2138–2148, 2017.
- LIU, C. *et al.* Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof. **Energy & Buildings**, v. 125, p. 267–275, 2016.
- LIU, J. *et al.* Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China. **Renewable Energy**, v. 147, p. 356–373, 2020.
- LIU, S.; LI, Y. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney without and with PCM. **Renewable Energy**, v. 81, p. 338–346, 2015.
- LU, S. *et al.* Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials. **Energy & Buildings**, v. 127, p. 159–169, 2016.
- LUO, R. *et al.* Fabrication of paraffin@SiO₂ shape-stabilized composite phase change material via chemical precipitation method for building energy conservation. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 373–380, 2015.
- MAHMUD, I. C. *et al.* Tabagismo em idosos: uma revisão integrativa. **Scientia Medica**, Porto Alegre, v. 31, n. 2, p. 1–15, 2021.
- MARANI, A.; NEHDI, M. L. Integrating phase change materials in construction materials: critical review. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 36–49, 2019.
- MARIN, P. *et al.* 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, 2016.
- MARKARIAN, E.; FAZELPOUR, F. Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM. **Solar Energy**, v. 191, p. 481–496, 2019.
- MATERA, N. *et al.* Optimal Design of PCM in Internal Walls for nZEB Buildings. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING; IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS EUROPE, Palermo, 2018. **Proceedings [...]** Palermo, 2018.
- MATHIS, D. *et al.* Performance of wood-based panels integrated with a bio-based phase change material: a full-scale experiment in a cold climate with timber-frame huts. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 1–15, 2018.
- MAZZEO, D.; OLIVETI, G.; ARCURI, N. A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days. **Energies**, v. 10, n. 5, 2017.
- MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and cold storage with PCM: an up-to-date introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- MEHRALI, M. *et al.* From rice husk to high performance shape stabilized phase change materials for thermal energy storage. **RSC Advances**, v. 6, n. 51, p. 45595–45604, 2016.
- MEMARIAN, S. *et al.* Single and combined phase change materials: their effect on seasonal transition period. **Energy and Buildings**, v. 169, p. 453–472, 2018.
- MEMON, S. A. Phase change materials integrated in building walls: a state of the art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 870–906, 2014.

- MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C.; GALVÃO, C. M. Revisão Integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na enfermagem. **Texto e Contexto - Enfermagem**, v. 7, 2008.
- 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, 2017.
- MI, X. *et al.* Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. **Applied Energy**, v. 175, p. 324–336, 2016.
- MOHSENI, E.; TANG, W.; WANG, S. Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 182–195, 2019.
- MONGHASEMI, N.; VADIEE, A. A review of solar chimney integrated systems for space heating and cooling application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2714–2730, 2018.
- MORADI, R.; KIANIFAR, A.; WONGWISES, S. Optimization of a solar air heater with phase change materials: experimental and numerical study. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 89, p. 41–49, 2017.
- MUSTAPHA, A. N. *et al.* Latent heat thermal energy storage: a bibliometric analysis explicating the paradigm from 2000–2019. **Journal of Energy Storage**, v. 33, p. 102026, 2021.
- MUTHUVEL, S. *et al.* Passive cooling by phase change material usage in construction. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 36, n. 4, p. 411–421, 2015.
- NATEPHRA, W. *et al.* Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. **Building and Environment**, v. 124, p. 194–208, 2017.
- NGHANA, B.; TARIKU, F. Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate. **Building and Environment**, v. 99, p. 221–238, 2016.
- OLIVEIRA, R. B. de; GONZALES, T. S.; CARVALHO, M. T. M. Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021001, 2021.
- OROPEZA-PEREZ, I.; ØSTERGAARD, P. A. Active and passive cooling methods for dwellings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2017, p. 531–544, 2018.
- OZDENEFE, M.; DEWSBURY, J. Thermal performance of a typical residential Cyprus building with phase change materials. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 85–102, 2016.
- PASUPATHY, A.; VELRAJ, R.; SEENIRAJ, R. V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 39–64, 2008.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- 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, 2017.
- RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J.; WANG, X. Experimental research on using form-stable PCM-integrated cementitious composite for reducing overheating in buildings. **Buildings**, v. 9, n. 3, 2019.
- RATHORE, P. K. S.; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1300–1313, 2020.
- 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, 2019.
- REDDY, K. S.; MUDGAL, V. Thermal performance analysis of multi-phase change material layer-integrated building roofs for energy efficiency in built-environment. **Energies**, v. 10, p. 1367, 2017.
- RODRIGUEZ-UBINAS, E. *et al.* Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 49–62, 2012.
- SAFFARI, M. *et al.* Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model. **Energy and Buildings**, v. 112, p. 159–172, 2016.

- SAFFARI, M. *et al.* Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings. **Applied Energy**, v. 202, p. 420–434, 2017.
- SAXENA, A. *et al.* Design and thermal performance evaluation of an air heater with low cost thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 167, p. 114768, 2020.
- SELKA, G.; KORTI, A. I. N.; ABOUDI, S. Dynamic thermal behaviour of building using phase change materials for latent heat storage. **Thermal Science**, v. 19, n. 2, p. 603–613, 2015.
- SHARMA, A. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 318–345, 2007.
- SHARMA, V.; RAI, A. C. Performance assessment of residential building envelopes enhanced with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 208, p. 109664, 2020.
- SILVA, T. *et al.* Development of a window shutter with phase change materials: full scale outdoor experimental approach. **Energy & Buildings**, v. 88, p. 110–121, 2015b.
- SILVA, T. *et al.* Performance of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 84, p. 246–256, 2015a.
- SINKA, M. *et al.* Experimental testing of phase change materials in a warm-summer humid continental climate. **Energy and Buildings**, v. 195, p. 205–215, 2019.
- SOLGI, E. *et al.* 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, 2019.
- SONG, M. *et al.* Review on building energy performance improvement using phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 776–793, 2018.
- SOUZA, M. T. de; DIAS, M.; CARVALHO, R. de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein**, v. 8, p. 102–106, 2010.
- 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, 2019.
- SU, W.; DARKWA, J.; KOKOGIANNAKIS, G. Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 373–391, 2015.
- SUN, X. *et al.* Parameter design for a phase change material board installed on the inner surface of building exterior envelopes for cooling in China. **Energy Conversion and Management**, v. 120, p. 100–108, 2016.
- THIELE, A. M. *et al.* Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 374–386, 2015.
- THIELE, A. M.; SANT, G.; PILON, L. Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 215–227, 2015.
- TOKUÇ, A.; BASARAN, T.; YESÜGEY, C. An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: the case of a flat roof in Istanbul. **Energy & Buildings**, v. 102, p. 91–104, 2015.
- TORRACO, R. J. Writing integrative literature reviews: using the past and present to explore the future. **Human Resource Development Review**, v. 15, n. 4, p. 404–428, 2016.
- ÜRGE-VORSATZ, D. *et al.* Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 85–98, 2015.
- VRACHOPOULOS, M. G. *et al.* Investigating the performance of a test phase change material chamber for passive solar applications: experimental and theoretical approach. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 34, n. 9, p. 614–627, 2015.
- WAHID, M. A. *et al.* 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, 2017.
- WANG, H. *et al.* Parametric analysis of applying PCM wallboards for energy saving in high-rise lightweight buildings in Shanghai. **Renewable Energy**, v. 145, p. 52–64, 2020.
- WANG, S. M. *et al.* Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 419–425, 2018.

- WEINGRILL, H. M. *et al.* Conductive high-density polyethylene as novel phase-change material: application-relevant long-term stability. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 2, p. 1–10, 2020.
- WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005.
- XU, B. *et al.* Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. **Applied Energy**, v. 160, p. 358–367, 2015.
- YAO, C. *et al.* Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building. **Energy Conversion and Management**, v. 155, p. 20–31, 2018.
- YU, J. *et al.* Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized PCM. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2538–2549, 2020.
- ZALBA, B. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 251–283, 2003.
- ZHANG, Y. P. *et al.* Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 10, p. 1262–1269, 2006.
- ZHAO, M.; ZHANG, X.; KONG, X. Preparation and characterization of a novel composite phase change material with double phase change points based on nanocapsules. **Renewable Energy**, v. 147, p. 374–383, 2020.
- ZHONG, K. *et al.* Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material. **Energy & Buildings**, v. 106, p. 87–95, 2015.
- ZHOU, D.; EAMES, P. Phase Change Material Wallboard (PCMW) melting temperature optimisation for passive indoor temperature control. **Renewable Energy**, v. 139, p. 507–514, 2019.
- ZHOU, Q. *et al.* Thermal performance of microencapsulated phase change material (mPCM) in roof modules during daily operation. **Energies**, v. 11, n. 3, 2018.
- ZHU, N. *et al.* Energy performance of double shape-stabilized phase change materials wallboards in office building. **Applied Thermal Engineering**, v. 105, p. 180–188, 2016b.
- ZHU, N. *et al.* Energy saving potential of a novel phase change material wallboard in typical climate regions of China. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 360–369, 2016a.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) - Demanda Universal nº 001/2021 sob Código de Financiamento APQ-00266-21, do FORTIS - Programa de Apoio aos Cursos Três e Quatro da UFV, Parceria UFV/FAPEMIG e a parceria com o Laboratório de Engenharia Química 1/CCAUE/UFES.

Matheus Menezes Oliveira

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Viçosa | Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário | Viçosa - MG - Brasil | CEP 36570-900 | Tel.: (31) 3899-1979 | E-mail: matheus.meneses@gmail.com

Caio de Carvalho Lucarelli

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Viçosa | E-mail: lucarelli.caio@outlook.com

Joyce Correna Carlo

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Viçosa | Tel.: (31) 3612-6021 | E-mail: joycecarlo@ufv.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.