

SANDRA CUNHA, ALUNA DE DOUTORAMENTO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE DO MINHO
JOSÉ AGUIAR, PROFESSOR ASSOCIADO COM AGREGAÇÃO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE DO MINHO
VÍCTOR FERREIRA, PROFESSOR ASSOCIADO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE DE AVEIRO
ANTÓNIO TADEU, PROFESSOR CATEDRÁTICO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Atualmente, a procura de uma construção com maior valor de sustentabilidade tem sido uma das premissas da comunidade científica e da indústria da construção. Esta procura passa por fazer uma gestão cuidada dos recursos naturais a utilizar e também pelo desenvolvimento de novos materiais de construção e tecnologias que permitam suprimir alguns dos problemas do património edificado.

Todos os anos, uma energia de cerca de 5×10^{24} J é fornecida pelo sol e atinge toda a superfície terrestre. Esta quantidade é cerca de 10.000 vezes superior ao consumo real de energia por ano em todo o mundo. Assim, a necessidade de encontrar uma forma de tirar proveito deste recurso, juntamente com a procura de uma melhoria na qualidade do meio ambiente, é enorme. Isto tem conduzido os esforços da comunidade científica em combinar o uso de energia solar e novos materiais de construção funcionais, que permitam limitar o consumo de energia (Diamanti et al., 2008).

O elevado ritmo de crescimento das áreas urbanas e o aumento dos parâmetros de conforto, têm vindo a provocar um acréscimo nos consumos energéticos, tornando-se numa das maiores preocupações da sociedade atual. Este problema deve-se ao uso excessivo de energia proveniente de fontes não renováveis, que provocam graves impactos no meio ambiente. Sabendo-se que grande parte do consumo de energia elétrica no sector residencial está associado ao aquecimento e arrefecimento, torna-se urgente a implementação de novas soluções construtivas que visem aumentar a eficiência energética dos edifícios.

Uma grande vantagem da incorporação de Materiais de Mudança de Fase, denominados na língua inglesa de "Phase Change Materials" (PCM) nos edifícios, é que estes oferecem grandes áreas para armazenamento e transferência de calor, que associada à problemática dos enormes consumos energéticos torna a utilização de PCM em edifícios, uma solução interessante na resolução deste problema. Portanto, é necessário que a construção deixe de ser tradicionalmente conservadora e comece a apostar mais em soluções inovadoras que proporcionem a resolução de problemas com vários anos. Assim, a enorme superfície coberta por materiais de construção representa atualmente uma solução promissora na exploração da energia solar, graças às melhorias tecnológicas nos campos energéticos e do meio ambiente.

Em Portugal existem grandes áreas urbanas construídas na década de 90, com graves deficiências, apresentando simultaneamente um desafio e uma oportunidade para o sector da construção e reabilitação. Qualquer solução, tanto para edifícios novos como para operações de reabilitação, deve possuir um contributo para a diminuição dos consumos energéticos e para uma melhoria das condições de habitabilidade dos edifícios.

A eficiência energética dos edifícios é hoje um dos principais objetivos da política energética a nível internacional (Soares et al., 2013). Os edifícios são um dos sectores líderes no consumo de energia nos países desenvolvidos, sendo que na União Europeia são responsáveis por cerca de 40% do consumo de energia e pela produção de cerca de 40% das emissões de CO₂ para a atmosfera.

Numa abordagem sustentável, os edifícios devem ser projetados para garantir o conforto térmico dos ocupantes durante todo o ano, com um mínimo de energia auxiliar para aquecimento e arrefecimento. Em abordagens não-sustentáveis, os edifícios são cada vez mais dependentes de sistemas de climatização que permitam garantir o conforto térmico no seu interior. Este tipo de medida origina um aumento no consumo de energia, bem como um aumento das emissões de gases de efeito de estufa. Consequentemente, verifica-se também um aumento dos custos de utilização do edifício, uma vez que os preços dos combustíveis fósseis têm um grande impacto nos custos de operação dos sistemas de climatização, conduzindo-nos a um aumento do custo operacional dos edifícios durante todo o seu ciclo de vida (Blengini et al., 2010).

O recurso a aplicações relacionadas com a utilização de energias renováveis contribui para o aumento da eficiência energética, diminuição do recurso a reservas de combustíveis fósseis e consequente diminuição das emissões de poluentes para a atmosfera, tornando-se numa medida de atuação crucial na promoção da eficiência energética e da sustentabilidade dos edifícios. Além disso, a utilização de fontes de energia renováveis é um fator decisivo na redução da dependência energética dos edifícios. Portanto, o recurso ao armazenamento térmico através da utilização de PCM constitui uma estratégia para o desenvolvimento de projetos construtivos com elevado desempenho energético.

A capacidade de diminuir e deslocalizar os consumos energéticos, associada à utilização de PCM, potencia a sua utilização em argamassas como uma solução para a melhoria da eficiência energética dos edifícios. Desta forma, a incorporação de PCM em sistemas construtivos possui benefícios sociais, económicos e ambientais, possibilitando um contributo significativo nas diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável.

Os benefícios sociais estão diretamente relacionados com o aumento do conforto térmico no interior das habitações, sendo este um requisito relevante para a obtenção de um edifício de qualidade. O aumento do conforto térmico é conseguido através da capacidade de armazenamento do PCM, permitindo armazenar e libertar energia, mantendo as temperaturas interiores sensivelmente constantes, ou pelo menos com variações inferiores.

A utilização de soluções construtivas modificadas com a incorporação de PCM, possui ainda um efeito benéfico na humidade interior dos espaços, o que sem dúvida conduzirá a uma diminuição de eventuais patologias no interior dos edifícios. O aspeto ambiental encontra-se relacionado com a redução do recurso a fontes de energia não renováveis, uma vez que esta tecnologia possui um efeito termorregulador do ambiente interior dos edifícios, proporcionando uma diminuição da utilização dos equipamentos de climatização, que também permite reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera. A dimensão económica diz respeito à adequação da tecnologia e custos associados à sua implementação. Os custos inerentes à sua aplicação devem ser facilmente suportados e amortizados pelo utilizador. Pode ainda referir-se que, os benefícios económicos da diminuição dos consumos energéticos e desfasamento dos mesmos para fora das horas de maior procura, são evidentes e podem ser conseguidos através do armazenamento térmico.

É do conhecimento geral que todos os materiais interagem com o ambiente, no entanto, grande parte não possui capacidade de alterar as suas propriedades de acordo com as características do ambiente em que são aplicados. 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, este passa de estado sólido para estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Quando a temperatura ambiente baixa, e passa o ponto de solidificação do PCM, então este passa do estado líquido para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada.

De todos os materiais existentes aquele cuja assimilação do conceito de mudança de fase, torna a sua perceção mais fácil é a água. Esta pode apresentar-se no estado sólido, líquido ou gasoso. O processo de transição do estado sólido para o estado líquido, é denominado de fusão e o processo inverso de solidificação, ocorrendo ambos a cerca de 0°C. Por sua vez a transição do estado líquido para o gasoso denomina-se de vaporização e o processo inverso de condensação, ocorrendo a cerca de 100°C. A cada mudança de estado encontra-se associada uma quantidade de energia, denominada de entalpia.

Para a correta utilização do PCM, este deve ser encapsulado, caso contrário, durante a fase líquida pode correr-se o risco deste se deslocar do local em que foi aplicado (Figura 1). Existem duas principais formas de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento. O macroencapsulamento baseia-se na introdução de PCM em tubos, painéis ou outro recipiente de grandes dimensões, geralmente é efetuado em recipientes com mais de 1 cm de diâmetro.

O microencapsulamento de PCM consiste na colocação de uma pequena massa em pequenas partículas, revestidas por polímeros de alto desempenho. As microcápsulas podem ser esféricas ou assimétricas e com forma variável, com diâmetro inferior a 1 cm, contudo o diâmetro preferencial situa-se entre os 1 - 60 µm. A vantagem deste processo de encapsulamento é a melhoria da transferência de calor, através da sua grande superfície (Cabeza et al. 2011; Tyagi et al., 2011).

Em 1983, surgiu a primeira classificação do PCM em orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. Os materiais orgânicos podem ser parafínicos e não-parafínicos, possuindo uma fusão congruente, mudando de fase vezes sem conta e sem degradação. Os PCMs inorgânicos são classificados como sais hidratados e metálicos. Os sais hidratados são o grupo mais importante dos PCMs e têm vindo a ser extensivamente estudados, uma vez que possuem uma maior condutibilidade térmica, reduzida inflamabilidade e custos de aquisição mais baixos. Por último, as misturas eutéticas resultam da combinação de dois ou mais compostos de natureza orgânica, inorgânica ou ambas, apresentando desta forma temperaturas de transição mais aproximadas das necessidades existentes, comparativamente com os compostos que as originam, individualmente (Zalba, 2003).

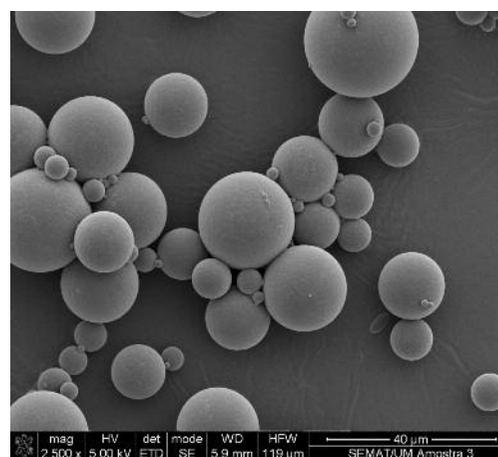


Figura 1: Microcápsulas de material de mudança de fase.

De todas as aplicações de PCM em edifícios, a mais interessante é a sua incorporação em materiais de construção com o objetivo de alterar as suas propriedades térmicas (Figura 2). Existem uma série de possibilidades: o PCM pode ser usado como um meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo, pode ser incorporado no pavimento, na parede ou no teto e pode também fazer parte do mais complexo sistema térmico, tais como bombas de calor e painéis solares, sendo que a grande vantagem da incorporação de PCM nos edifícios é a vasta área que estes oferecem para armazenamento e transferência de calor.



Figura 2: Microestrutura de uma argamassa de gesso com incorporação de PCM.

A importância da adequação da temperatura de transição do PCM e a temperatura atmosférica é extremamente importante, uma vez que a utilização de uma temperatura de transição fora da gama de temperaturas de conforto, não permite o correto funcionamento da solução construtiva, não se tirando partido da capacidade de armazenamento térmico do material.

Vários trabalhos no âmbito das argamassas com incorporação de microcápsulas de PCM têm vindo a desenvolver-se. O trabalho tem incidido na incorporação de PCM em argamassas à base de diferentes ligantes, sendo estes a cal aérea, cal hidráulica, gesso e cimento. Para cada tipo de ligante os autores desenvolveram e caracterizaram argamassas dopadas com diferentes teores de PCM, no que diz respeito às suas características físicas e mecânicas, desempenho térmico e durabilidade (Cunha et al., 2012; Cunha et al., 2013a, Cunha et al., 2013b; Cunha et al. 2015a).

Verificou-se que existe uma boa interação entre o PCM e os diferentes materiais constituintes da argamassa, evidenciada pela ausência de fissuras na sua microestrutura. As microcápsulas de PCM apresentaram uma distribuição homogénea na matriz da argamassa, tendo o PCM demonstrado também uma boa integridade, sem sinais de rutura ou de danos, o que demonstra que as microcápsulas resistem adequadamente ao processo de mistura, aplicação e cura das argamassas. Contudo, mesmo existindo uma boa interação entre os diferentes materiais constituintes da argamassa, foram avaliadas as suas características mais importantes, tais como a resistência à compressão, absorção de água, gelo-degelo e regulação da temperatura, de modo a provar que estas argamassas se adequam ao sector da construção em Portugal.

Relativamente à resistência à compressão foi possível verificar que a incorporação de PCM originou uma diminuição do seu valor em todos os ligantes estudados (Figura 3). Contudo, nas argamassas à base de cal hidráulica, gesso e cimento foi possível obter argamassas com classificação mínima CSII, de acordo com a norma portuguesa NP EN 998-1 (IPQ, 2010). Por outro lado, no que confere à absorção de água foi possível verificar um aumento da mesma com a presença de PCM (Figura 4). Estes comportamentos encontram-se associados com a necessidade uma maior quantidade de água na formulação das argamassas, devido às pequenas dimensões das microcápsulas de PCM, o que gera uma maior porosidade da argamassa e conseqüente menor resistência mecânica (Cunha et al., 2015b).

A durabilidade dos materiais de construção encontra-se diretamente relacionada com a sustentabilidade dos mesmos. Uma vez que materiais mais duráveis conduzem a menores ações de reabilitação, o que conseqüentemente origina menores consumos de matérias-primas, energia e produção de resíduos. A durabilidade de um material consiste na capacidade de suportar o desgaste ou deterioração. Até recentemente, existia uma suposição errada de que um material mais resistente, seria por conseqüência um material mais durável. Portanto, os desenvolvimentos tecnológicos dos materiais de construção concentraram-se em obter materiais cada vez mais resistentes. A durabilidade das argamassas com incorporação de PCM foi também avaliada pelos autores tendo em consideração os ensaios de gelo/degelo. De acordo com a Figura 5, foi possível observar que a incorporação de PCM torna as argamassas mais susce-

tíveis de serem atacadas, o que se encontra relacionado com a facilidade que os agentes agressores possuem em penetrar na argamassa devido ao aumento da porosidade com a incorporação de PCM. No entanto, todas as argamassas possuem um comportamento satisfatório (Cunha et al., 2015c). De salientar que a incorporação de fibras de poliamida (Figura 6) melhora significativamente o comportamento das argamassas ao gelo-degelo e também diminui a sua retração (Cunha et al., 2012; Cunha et al., 2015c).

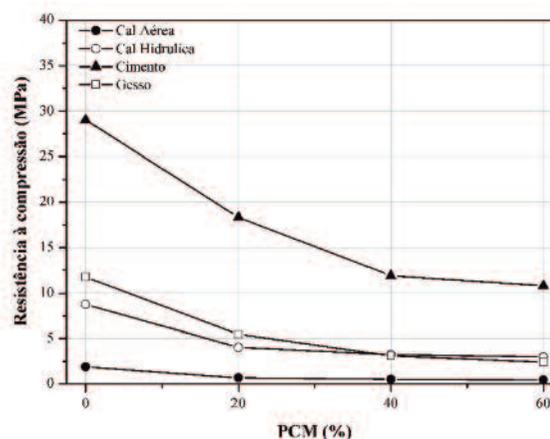


Figura 3: Resistência à compressão de argamassas com incorporação de PCM.

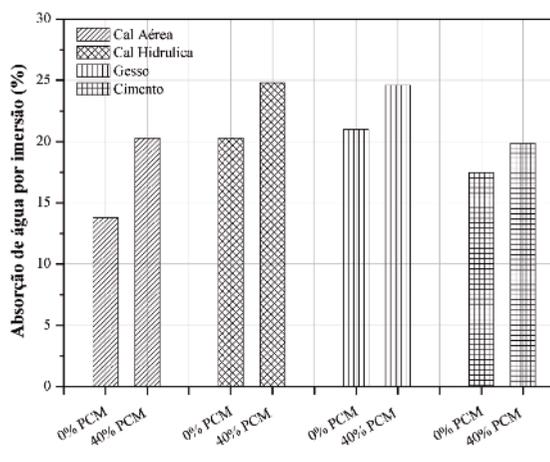


Figura 4: Absorção de água por imersão de argamassas com incorporação de PCM.

Os autores avaliaram ainda o comportamento térmico de argamassas com incorporação de PCM, para um dia típico de verão para a região norte de Portugal. Os ensaios foram efetuados com recurso a modelos (Figura 7) colocados no interior de uma câmara climática. Foi possível observar que quando a temperatura atinge o intervalo de temperaturas de conforto térmico, compreendidas entre 20°C e 25°C, ocorre a transição de fase do PCM e o comportamento térmico das argamassas começa a desenvolver-se de um modo distinto quando comparado com o comportamento térmico das argamassas sem incorporação de PCM (Figura 8). Em todas as argamassas foi possível observar o efeito benéfico da incorporação de PCM, uma vez que se verificou uma diminuição das temperaturas máximas e aumento das temperaturas mínimas nas argamassas dopadas com PCM.

Verificou-se também que a temperatura para as argamassas com PCM permanece mais próxima ou até mesmo dentro das temperaturas de conforto por um período de tempo mais longo. Este efeito traduz-se numa redução do tempo de operação dos sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento no interior dos edifícios, proporcionando desta forma uma redução nos consumos energéticos dos edifícios e aumento dos parâmetros de conforto dos seus ocupantes.

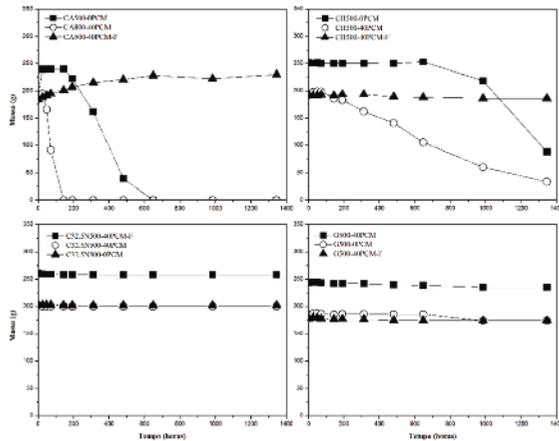


Figura 5: Perda de massa face a ações de gelo-degelo de argamassas com incorporação de PCM.

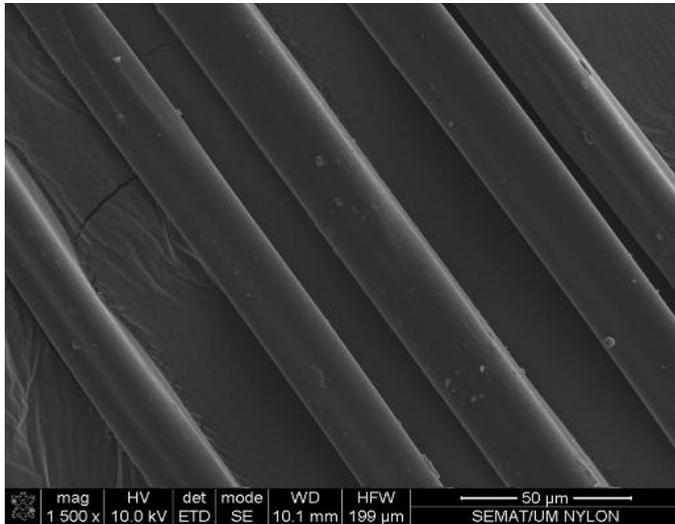


Figura 6: Fibras de poliamida.

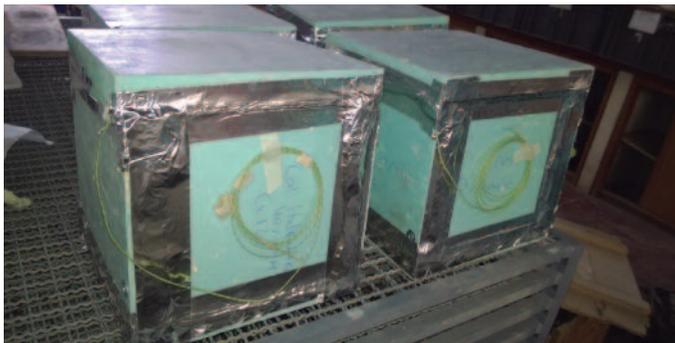


Figura 7: Modelos utilizados nos ensaios térmicos.

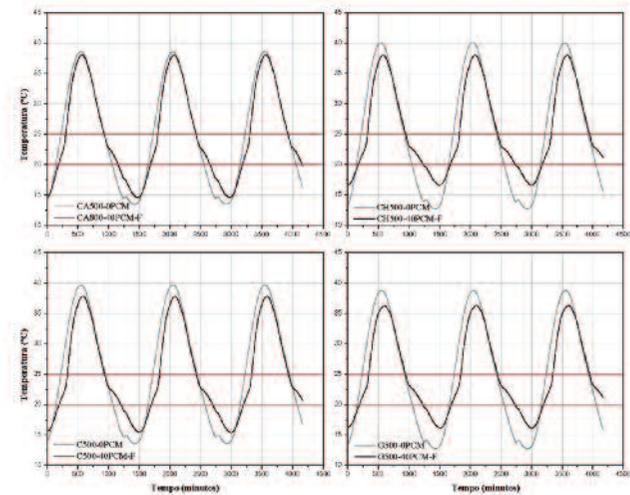


Figura 8: Desempenho térmico das argamassas com incorporação de PCM durante a estação de verão

Em suma, demonstrou-se que a incorporação de PCM em argamassas altera as suas principais propriedades. Contudo, estas alterações não impedem a normal utilização das mesmas nos edifícios, uma vez que todas estas alterações podem ser controladas através de uma correta formulação das argamassas. Assim, foi comprovada que a utilização de argamassas com PCM constitui uma solução construtiva sustentável de valor acrescentado, permitindo suprimir os principais desafios existentes na indústria da construção relativamente à melhoria dos parâmetros de conforto no interior dos edifícios.

Referências

- BLENGINI, G.; CARLO, T. (2010) The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*. 42 pp. 869-880.
- CABEZA, L.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; GRACIA, A.; FERNÁNDEZ, A. (2011) Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 pp. 1675-1695.
- CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. (2013b) Influence of Adding Encapsulated Phase Change Materials in Aerial Lime based Mortars. *Advanced Materials Research*. 687 pp. 255-261.
- CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. (2015a) Mortars Based in different binders with incorporation of phase change materials: Physical and mechanical properties. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 19 pp. 1216-1233.
- CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A.; GARBACZ, A. (2015b) Mortars with phase change materials - Part I: Physical and mechanical characterization. *Key Engineering Materials*. 634 pp. 22-32.
- CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A.; GARBACZ, A. (2015c) Mortars with phase change materials - Part II: Durability evaluation. *Key Engineering Materials*. 634 pp. 33-45.
- CUNHA, S.; AGUIAR, J.; KHERADMAND, M.; BRAGANÇA, L.; FERREIRA, V. (2013a) Thermal mortars with incorporation of PCM microcapsules. *Restoration of Buildings and Monuments*. 19 pp. 171-177.
- CUNHA, S.; ALVES, V.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V. (2012) Use of phase change materials microcapsules in aerial lime and gypsum mortars. *Cement Wapno Beton. Special Issue* pp. 17-21.
- DIAMANTI, M.; ORMELESE, M.; PEDEFERRI, M. (2008) Characterization of photocatalytic and super-hydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. *Cement and Concrete Research*, 38 pp. 1349-1353.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ), NP EN 998-1 (2010) Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores.
- SOARES, N.; COSTA, J.; GASPAR, A.; SANTOS, P. (2013) Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *Energy and Buildings*. 59 pp. 82-103.
- TYAGI, V.; KAUSHIK, S.; TYAGI, S.; AKIYAMA, T. (2011) Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 pp. 1373-1391.
- ZALBA, B.; MARÍN, J.; CABEZA, L.; MEHLING, H. (2003) Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 23 pp. 251-283.