



MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMs) PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA METÁLICA LEVE (LSF)

Ana M. G. Gonçalves^{a,*}, Paulo Santos^a, Nelson Soares^{a,b} e José J. Costa^b

^a ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra

^b ADAI, LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra

Resumo. A eficiência energética dos edifícios é atualmente um objetivo fundamental da política energética a nível nacional e internacional, uma vez que os edifícios são um dos principais consumidores de energia nos países desenvolvidos. Atualmente, os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES – *Thermal Energy Storage*) podem ser utilizados para reduzir a dependência dos edifícios em relação aos combustíveis fósseis, contribuir para um uso mais eficiente de energia e fornecer calor de forma fiável. Os materiais de mudança de fase (PCMs – *Phase Change Materials*) são agentes que intervêm como meios de armazenamento de calor latente. Estes materiais absorvem calor, quando fundem, e libertam calor, quando solidificam, sendo estas mudanças de fase realizadas a uma temperatura quase constante. Assim, uma forma eficaz de evitar o sobreaquecimento em edifícios com estrutura metálica leve (LSF – *Light Steel Framing*) consiste na utilização de PCMs em sistemas passivos de armazenamento de calor latente (LHTES – *Latent Heat Thermal Energy Storage*), que podem ser incorporados em paredes, janelas, tetos ou pavimentos. Neste trabalho, apresenta-se uma revisão dos diferentes tipos de PCMs e dos principais critérios que regem a sua seleção, com referência aos principais métodos para medir as suas propriedades térmicas e às técnicas para incorporar PCMs em elementos de construção com estrutura LSF.

1. Introdução

A energia é fundamental para todas as atividades humanas e, conseqüentemente, a sua procura e consumo aumentam progressivamente com o decorrer do tempo. Os combustíveis fósseis têm vindo a desempenhar o seu papel, mas o seu uso intensivo conduziu a danos no meio ambiente: o aquecimento global e progressivo desaparecimento dos polos, por derretimento do gelo [1].

A eficiência energética dos edifícios é hoje foco de atenção na política energética a nível regional, nacional e internacional, uma vez que os edifícios são um dos principais setores responsáveis pelo consumo de energia nos países desenvolvidos.

Atualmente, os sistemas TES podem ser usados para reduzir a dependência dos edifícios relativamente aos combustíveis fósseis. Um dos métodos com potencial para armazenamento de calor é a aplicação de PCMs em sistemas passivos de edifícios (*e.g.*, em paredes, janelas, tetos ou pisos).

O principal objetivo deste artigo é fornecer uma breve revisão dos diferentes tipos de PCMs para aplicação em sistemas passivos de edifícios, e dos principais critérios que regem a sua seleção, com referência às técnicas para incorporar PCMs em elementos de construção com estrutura LSF.

2. Edifícios com estrutura metálica leve

A construção de edifícios em LSF disseminou-se nos últimos anos para fazer face aos sistemas estruturais tradicionais (construção pesada, como a alvenaria de tijolo e o betão). Este sistema construtivo é estruturado em perfis de aço galvanizado enformado a frio, obtidos pela moldagem de chapa de aço de pequena espessura, e revestido externa e internamente com elementos industrializados de alta qualidade (Fig. 1).



Fig. 1: Estrutura em LSF

Este tipo de construção permite uma grande redução no peso da estrutura e oferece uma boa resistência, salvaguardando o conforto térmico e acústico, e a eficiência energética. Permite a utilização de diversos materiais, que apresentam um grande potencial para reciclagem e reutilização. A sua flexibilidade faz com que não existam grandes restrições ao nível do projeto, racionalizando e otimizando a utilização dos recursos e gerando menores quantidades de desperdícios. Apresenta também facilidade de pré-fabricação e posterior transporte, com a possibilidade de criação de elementos modulares, melhorando o controlo de qualidade e diminuindo os prazos de entrega e montagem [2].

Uma eventual desvantagem da construção LSF é a reduzida inércia térmica. Este sistema construtivo é composto por elementos de pouca massa (OSB – *Oriented Strand Board*, lâ mineral, gesso cartonado, perfis metálicos de reduzida espessura e ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*), o que conduz a uma inércia térmica naturalmente fraca, ou seja, com uma reduzida capacidade para reter calor. Este fator pode levar a problemas de conforto térmico (como, por exemplo, o sobreaquecimento), uma vez que o edifício é mais vulnerável a grandes flutuações de temperatura. A significativa condutibilidade térmica do aço pode dar origem a pontes térmicas, penalizando o desempenho térmico e a eficiência energética do edifício e causando patologias construtivas. Por último, deve-se ter em conta que o sistema construtivo em LSF necessita de mão-de-obra especializada e é normalmente utilizado em edifícios de baixa altura (até três andares) [3].

3. Sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios

Um dos principais objetivos na fase de projeto de um edifício é garantir o conforto térmico dos ocupantes durante todo o ano, com um auxílio mínimo de sistemas mecânicos de climatização. Se a capacidade de armazenamento de calor e o nível de isolamento térmico da envolvente do edifício forem suficientes, será possível diminuir a flutuação da temperatura no interior do edifício e aumentar o conforto térmico dos ocupantes, com menor consumo de energia. No entanto, um edifício é um sistema termodinâmico bastante complexo, submetido a várias solicitações que podem influenciar a flutuação da temperatura ambiente interior, internas e externas, como a temperatura do ar exterior, a velocidade do vento, a radiação solar e os ganhos internos inerentes à utilização do edifício (iluminação, ocupação, equipamentos, etc.). O desempenho térmico da envolvente dos edifícios pode ser melhorado através da utilização de sistemas TES de forma a alcançar edifícios energeticamente mais eficientes [4].

O armazenamento de energia térmica é um método de conservação temporária de energia para utilização futura. Alguns exemplos de sistemas de armazenamento de energia térmica são: acumulação de energia solar para utilização noturna; armazenamento de calor nas horas de baixa tarifa da eletricidade; armazenamento de calor no verão para aquecimento de espaços no inverno; armazenamento de frio no inverno para arrefecimento de espaços no verão, etc. Uma vez que a energia solar não está disponível a todas as horas, os sistemas TES apresentam o papel fundamental de compensar esta incompatibilidade temporal.

O processo de armazenamento/restituição de energia térmica pode ocorrer por aquecimento ou por arrefecimento de uma substância (calor sensível), ou por mudança de fase (calor latente) (Fig. 2). Assim, os sistemas TES com PCMs permitem que uma maior quantidade de energia possa ser armazenada numa menor quantidade de material.

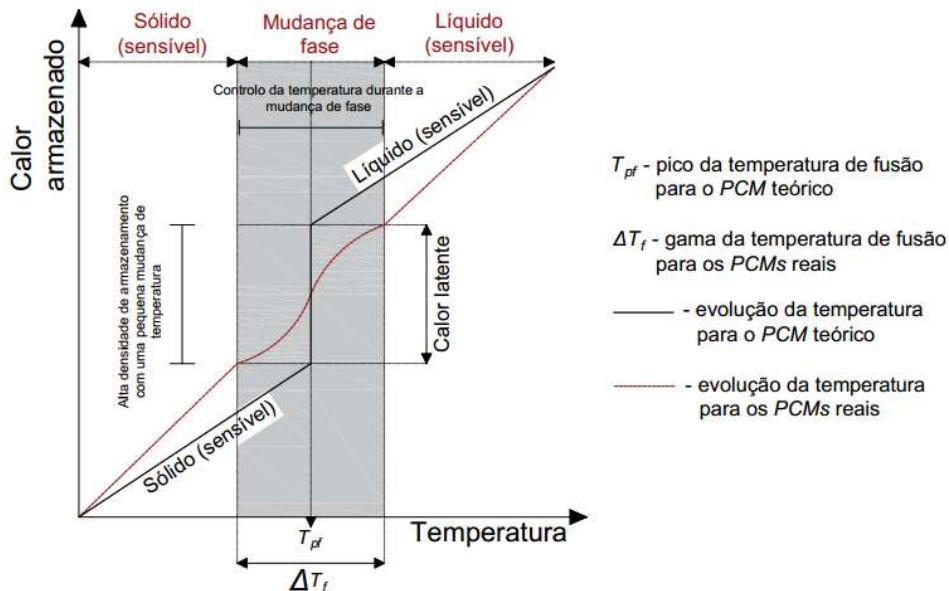


Fig. 2: Representação esquemática do processo de armazenamento de calor nos PCMs

4. Materiais de mudança de fase (PCMs)

Os PCMs são materiais que mudam de fase a uma temperatura conhecida e adequada para o campo de aplicação, permitindo armazenar/libertar grandes quantidades de calor. De acordo com Cabeza *et al.* [5] existem três tipos diferentes de PCMs: orgânicos, inorgânicos e eutécti-

cos. Os PCMs orgânicos subdividem-se em parafinas e não-parafinas, e os inorgânicos podem ser descritos como sais hidratados e sais metálicos. Os PCMs eutéticos apresentam uma combinação de pelo menos dois ou mais componentes. Desta forma, os PCMs eutéticos subdividem-se em orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico e orgânico-inorgânico, consoante a composição dos seus componentes. A Tabela 1 apresenta resumidamente as várias vantagens e desvantagens da utilização dos diferentes tipos de PCMs.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos diferentes PCMs [5–12]

PCMs	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	<ul style="list-style-type: none"> - Não corrosivo [5] - Sobrearrefecimento reduzido [7] - Estabilidade termoquímica [7] - Reciclável [9] - Elevada taxa de cristalização [10] - Ampla gama de temperaturas disponível [9] 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzida condutividade térmica [7] - Inflamável [7] - Reduzida entalpia de mudança de fase [7] - Elevada variação de volume durante a mudança de fase [9] - Material mais caro [8] - Não compatível com recipiente plástico [6]
Inorgânicos	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada entalpia de mudança de fase [7] - Não inflamável [11] - Menor variação de volume durante a mudança de fase [9] - Elevada condutividade térmica [9] - Custo moderado [9] - Elevada disponibilidade [12] - Reciclável [6] - Compatível com recipiente plástico [6] 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrearrefecimento [5] - Corrosão [7] - Falta de estabilidade térmica [7] - Decomposição e separação de fases [7] - Não compatível com alguns materiais de construção [12]
Eutéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada densidade de armazenamento [9] - Estreita gama de pontos de fusão [9] - Sem segregação e com mudança de fase semelhante [10] 	<ul style="list-style-type: none"> - Dados de propriedades termofísicas com disponibilidade limitada [9]

Apesar da grande variedade de PCMs propostos na literatura, para que estes possam ser utilizados para armazenamento de calor latente, é necessário ter em conta os seguintes aspetos [11,13,14]:

- Propriedades térmicas – elevada condutibilidade térmica e temperatura de mudança de fase adequada à gama de temperaturas desejada; elevado calor latente, elevado calor específico, e estabilidade térmica;
- Propriedades físicas – elevada densidade, equilíbrio de fase, reduzida variação de volume na mudança de fase, reduzida pressão de vapor;
- Propriedades químicas – não corrosivo, compatibilidade com materiais de construção, não tóxico, não inflamável, não explosivo, estabilidade química, sem degradação, capacidade para ciclos completos de fusão/solidificação;
- Aspetos económicos – abundância, disponibilidade, custo reduzido;

- Aspectos ambientais – reduzida energia incorporada, não poluente, reduzido impacto ambiental, reciclável, facilidade de separação de outros materiais.

5. Sistemas passivos de armazenamento de calor latente em edifícios

O armazenamento de energia térmica desempenha um papel importante na conservação de energia nos edifícios. O armazenamento de calor em paredes, tetos e pisos de edifícios pode ser aprimorado incorporando PCMs dentro de sistemas passivos LHTES. Aumentar a capacidade de armazenamento térmico de um edifício pode diminuir as oscilações da temperatura interior e evitar o sobreaquecimento de edifícios em LSF. O uso de PCMs potencia também um melhor conforto térmico e um menor consumo de energia associado à climatização.

5.1 Técnicas para incorporar PCMs em elementos de construção

Para que os PCMs possam ser utilizados em sistemas passivos de armazenamento de calor latente (materiais de construção ou elementos construtivos) é necessário confinar os PCMs, de forma a evitar possíveis vazamentos de material na fase líquida. Na literatura, podem identificar-se diferentes métodos: a incorporação direta, a imersão, o encapsulamento (que pode ser macro ou micro) e por último, os PCMs com a forma estabilizada.

Incorporação direta - método simples e económico, no qual o PCM é adicionado diretamente aos materiais durante a sua produção. Não é necessário equipamento especializado para esta técnica. No entanto, vazamentos e incompatibilidade com os materiais são os maiores problemas [9].

Imersão - o processo de incorporação é feito mergulhando o material (poroso) num banho de PCM fundido. Poderão ocorrer alguns vazamentos, pelo que não são aconselhadas utilizações de longa duração [9].

Macro-encapsulamento - técnica em que os PCMs são embalados num recipiente, como tubos, esferas, painéis, bolsas ou outros (Fig. 3), e depois incorporados em elementos de construção. Esse tipo de recipientes deve ser otimizado para aumentar a taxa de transferência de calor durante os processos de mudança de fase. O material dos contentores deve também prevenir as alterações de volume do PCM durante a mudança de fase, assim como alterações de pressão, de forma a evitar vazamentos do material líquido. Este método poderá acrescentar estabilidade mecânica à estrutura, podendo também ajudar a superar alguns problemas de inflamabilidade do PCM. Apesar disso, o método poderá estar associado a alguns problemas na transferência de calor para o PCM e a uma forte tendência para a solidificação do material nos cantos do recipiente [15].



Fig. 3: Exemplos de macro cápsulas com PCM no seu interior [16,17]

Micro-encapsulamento - introdução de PCMs em microcápsulas poliméricas de diâmetro $\approx 1-1000 \mu\text{m}$. Este método aumenta a razão superfície-volume, crucial para potenciar o mecanismo de transferência de calor, e possibilita o controlo da variação do volume do PCM enquanto se dá a mudança de fase. Como grande desvantagem, esta técnica apresenta um aumento da possibilidade de ocorrência do fenómeno de sobrearrefecimento [18].

PCMs com forma estabilizada - a sua principal característica é oferecer resistência estrutural ao PCM, evitando simultaneamente o derrame de material líquido. Nesta técnica, o PCM (e.g., a parafina) é disperso em outra fase do material de suporte (como o polietileno de alta densidade) para formar um material composto estável. Como vantagens, apresenta um grande calor latente de fusão, uma condutibilidade térmica adequada, uma boa capacidade para manter a forma do PCM estabilizado no processo de mudança de fase e um bom desempenho térmico ao longo de múltiplos ciclos e a longo prazo [19].

5.2 PCM Wallboards

Os *wallboards* (painéis de parede, normalmente constituídos por gesso cartonado) são ideais para a incorporação de PCMs, pois representam uma solução barata e muito utilizada na construção, especialmente na construção em LSF. A eficiência desses elementos depende de vários fatores, tais como: a forma como o PCM é incorporado no *wallboard*; a orientação da parede; as condições climáticas; os ganhos solares diretos; os ganhos internos; a cor da superfície do *wallboard*; o PCM escolhido e sua temperatura de mudança de fase.

De forma a melhorar o comportamento térmico de uma parede divisória interna leve, Virgone e Noel [20] realizaram um processo de otimização usando evoluções de temperatura interior/exterior durante um período de 24 h, para otimizar a espessura de um *wallboard* com PCM. O *wallboard* foi composto por 60% em peso de parafina micro-encapsulada, com uma temperatura de fusão de cerca de 22°C . A melhor espessura encontrada foi de 1 cm e permite uma duplicação da inércia térmica do edifício.

Virgone e Roux [21] realizaram uma metodologia experimental numa célula de teste em grande escala, controlando os efeitos térmicos e radiativos, para avaliar o desempenho de paredes com e sem PCMs, durante um dia de verão. Os autores usaram o mesmo PCM indicado no estudo anterior para mostrar que um *wallboard* com PCMs reduz as flutuações da temperatura do ar e o efeito do sobreaquecimento.

Uma das soluções de *wallboards* mais conhecidas do mercado é apresentada pela Knauf[®]. Trata-se de uma placa de gesso com microcápsulas de PCM (Fig. 4-a). A sua aplicação é bastante variada, apresenta uma espessura de 12.5 mm e uma temperatura de mudança de fase de 23°C . Já o painel da DuPont[®] é um painel laminado e revestido a folha de alumínio, contendo um composto de parafina e polímeros, com características refletoras e de armazenamento de energia (Fig. 4-b). Este painel serve essencialmente para ser colocado em zonas de grande exposição solar. O modo de aplicação é no interior do edifício e tem uma espessura de 5 mm.



a) *Comfortboard* – Knauf[®]



b) *Energain* – DuPont[®]

Fig. 4: Exemplo de *wallboards* da Knauf e da DuPont [22,23]

5.3 Tijolos com PCMs

Alawadhi [24] apresentou um modelo bidimensional para avaliar o desempenho de um tijolo comum com orifícios cilíndricos preenchidos com PCMs, para climas quentes. O objetivo deste sistema é reduzir o fluxo de calor para o interior do edifício, absorvendo o calor no tijolo antes que este atinja o ambiente interior durante o dia. Durante a noite, o calor armazenado é libertado. Zhang *et al.* [25] avaliaram numericamente a resposta térmica de uma parede de tijolos com PCMs. Os resultados mostraram que, em comparação com uma parede de tijolos comuns, a capacidade de armazenamento de energia térmica da parede de tijolos com PCMs é maior e que a incorporação de PCMs nos tijolos é benéfica para o isolamento térmico, potencia o efeito termorregulador e aumenta o conforto térmico.

5.4 Betões e argamassas com PCMs

Medrano *et al.* [26] estudaram um betão inovador com PCM, de forma a desenvolver um novo produto sem afetar a sua resistência mecânica. Foram criados dois cubículos de betão de tamanho real, para demonstrar a possibilidade de usar PCM micro-encapsulado em betão para melhorar o seu desempenho térmico (Fig. 5). Os autores concluíram que o betão atingiu uma resistência à compressão superior a 25 MPa e uma resistência à tração acima de 6 MPa, o que demonstra uma oportunidade para fins estruturais. Notou-se também que o armazenamento de energia nas paredes de betão com PCM conduz a uma inércia térmica melhorada, bem como a temperaturas interiores mais baixas, em comparação com o betão convencional.



Fig. 5: Cubículos em estudo [26]

Vaz *et al.* [27] analisaram uma nova solução para argamassas reforçadas termicamente com 25% de PCM micro-encapsulado. Os autores concluíram que a incorporação de PCMs na argamassa não comprometeu as propriedades desejáveis para a sua aplicação como material de reboco.

5.5 Persianas e estores com PCMs

As persianas e portadas exteriores integrando PCMs são elementos de sombreamento móveis associados aos vãos envidraçados. Estes sistemas devem operar ciclicamente, permitindo a fusão do PCM durante o dia e a sua solidificação durante a noite, e o respetivo armazenamento/libertação de calor. Soares *et al.* [28] propuseram um sistema de portadas exteriores com PCMs para aproveitamento da energia solar térmica para aquecimento durante o inverno. Para o correto funcionamento deste sistema, as portadas devem ser abertas durante o dia para maximizar os ganhos solares pelos vãos envidraçados e, simultaneamente, permitir a sua carga (fusão do PCM). Durante a noite, o sistema deve ser fechado para minimizar as perdas de calor através dos vãos envidraçados e permitir a sua descarga e a libertação de

calor para o interior do edifício (solidificação do PCM). Os sistemas de sombreamento com PCMs poderão também ser utilizados para evitar o sobreaquecimento de edifícios, nomeadamente durante o verão.

Um sistema interior de estores para proteção solar constituído por lâminas verticais preenchidas com PCM, e seguindo uma lógica de funcionamento semelhante à descrita anteriormente, foi proposto por Weinlaeder *et al.* [29]. Durante o verão, enquanto os sistemas convencionais aquecem até 40 °C, os resultados da monitoração mostraram que a temperatura da superfície do lado interior das lâminas com PCM nunca ultrapassava a temperatura de fusão do PCM de 28 °C, revelando um elevado potencial de termorregulação.

6. Conclusões

Este artigo fornece uma revisão sobre o princípio de funcionamento dos PCMs e o modo como eles podem ser usados em sistemas LHTES passivos. Refletiu-se também sobre como estas soluções construtivas com PCMs poderão estar relacionadas com o aumento de eficiência energética dos edifícios, nomeadamente em construção LSF.

Ainda há um longo caminho para o uso generalizado de soluções construtivas incorporando PCMs para aumentar a eficiência energética dos edifícios de forma mais sustentável. Apesar disso, os edifícios com capacidade de produzir a sua própria energia poderão ser o futuro, e a integração de mecanismos passivos como PCMs poderá contribuir para que os edifícios venham a ser cada vez mais eficientes e amigos do ambiente.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-016750 | PTDC/EMS-ENE/6079/2014.

Referências

- [1] S. Pereira, L. Costa, Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase, Tese MIEM - Univ. Do Porto. (2014).
- [2] E. LSK, European Lightweight Steel-framed Construction, in: Arcelor, 2005: p. 92.
- [3] P. Santos, Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings Buildings, InTech. (2017).
- [4] W. Xin, Z. Yinping, X. Wei, Z. Ruolang, Z. Qunli, D.I. Hongfa, Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope, Chinese Sci. Bull. 54 (2009).
- [5] L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change : materials , heat transfer analysis and applications, Appl. Therm. Eng. 23 (2003) 251–283.
- [6] S. Ali, Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review, Renew. Sustain. Energy Rev. 31 (2014) 870–906.
- [7] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings : A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 1675–1695.
- [8] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S. Ali, K. Razack, A review on phase change energy storage : materials and applications, Energy Convers. Manag. 45 (2004) 1597–1615.

- [9] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Appl. Energy*. 92 (2012) 593–605.
- [10] A. Sharma, V. V Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 318–345.
- [11] V.V. Tyagi, D.Á. Buddhi, PCM thermal storage in buildings : A state of art, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2007) 1146–1166.
- [12] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings ' energy efficiency, *Energy Build.* 59 (2013) 82–103.
- [13] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials , heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 615–628.
- [14] E. Osterman, V. V Tyagi, V. Butala, N.A. Rahim, U. Stritih, Review of PCM based cooling technologies for buildings, *Energy Build.* 49 (2012) 37–49.
- [15] S. Pendyala, Macroencapsulation of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, Tese MIEM - Univ. Do Sul Da Flórida. (2012).
- [16] Rubitherm, Rubitherm - CSM, (2017).
(www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/makroverkaspelung-csm).
- [17] BINE, Storing heat using phase changes II, (2017).
(www.bine.info/en/publications/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme-forts/).
- [18] R. Al Shannaq, M.M. Farid, Microencapsulation of phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems, Woodhead Publishing Limited, 2015.
- [19] António Castilho, Simulação numérica do efeito de PCM no conforto térmico de edifícios, Tese MIEC - Univ. Do Porto. (2014).
- [20] J. Virgone, J. Noel, Optimization of a phase change material wallboard for building use, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 1291–1298.
- [21] J. Virgone, J. Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard : A full-scale experimental investigation, *Energy Build.* 40 (2008) 148–156.
- [22] P.C.M. Plasterboard, Knauf Comfortboard, Knauf Comf. - Phase Chang. Plaster. – Therm. Mass without Weight PCM. (2014).
- [23] E.T.M. Systems, DuPont Energain, DuPont Energain®. (2007).
- [24] E.M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy Build.* 40 (2008) 351–357.
- [25] C. Zhang, Y. Chen, L. Wu, M. Shi, Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures, *Energy Build.* 43 (2011) 3514–3520.
- [26] M. Medrano, L.F. Cabeza, C. Castello, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy Build.* 39 (2007) 113–119.
- [27] A. Vaz, M. Azenha, H. De Sousa, A. Samagaio, Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials : Experimental and numerical approach, *Energy Build.* 49 (2012) 16–27.
- [28] N. Soares, A.R. Gaspar, P. Santos, J.J. Costa, Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications, *Energy Build.* 116 (2016) 18–34.
- [29] H. Weinlaeder, W. Koerner, M. Heidenfelder, Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage, *Energy Build.* 43 (2011) 2468–2475.

