

MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE: ESTUDO DE REVISÃO

Data de submissão: 27/06/2023

Data de aceite: 03/07/2023

Mariana Natale Fiorelli Fabiche

Universidade Estadual de Maringá,
Umuarama – PR
lattes.cnpq.br/8888223123528183

PALAVRAS-CHAVE: Energia térmica, Ciclos, Intervalo de temperatura, Aplicação.

PHASE CHANGE MATERIALS: REVIEW STUDY

RESUMO: Atualmente, há um crescente interesse na utilização de materiais de mudança de fase (PCMs - Phase Change Materials) em diversos setores industriais, desde tintas automotivas, vestuário e, inclusive, revestimentos de fachadas na construção civil. Os Materiais de Mudança de Fase são capazes de absorver e dissipar grandes quantidades de energia térmica ao longo dos ciclos e essa mudança pode ocorrer durante toda sua vida útil. São classificados em três grupos, com base em sua composição química sendo: orgânica, inorgânica e as misturas eutéticas. Muitos são os tipos de PCMs, cada qual possui um intervalo de temperatura específica em função de sua aplicação e das suas características físicas e químicas. Tendo em vista a crescente aplicação desses materiais, esse trabalho apresenta uma breve revisão dos PCMs, algumas estratégias de escolha desse material, bem como os tipos que caracterizam o material estudado.

ABSTRACT: Currently, there is a growing interest in the use of phase change materials (PCMs - Phase Change Materials) in several industrial sectors, from automotive paints, clothing and even facade coatings in civil construction. Phase Change Materials are capable of absorbing and dissipating large amounts of thermal energy over cycles and this change can occur throughout their lifetime. They are classified into three groups, based on their chemical composition: organic, inorganic and eutectic mixtures. There are many types of PCMs, each of which has a specific temperature range depending on its application and its physical and chemical characteristics. In view of the increasing application of these materials, this work presents a brief review of PCMs, some strategies for choosing this material, as well as the types that characterize the studied material.

KEYWORDS: Thermal energy, Cycles, Temperature range, Application.

1 | INTRODUÇÃO

Com o crescimento econômico dos países, houve um aumento do consumo de energia elétrica proveniente principalmente de fontes não renováveis, o que, por vez, afeta diretamente a população e o meio ambiente (CUNHA; AGUIAR; FERREIRA, 2017).

De acordo com Almeida, Brandalise e Mizgier (2022), na arquitetura contemporânea, o uso de materiais leves com baixa inércia térmica em edificações residenciais está cada vez mais difundido. Uma solução para aumentar a inércia térmica dessas edificações é o uso de materiais de mudança de fase (PCM).

Os materiais de mudança de fase, do termo em inglês *Phase Change Materials* (PCMs), são desenvolvidos com o objetivo de atuar como “armazenadores” de energia na forma de calor (BRITO et al., 2017). O interesse em PCMs na área da construção civil está na capacidade de aproveitar o armazenamento de energia através da transição de fase de calor latente em vez da transição de calor sensível (FLEISCHER, 2015).

Esses materiais têm sido aplicados em revestimento de fachadas, visando tornar os edifícios mais eficientes em nível energético, de maneira que evitem a necessidade de sistemas de geração/absorção de calor, como, por exemplo, os sistemas de ar-condicionado, que possuem grande consumo energético (MARTINS, 2017).

A incorporação de PCMs em argamassas para revestimento interno/externo aparece como uma possível solução para minimizar o consumo energético total nas edificações (CUNHA et al., 2013). Essa incorporação permite, ainda, obter uma construção mais eficiente energeticamente e sustentável. Porém, para que essa real aplicação seja viável, é necessário que o setor da construção civil aceite essas novas soluções e aplique continuamente esses produtos.

Dessa maneira, estudos mais aprofundados sobre a real aplicação dos PCMs na construção civil devem ser realizados, de maneira que ofereça maior conforto e economia aos usuários, através do aumento da inércia térmica dos materiais, com o objetivo da redução de equipamentos de aquecimento e refrigeração. Portanto, se esses sistemas projetados e dimensionados adequadamente, em especial os revestimentos de fachada, forem aplicados de forma correta, com PCM, podem gerar economia de escala aos usuários e maior valor às edificações produzidas com esses materiais, por esses serem mais sustentáveis.

2 | REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PCMs

Os PCMs possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e passa o ponto de fusão do material, ele vai do estado sólido para o líquido, absorvendo e armazenando

a energia calorífica ambiente. Quando a temperatura ambiente diminui e passa o ponto de solidificação do PCM, então o material varia do estado líquido para o sólido (reação exotérmica), liberando a energia que foi armazenada (CUNHA et al., 2015).

Materiais de mudança de fase são aqueles com capacidade de armazenar elevada quantidade de energia calorífica devido ao seu alto calor de fusão e liberar essa energia a uma temperatura constante durante a sua mudança de fase (GRADE, 2013). Silva (2009) explica que o melhor exemplo do conceito de PCM é a água, pois ela pode se apresentar em três fases: sólida, líquida e gasosa. O processo de transição do estado sólido para o estado líquido denomina-se fusão e o inverso solidificação, ocorrendo ambos à temperatura de 0 °C. Halliday e Resnick (2012) dizem que fundir um sólido significa fazê-lo passar do estado sólido para o estado líquido, requerendo energia, porque os átomos ou as moléculas do sólido devem ser liberados de sua estrutura rígida.

A transição do estado líquido para o estado de vapor denomina-se vaporização, enquanto o processo inverso é a condensação, ocorrendo ambos à temperatura de 100 °C. A cada um desses processos de transição está associada uma quantidade de energia, geralmente denominada entalpia ou simplesmente calor latente, fusão, condensação, entre outras (SILVA, 2009).

De acordo com Brito et al. (2017), as mudanças de fase dos PCMs podem ocorrer do estado sólido para o líquido, e vice-versa, bem como do estado líquido para o gasoso, e vice-versa. Para armazenar calor, são preferidos materiais com altos valores de calor latente, uma vez que são passíveis de mudança de fase em certas temperaturas (GÜREL, 2019).

Fleischer (2015) explica que o aquecimento de um material através do processo de fusão ocorre geralmente em três degraus:

- inicialmente, o material é elevado uniformemente em temperatura, a partir de sua temperatura inicial, ao ponto de fusão através de aquecimento sensível. Uma vez atingido o ponto de fusão, e à medida que o processo de aquecimento continua, não há elevação de temperatura com a adição de calor, mas ocorre a mudança de fase através do ciclo de aquecimento latente; e
- durante esse tempo, o material transita de sólido para líquido e a frente de fusão, que marca o ponto de transição do sólido para o líquido, progride através do material; e
- à medida que a frente de fusão cruza o material, e o material se torna a fase totalmente fundida, a adição de calor aumenta a temperatura desse material líquido através de aquecimento.

Essa representação dada por Fleischer (2015) pode ser analisada na Figura 1.

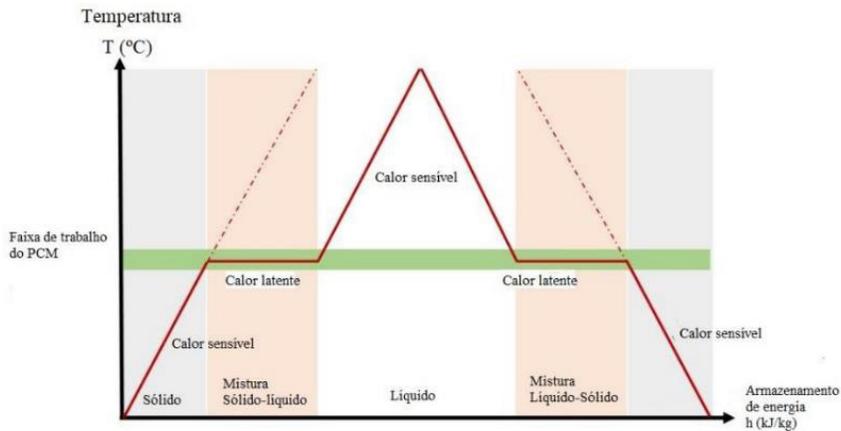


Figura 1 – Transição de mudança de fase de PCM.

Fonte: Adaptada de Faraj et al. (2020).

2.2 Estratégias de aplicação dos PCMs

Existem estratégias para a aplicação de materiais de mudança de fase no armazenamento de calor latente, conforme pode ser analisado na Figura 2.

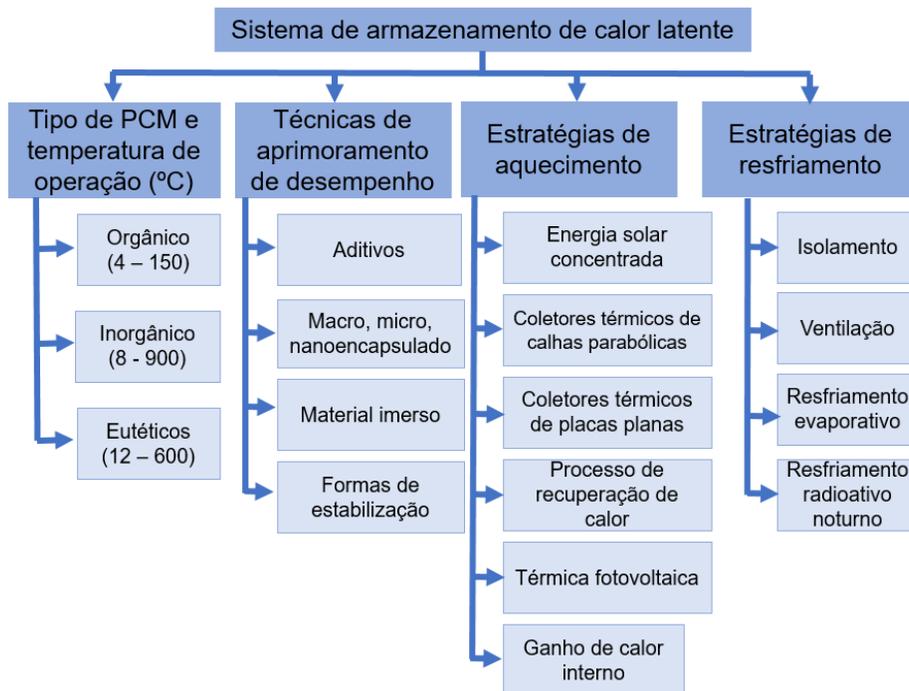


Figura 2 – Estratégias para sistemas de armazenamento de calor latente

Fonte: Adaptada de Rao, Parameshwaran e Ram (2018).

De acordo com Ge et al. (2013), o PCM ideal usado para baixo consumo de energia deve atender aos seguintes requisitos:

- O ponto de fusão dos PCMs deve corresponder à situação de aplicação, ou seja, o ponto de fusão deve estar no local de trabalho na temperatura do dispositivo;
- O material deve ter uma mudança de fase suficiente para absorver o máximo possível de calor transformado em energia térmica;
- O material deve possuir expansão relativamente pequena para garantir que o sistema funcione com segurança;
- O material deve ter reversibilidade de transição de fases;
- O material não deve ser tóxico, nem corrosivo nem produzir nenhuma reação química ao recipiente e ao dispositivo; e
- A matéria-prima deve ser barata e facilmente disponível.

2.3 Propriedades dos PCMs

Algumas propriedades são importantes para a utilização dos PCMs, conforme pode ser analisado na Tabela 1.

Propriedades térmicas e físicas	Temperatura de mudança de fase adequada para edificações
	Alto calor latente de fusão por unidade de volume
	Alta condutividade térmica
	Calor específico alto
	Pequena alteração de volume na transição de fase
	PCM deve fundir completamente durante a mudança de fase
Propriedades cinéticas	Termicamente confiável (estabilidade de ciclagem)
	Alta taxa de nucleação para evitar super-resfriamento do PCM na fase líquida
Propriedades químicas	Alta taxa de crescimento de cristais para que a recuperação do calor do sistema de armazenamento seja ideal
	Quimicamente compatível com materiais de construção/encapsulados
	Sem degradação após um grande número de ciclos térmicos, garantindo vida útil longa
Propriedades econômicas	Não tóxico, não inflamável e não explosivo, garantindo segurança
	Resistente à corrosão/materiais encapsulados
Propriedades ambientais	Custo-benefício
	Comercialmente disponível
Propriedades ambientais	Baixo impacto ambiental e não poluente durante a vida útil
	Potencial de reciclagem

Tabela 1 – Propriedades desejáveis de um PCM

Fonte: Memon (2015), Diaz (2016) e Faraj et al. (2020).

Cunha et al. (2013) afirmam que os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de alterar as suas propriedades de acordo com as características do ambiente em que são aplicados.

Existem atualmente diversos PCMs no mercado, porém não são todos que podem ser utilizados como armazenadores térmicos, pois eles devem possuir um ponto de fusão/solidificação na gama de temperatura da sua aplicação prática, assim como um elevado calor latente de fusão e uma boa condutividade térmica (CUNHA; AGUIAR; FERREIRA, 2017).

A Figura 3 apresenta o comportamento do material, ou seja, como ocorre o ciclo dos materiais de mudança de fase.

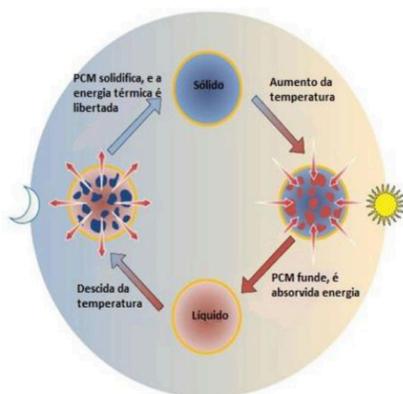


Figura 3 – Ciclo de mudança de um PCM.

Fonte: Tristão (2014).

De acordo com a Figura 3, é possível perceber a mudança do material, ou seja, enquanto o material está em seu estado sólido, ele permanece inalterado. Conforme há o aumento da temperatura, o material se funde e a energia é absorvida, mudando do seu estado sólido para o estado líquido. E, assim que o calor é retirado do material, se ele começa a perder calor e há um decréscimo da temperatura, o material se solidifica e volta ao seu estado original, o sólido.

Quando a temperatura ambiente aumenta, as ligações químicas do PCM se rompem e o material muda do estado sólido para o líquido, ocorrendo nesse caso uma reação endotérmica do material. Quando a temperatura ambiente cai novamente, o PCM líquido volta ao seu estado sólido, nesse caso a reação é exotérmica e o PCM devolve o calor para o ar interno (GE et al., 2013).

Um dos critérios mais importantes para a escolha do PCM é a faixa da temperatura da mudança de fase, mas também deve ser levado em conta que o material tem que ser simples e barato, ter boas propriedades de cristalização, ser térmica e quimicamente estável, não ser tóxico nem inflamável (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

Cunha et al. (2015) afirmam que o aumento do conforto térmico é conseguido através da capacidade de armazenamento do PCM, permitindo armazenar e liberar energia, e mantendo as temperaturas interiores sensivelmente constantes ou pelo menos com variações inferiores se comparado com as temperaturas exteriores.

Para Yeon (2020), é importante observar que, se a temperatura de transição de fase está mais próxima da temperatura ambiente, a sua eficácia se torna mais significativa. Assim, ao se determinar a temperatura de transição de fase do PCM para as condições reais, as condições climáticas regionais precisam necessariamente ser consideradas.

A Figura 4 apresenta áreas de PCMs em função da sua faixa de temperatura e a relação das faixas de entalpia de cada material.

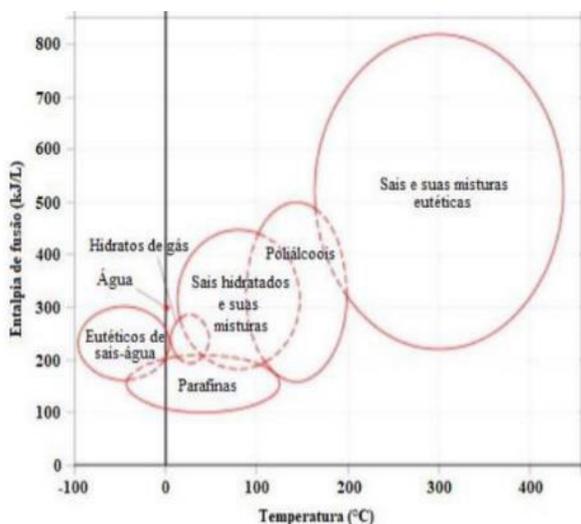


Figura 4 – Tipos de PCM baseados em suas faixas de temperatura de fusão e entalpia.

Fonte: Dieckmann (2008) apud Baetens, Jelle e Gustavsen (2010).

Para Kheradmand et al. (2018), um dos pontos negativos dos PCMs é que o material em si possui baixa condutividade térmica e alto custo de produção, isso se deve principalmente ao fato de que, se o material em sua fase líquida vazar do seu ponto de aplicação (principalmente se o produto não for encapsulado), pode sofrer modificações, o que por consequência aumentaria o seu custo.

Os sistemas de armazenamento com PCM proporcionam a possibilidade de baixar o consumo energético das edificações e ainda garantir um ambiente termicamente satisfatório (MARTINS, 2017).

2.4 Tipos dos PCMs

Os PCMs são classificados como materiais a) orgânicos, como as parafinas e os não parafínicos; b) inorgânicos, que compreendem os sais e os metais; e c) eutéticos,

que abrangem dois ou mais PCMs (RAO; PARAMESHWARAN; RAM, 2018). A Figura 5 apresenta os tipos de PCM.

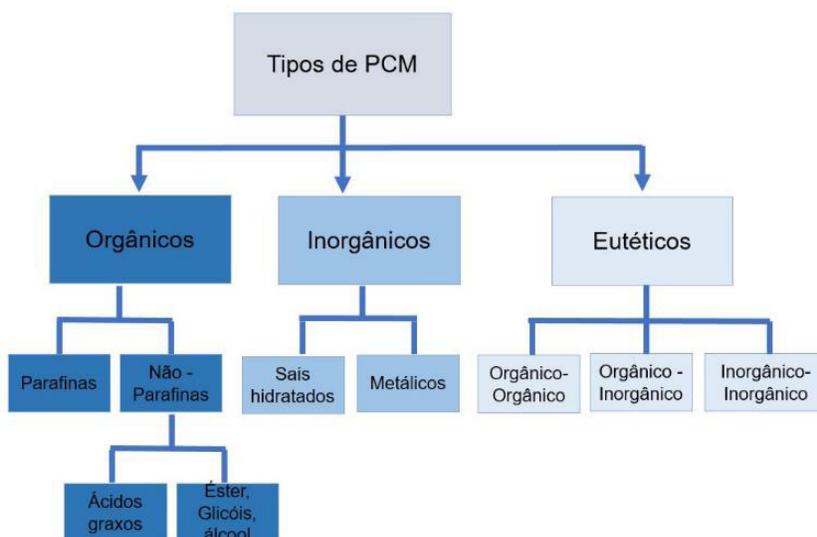


Figura 5 – Tipos de PCM.

Fonte: Kalnaes e Jelle (2015).

2.4.1 Materiais orgânicos

Os materiais orgânicos são indiscutivelmente o tipo mais popular de PCM (FLEISCHER, 2015). Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) afirmam que os materiais de mudança de fase orgânicos são, em geral, quimicamente estáveis, não sofrem super-resfriamento, não são corrosivos nem tóxicos e têm alto calor latente de fusão. Os PCMs orgânicos podem incluir os da família de parafinas (C_nH_{2n+2}) e os das famílias de ácidos graxos ($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$) (FLEISCHER, 2015).

a) Parafinas

A cera da parafina é um hidrocarboneto que possui a estrutura química (C_nH_{2n+2}), comercialmente depende do número de átomos de carbono para garantir um ponto de fusão de 20 °C a 70 °C e, como consequência, quanto maior a quantidade de átomos presentes na cadeia, maior será o ponto de fusão do material (LING; POON, 2013). De acordo com Baetens, Jelle e Gustavsen (2010), as ceras de parafina comerciais $CH_3(CH_2)_nCH_3$ são baratas e têm densidade de armazenamento térmico razoável de 120 kJ/kg até 210 kJ/kg. Já Fleischer (2015) relata que as parafinas comuns exibem calores latentes na faixa de 200-300 kJ/kg e ácidos graxos na faixa de 100-200 kJ/kg. Segundo Rao, Parameshwaran e Ram (2018), as ceras de parafinas orgânicas possuem diversas vantagens, bem como algumas limitações, como pode ser observado na Figura 6.



Figura 6 – Vantagens e limitações do material orgânico parafina.

Fonte: Adaptada de Rao, Parameshwaran e Ram (2018).

A combinação dos aspectos térmicos e físicos da parafina leva a características termofísicas que incluem, em ordem de importância, calor latente, condutividade térmica e temperatura de mudança de fase (GULFAM; ZHANG; MENG, 2019).

As parafinas são resistentes à degradação, possuem alto calor latente, estão livres de sub-resfriamento, além de serem baratas, confiáveis e quimicamente estáveis (RAO; PARAMESHWARAN; RAM, 2018).

No ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC), é possível determinar tanto o calor específico do material (rastreamento das mudanças em capacidade quando o material é puramente sólido ou puramente líquido) e também o calor do material à medida que ele transita de sólido para líquido na faixa de fusão. A Figura 7 apresenta a curva de aquecimento resultante do uso da técnica de calorimetria exploratória diferencial de um PCM orgânico tipo parafínico (FLEISCHER, 2015).

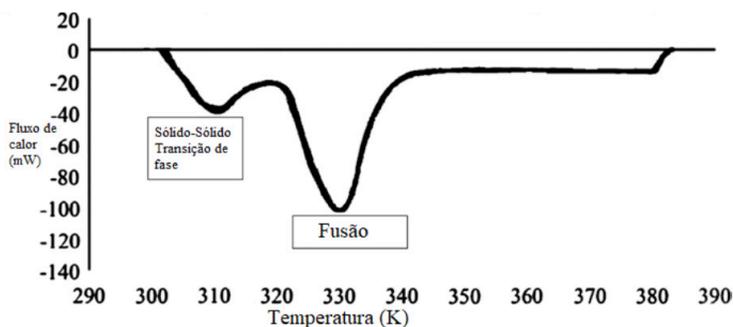


Figura 7 – Exemplo de uma curva DSC para as parafinas.

Fonte: Fleischer (2015).

Conforme apresentado na Figura 7, a faixa de fusão é conhecida como a “zona mole”, durante a qual no PCM há uma mudança de fase. A zona mole inicia quando a curva de aquecimento começa a mergulhar em torno de 319 K e atinge o pico de fusão no ponto de 331 K (FLEISCHER, 2015).

Em resumo, as ceras de parafina exclusivamente apresentam propriedades físicas, térmicas, químicas e mecânicas. E, com base nisso, elas podem ser reconhecidas como materiais orgânicos multifuncionais (GULFAM; ZHANG; MENG, 2019). A Figura 8 apresenta as funções das ceras de parafina.

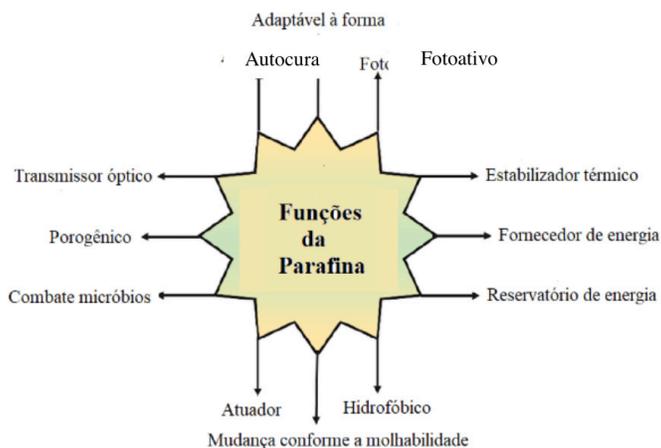


Figura 8 – Principais funções das ceras de parafina.

Fonte: Adaptada de Gulfam, Zhang e Meng (2019).

Por outro lado, Ling e Poon (2013) afirmam que as parafinas possuem algumas propriedades inadequadas, como ser inflamável e ter baixa condutividade térmica em seu estado sólido.

b) Não parafínico

No que se refere aos materiais orgânicos não parafínicos, listam-se os ésteres, os glicóis e os ácidos graxos (RAO; PARAMESHWARAN; RAM, 2018). A Figura 9 apresenta algumas vantagens e limitações do material não parafínico.

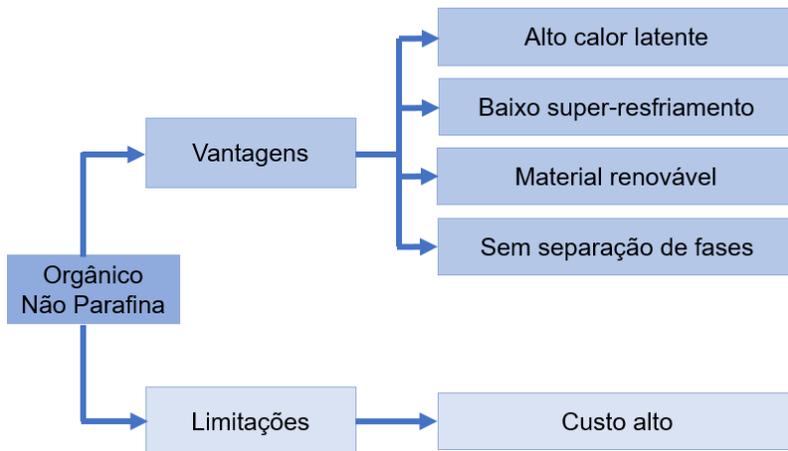


Figura 9 – Vantagens e limitações do material orgânico tipo não parafina.

Fonte: Adaptada de Rao, Parameshwaran e Ram (2018).

Para Ling e Poon (2013), a maioria desses PCMs é classificada como ácido e possui ponto de fusão semelhante ao da parafina. No entanto, esses produtos são muito mais caros (cerca de três vezes) do que a parafina. Diaz (2016) indica que os materiais não parafínicos possuem características importantes, como alto calor de fusão, baixa condutividade e toxicidade e instabilidades em suas temperaturas. Porém, Rao, Parameshwaran e Ram (2018) apresentam como desvantagem desse material a limitação de inflamabilidade e a aplicação em faixas de temperaturas mais baixas.

2.4.2 Materiais inorgânicos

Os PCMs inorgânicos, em geral, têm um calor de fusão alto, possuem boa condutividade térmica, são baratos e não são inflamáveis (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Enquadram-se como materiais inorgânicos os sais hidratados e os metálicos.

a) Sais hidratados

Para Diaz (2016), a fórmula geral dos sais hidratados é $M_x \cdot nH_2O$. Suas propriedades mais atraentes incluem alto calor latente de fusão, alta condutividade térmica e pequena mudança de volume. A Figura 10 apresenta vantagens e desvantagens dos sais hidratados.

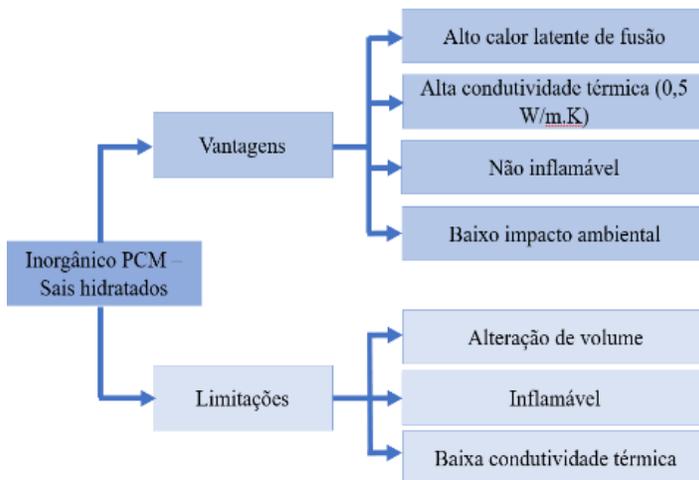


Figura 10 – Vantagens e limitações do material inorgânico sais hidratados.

Fonte: Adaptada de Memon (2014).

Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) indicam que os sais hidratados são materiais atraentes para o armazenamento de energia térmica devido a sua alta densidade de armazenamento, cerca de 240 kJ/kg, alta condutividade térmica, cerca de 0,5 W/(m.K), e custo razoável em comparação com as ceras de parafina. Todos os sais hidratados apresentam uma estrutura cristalina bem definida. A Figura 11 apresenta a estrutura de dois materiais, o cloreto de cálcio (a) e o cloreto de sódio (b).

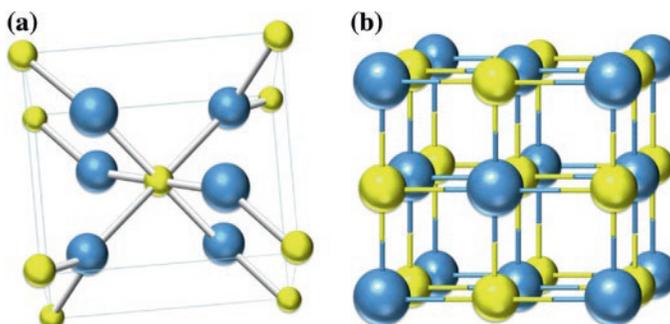


Figura 11 – Estrutura do material inorgânico sal hidratado.

Fonte: Fleischer (2015).

A Figura 11(a) apresenta a estrutura cristalina do cloreto de cálcio, que absorve facilmente a água para se tornar o cálcio hexa-hidratado. A estrutura cristalina parece ser bastante aberta em comparação com a estrutura cristalina do cloreto de sódio, fortemente compactada, conforme mostra a Figura 11(b), que no caso não é facilmente hidratada (FLEISCHER, 2015).

De acordo com Ling e Poon (2013), a alta mudança de volume e o seu super-resfriamento durante a mudança de fase entre o estado sólido-líquido fizeram com que os sais hidratados não fossem considerados adequados para ser incorporados ao concreto. Ainda de acordo com os autores, esse super-resfriamento é um problema dos PCMs inorgânicos, porque o estado líquido pode ser resfriado abaixo de seu ponto de congelamento, enquanto permanece líquido, o que torna a mudança de fase ineficiente.

Para Diaz (2016), o principal problema no uso dos sais hidratados é a sua fusão congruente, mas isso pode ser superado por agitação mecânica, encapsulamento, adição de água e espessantes, bem como modificação da composição química do sistema.

b) Metais

A família de metais e ligas metálicas é a mais subutilizada de todas as famílias comuns de PCM, isso se deve talvez pelo baixo calor latente que a maioria desses materiais possui (FLEISCHER, 2015).

Para Sharma et al. (2009), os materiais inorgânicos metálicos apresentam algumas características, como (i) baixo calor de fusão por unidade de peso; (ii) alto calor de fusão por unidade de volume; (iii) alta condutividade térmica; (iv) baixo calor específico; e (v) pressão de vapor relativamente baixa.

Para Fleischer (2015), os PCMs de metais e ligas metálicas incluem uma série de materiais com ponto de fusão na faixa de aplicações desejadas. Os metais mais promissores em aplicações de baixa temperatura são cério, gálio, índio, estanho e bismuto, enquanto nos metais para aplicações de alta temperatura incluem-se zinco, magnésio, alumínio e as suas ligas.

Ge et al. (2013) relatam que metais de baixo ponto de fusão também podem ser candidatos com elevado potencial por causa de suas propriedades, como alta condutividade térmica, baixa pressão de vapor e pequena expansão de volume durante a sua transição de fase.

2.4.3 Materiais eutéticos

Baetens, Jelle e Gustavsen (2010) afirmam que os materiais eutéticos são divididos em três grupos de acordo com os materiais que os constituem, sendo orgânicos-orgânicos, inorgânicos-inorgânicos e orgânicos-inorgânicos.

Segundo Zhou, Zhao e Tian (2012), os materiais eutéticos apresentam vantagens por possuir fusão aguda de acordo com a sua temperatura e alta volumetria para o armazenamento térmico.

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os PCMs seja um material muito estudado no mundo afora, fica evidente a falta de publicação de trabalhos sobre PCM no Brasil. Uma das barreiras da não utilização desse produto no território brasileiro se dá devido ao seu custo em aplicações reais, bem como a sua falta de incentivo de estudos desses materiais que visam aumentar a eficiência energética aplicados na construção civil.

Diante do exposto, o trabalho se deu como explicativo por apresenta o conceito de PCM, bem como as estratégias e os tipos de PCM para a sua utilização em função do seu ponto de fusão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. da S.; BRANDALISE, M. P.; MIZGIER, M. O. Materiais de mudança de fase como sistema de resfriamento passivo em habitações de interesse social pré-fabricadas leves. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, São Paulo, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8666777>.

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, 1361-1368, 2010. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.03.026

BRITO, A. C. de *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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>.

CUNHA, S.; AGUIAR, J. B.; FERREIRA, V. Eco-efficient mortars with incorporation of phase change materials. **Journal of Building Physics**, p. 1-24, 2017.

CUNHA, S. *et al.* Influence of adding encapsulated phase change materials in aerial lime based mortars. **Advanced Materials Research**, v. 687, p. 255-261, 2013. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.687.255.

CUNHA, S. *et al.* Argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM): caracterização física, mecânica e durabilidade. **Revista Matéria**, v. 20, n. 1, p. 245-261, 2015.

DIAZ, P. M. Analysis and comparison of different types of thermal energy storage systems: a review. **Journal of Advances in Mechanical Engineering and Science**, v. 2, n. 1, p. 33-46, 2016.

FARAJ, K. *et al.* A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: heating and hybrid applications. **Journal of Energy Storage**, Hal open science, Nov. 2020.

FLEISCHER, A. S. **Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications**. Villanova, PA, USA: Springer, 2015.

GE, H. *et al.* Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: an emerging frontier in energy area. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 331-346, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.008>.

GRADE, P. de J. S. P. da S. **Materiais de mudança de fase em revestimentos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

GULFAM, R.; ZHANG, P.; MENG, Z. Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials: a review. **Applied Energy**, n. 238, p. 582-611, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.114>.

GÜREL, B. A numerical investigation of the melting heat transfer characteristics of phase change materials in different plate heat exchanger (latent heat thermal energy storage) systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2019. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119117.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 2.

KALNAES, 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**, n. 94, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>.

KHERADMAND, M. *et al.* Energy benefits of cement-based plaster containing hybrid phase-change material. **Construction Materials**, v. 171, n. 3, p. 117-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00027>.

LING, T. C.; POON, C. S. Use of phase materials for thermal energy storage in concrete: an overview. **Construction and Building Materials**, n. 46, p. 55-62, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>.

MARTINS, B. F. M. **Materiais de mudança de fase (PCM) para melhoria do desempenho térmico de edifícios**. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/b490/6576f8de8643cad74c4c920f37491c2a1558.pdf?_ga=2.261399501.156006525.1595209132-1471779208.1579830961.

MEMON, S. A. *et al.* Development of structural-functional integrated concrete with macro-encapsulated PCM for thermal energy storage. **Applied Energy**, n. 150, p. 245-257, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.137>

RAO, V. V.; PARAMESHWARAN, R.; RAM, V. V. PCM – mortar based construction materials for energy efficient buildings: a review on research trends. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 95-122, 2018.

SHARMA, A. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, n. 13, p. 318-345, 2009. DOI 10.1016/j.rser.2007.10.005.

SILVA, N. T. D. F. **Incorporação de materiais de mudança de fase em materiais de construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2009.

TRISTÃO, P. J. S. **Encapsulação de materiais de mudança de fase (PCM) para aplicações no armazenamento de energia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética) – Instituto Politécnico de Bragança, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/153412753.pdf>.

YEON, J. H. Thermal behaviour of cement mortar embedded with low-phase transition temperature PCM. **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119168>.

ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, v. 92, p. 593-605, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>.