

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA MEDIR O DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES EM LSF

MARGARIDA GONÇALVES^{1*}, CLÁUDIO MARTINS¹, NELSON SOARES^{1,2}, PAULO SANTOS¹, JOSÉ COSTA^{1,2}

1: ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal
ana.goncalves@uc.pt, claudio-martins@uc.pt, pfsantos@dec.uc.pt

2: ADAI, LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra
Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal
nelson.soares@dem.uc.pt, jose.costa@dem.uc.pt

Palavras-chave: LSF, *Lightweight steel framing*, Paredes, Condutibilidade térmica, Coeficiente de transmissão térmica, Câmaras climáticas.

Resumo Neste trabalho faz-se uma breve apresentação do Projeto “PCMs4Buildings – Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase (PCMs – “Phase Change Materials”) para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios”, dando particular destaque à Tarefa nº 4 em curso no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade de Coimbra (UC). O objetivo principal desta tarefa é o desenvolvimento de um protocolo experimental (que use como ponto de partida a Guarded Hot Box existente no laboratório do DEC), para medir o desempenho térmico de paredes não-homogêneas com estrutura leve em aço enformado a frio (LSF - “Lightweight Steel Framing”) e que incluam PCMs na sua constituição. O protocolo final passará pela medição do comportamento das paredes em LSF em regime transiente, para avaliar de que forma os PCMs podem melhorar o comportamento térmico desta tipologia de construção.

Na primeira parte deste artigo, apresentam-se alguns resultados preliminares correspondentes à fase de calibração do ensaio para medição da transferência de calor através de paredes em regime permanente. Para o efeito, foi avaliada a condutibilidade térmica de uma “parede” feita de um material homogêneo com condutibilidade térmica conhecida a priori: o poliestireno extrudido (XPS). É também descrito o ensaio laboratorial efetuado no equipamento Hot Disk TPS 2500 S para validar os resultados obtidos (assim como a comparação direta com a informação fornecida pelo fabricante). Na segunda parte, apresentam-se alguns resultados preliminares dos ensaios realizados para avaliar o desempenho térmico de três paredes em LSF: parede sem isolamento térmico; com isolamento térmico apenas na caixa-de-ar e, finalmente, com isolamento térmico na caixa-de-ar e pelo exterior. Os resultados obtidos permitem conhecer melhor o comportamento das paredes em LSF em estudo, e fornecer resultados experimentais que possam ser usados na simulação numérica da transferência de calor através de paredes em LSF.

1. INTRODUÇÃO

A conjuntura económica atual e as exigentes diretrizes da UE relativamente ao desempenho energético dos edifícios desafiam a indústria da Construção e a comunidade académica para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias que possam contribuir para a redução do consumo de energia associado à climatização [1]. O desenvolvimento de novos sistemas e soluções construtivas que tirem proveito de energias renováveis, nomeadamente da energia solar térmica, poderá contribuir para a construção de edifícios mais sustentáveis e com menores consumos de energia. De facto, a eficiência energética dos edifícios é uma área de investigação global [2], com um mercado exigente à procura de novas soluções que permitam aumentar a independência energética dos edifícios, impulsionando o consumo de energias renováveis e reduzindo o consumo de combustíveis fósseis.

É neste contexto que surge o Projeto *PCMs4Buildings*, cujo objetivo principal é avaliar novas formas de incorporar PCMs em novos sistemas e soluções construtivas, de forma a aumentar a eficiência energética dos sistemas propostos e o comportamento térmico dos edifícios [1]. Note-se que os PCMs estão já hoje a ser usados em várias tecnologias para armazenamento e gestão de energia solar térmica ao permitirem tirar proveito do calor latente envolvido nos processos de mudança de fase sólido-líquido. Como revisto por Soares *et al.* [3], muitos PCMs foram já identificados para integrarem sistemas de armazenamento de calor latente e várias técnicas de encapsulamento e confinamento (para evitar fugas do PCM na fase líquida) foram também já propostas, assim como diferentes técnicas para a incorporação de PCMs em diferentes materiais e sistemas de construção.

As principais linhas de investigação do Projeto *PCMs4Buildings* são a: (i) caracterização da transferência de calor com mudança de fase em cavidades retangulares; (ii) caracterização laboratorial das principais propriedades termofísicas dos PCMs; (iii) simulação numérica de escoamentos (CFD) considerando os fenómenos de mudança de fase, e (iv) avaliação experimental da transferência de calor em regime transiente com mudança de fase. Os objetivos específicos do Projeto são: (i) a avaliação de métodos alternativos para a caracterização das propriedades termofísicas dos PCMs; (ii) o desenvolvimento de uma metodologia de CFD para a análise detalhada e paramétrica do comportamento térmico de sistemas com cavidades retangulares preenchidas com diferentes PCMs; (iii) o desenvolvimento de uma metodologia experimental para obter resultados de referência para fins de validação numérica e para a avaliação do desempenho térmico de alguns protótipos, e (iv) a definição de protótipos à escala real para serem ensaiados experimentalmente e otimizados numericamente. O Projeto está dividido em seis tarefas principais, conforme esquematizado na Figura 1. Neste artigo apresentam-se os resultados preliminares da Tarefa nº 4, em curso no DEC-UC. O objetivo principal desta tarefa é o desenvolvimento de um protocolo experimental (que use como ponto de partida as câmaras climáticas da *Guarded Hot Box* já existente) para avaliar o desempenho térmico de paredes em LSF que venham a incorporar PCMs na sua constituição. As paredes em LSF a serem ensaiadas são desenvolvidas no âmbito da Tarefa nº 5. Os resultados experimentais obtidos serão utilizados na Tarefa nº 2 do Projeto, conforme esquematizado na Figura 1.

Como revisto por Soares *et al.* [4], a construção em LSF permite grande redução no peso da estrutura e oferece boa resistência mecânica, podendo salvaguardar-se o conforto térmico e acústico através das diferentes camadas de materiais que constituem a solução construtiva final. Podem também utilizar-se 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 [5]. Uma eventual desvantagem da construção em LSF é a reduzida inércia térmica, que pode originar alguns problemas de conforto térmico, nomeadamente o sobreaquecimento durante a estação de arrefecimento [4]. A elevada condutibilidade térmica do aço pode também dar origem a pontes térmicas que, se não forem devidamente tratadas, poderão comprometer o bom desempenho

térmico do edifício. Os PCMs podem ser usados na construção em LSF para aumentar a inércia térmica do edifício de forma passiva, evitando, por exemplo, problemas de sobreaquecimento (já que se tira proveito do efeito termorregulador dos PCMs durante a mudança de fase), e também para tratar as pontes térmicas. De facto, o principal objetivo da Tarefa nº 4 é avaliar de que forma algumas soluções construtivas com PCMs disponíveis no mercado poderão ser utilizadas para melhorar o desempenho térmico das paredes em LSF definidas na Tarefa nº 5.

Neste artigo, apenas se apresentam os resultados preliminares relativos à avaliação do comportamento térmico de paredes em LSF com diferentes configurações, mas ainda sem PCMs. Ou seja, todos os resultados foram obtidos em condições de regime permanente.

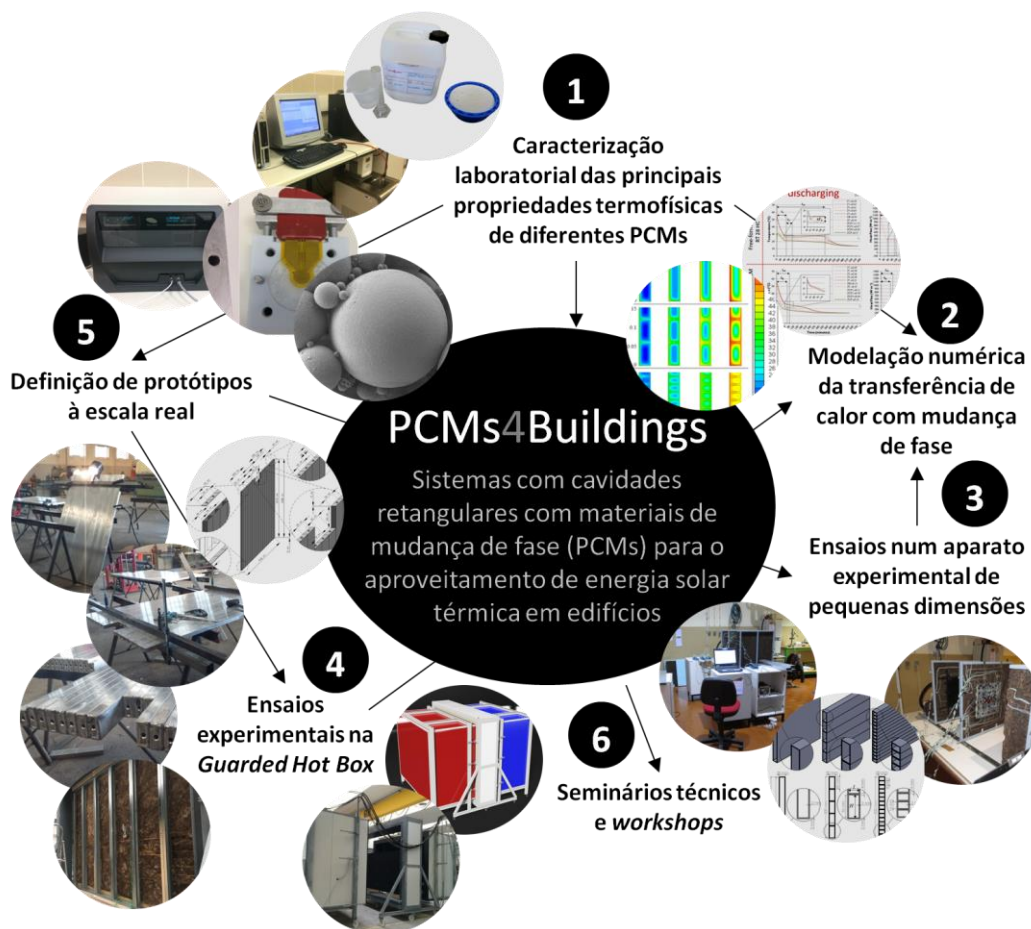


Figura 1. Principais tarefas do Projeto *PCMs4Buildings*.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Nesta secção apresentam-se os principais equipamentos e a metodologia de ensaio usados para medir o comportamento térmico de quatro paredes: (i) parede simples em XPS; (ii) parede em LSF sem isolamento térmico; (iii) parede em LSF com isolamento térmico apenas na caixa-de-ar e, (iv) parede em LSF com isolamento térmico na caixa-de-ar e pelo exterior (Figura 2). Na Tabela 1 apresentam-se os materiais utilizados na construção das diferentes paredes, espessuras e respetivos valores da condutibilidade térmica.

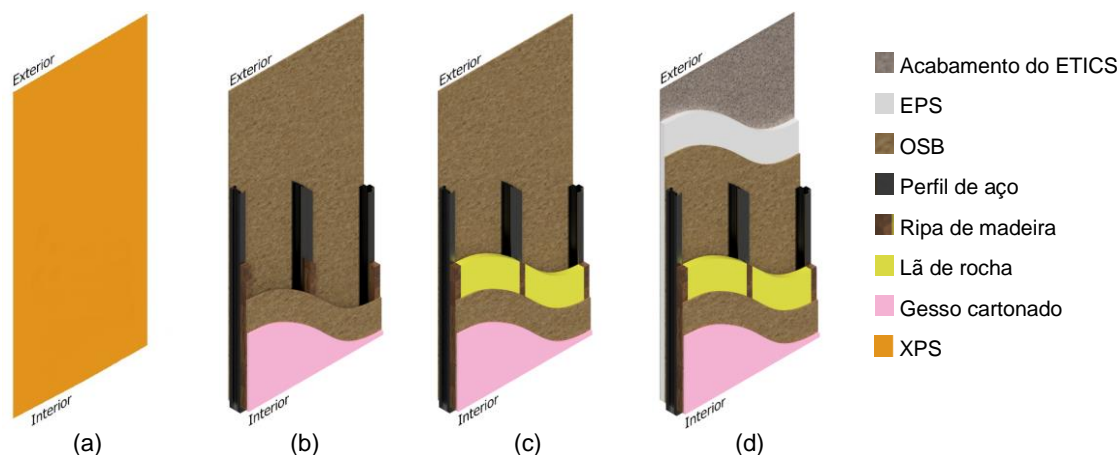


Figura 2. Representação esquemática das paredes ensaiadas: (a) parede simples em XPS; (b) parede em LSF sem isolamento térmico; (c) parede em LSF com isolamento térmico apenas na caixa-de-ar e, (d) parede em LSF com isolamento térmico na caixa-de-ar e pelo exterior (ETICS).

Tabela 1. Materiais utilizados na construção das diferentes paredes.

Material	Espessura [mm]	Condutibilidade térmica λ [W/(m·°C)]
Gesso cartonado	15	0.25
OSB	12	0.13
Ripa de madeira	50	0.18
Lã de rocha	50	0.037
XPS	100	0.036
Perfil de aço	96	61.0
OSB	12	0.13
EPS	60	0.04
Acabamento do ETICS	4	0.75

2.1. Equipamentos e monitorização

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizadas as duas câmaras climáticas da *Guarded Hot Box* instalada no DEC-UC (Figura 3), cada uma com dimensões internas de 2.28 m x 3.18 m x 1.70 m (A x L x P). As temperaturas interiores das câmaras climáticas podem variar entre 0 e 50 °C. Considerou-se que uma das câmaras seria aquecida – câmara quente –, enquanto que a outra seria arrefecida – câmara fria. A parede a testar é colocada entre as duas câmaras, através de um pórtico móvel com dimensões internas de 2.70 m x 3.60 m (A x L), correspondendo a uma área de parede de 9.72 m². Em cada ensaio, são medidas as temperaturas nas faces quente e fria da parede, assim como a temperatura média do ar no interior de cada câmara, através de termopares do tipo K, *TC - A30 KX*, com precisão de ± 2.2 °C (Figura 4a). Foi também medido o fluxo de calor na parede utilizando 12 fluxímetros *Hukseflux HFP01*, com precisão de $\pm 5\%$ (Figura 4b). Para medir a velocidade do ar dentro de cada câmara, foram utilizados dois sensores *Delta OHM HD 403 TS2* com uma precisão de ± 0.2 m/s (Figura 4c). Para avaliar a evolução da variação da humidade relativa do ar no interior das câmaras foram usados dois termohigrómetros *Tinytag Ultra 2 TGU-4500*, com precisão de $\pm 3\%$ (e de ± 0.6 °C para medições de temperatura, Figura 4d).



Figura 3. Fotografia e representação esquemática das câmaras climáticas da *Guarded Hot Box* usadas nos ensaios.



a) Termopar tipo K, TC - A30KX.



b) Fluxímetro Hukseflux HFP01.



c) Sensor de velocidade do ar, Delta OHM HD 403.



d) Termohigrómetro, Tinytag Ultra 2 TGU-4500.

Figura 4. Sensores utilizados para medição.

2.2. Metodologia

Para a definição da metodologia de ensaio foram considerados os procedimentos das três seguintes normas (usadas na determinação de parâmetros térmicos em condições de regime permanente, usando medidores de fluxo de calor e sensores de temperatura):

- ISO 9869-2014 [6]: descrição dos métodos de análise de equipamentos, procedimentos e dados;
- ASTM C 1155-95 [7]: descrição dos métodos de análise de dados;
- ASTM C 1046-95 [8]: detalhe dos equipamentos e procedimentos necessários.

As duas primeiras normas propõem métodos distintos para a análise de dados: a ISO 9869-1994

descreve o *método da média* (caracterizado pela sua simplicidade de cálculo) para obter a resistência térmica do elemento (R) e o coeficiente de transmissão térmica das paredes (U), ou o *método dinâmico* (mais sofisticado, mas exigindo uma maior precisão nas medições); a ASTM C 1155-95 indica o *método da soma dos mínimos quadrados* (caracterizado por ser um método mais complexo), ou o *método do somatório* (semelhante ao *método da média*). Neste trabalho será usado o *método do somatório*. Foi também garantido o critério de convergência estabelecido na norma ASTM C 1155-95: os valores convergem quando o fator de convergência CR_n é inferior a 10% para pelo menos três períodos de duração n , ou seja, $CR_n < 0.10$.

Como as paredes em LSF são elementos bastante heterogêneos devido à presença dos perfis metálicos, o valor da sua resistência térmica pode variar substancialmente em função do local onde é feita a medição. Assim, são obtidos dois valores diferentes de R : um na zona dos perfis de aço, outro na zona entre os perfis. O valor total da resistência térmica da parede (R_e) é ponderado de acordo com as áreas de influência de cada um dos sensores, conforme proposto na norma ASTM C 1155-95. Esta área de influência pode ser obtida através de métodos expeditos, como o *método da zona* descrito na ASHRAE [9], que utiliza um fator de ponderação, aplicado à seção da parede com a ponte térmica (neste caso, o perfil de aço).

2.3. Parede simples em XPS

Para verificar o bom funcionamento de ambas as câmaras climáticas da *Guarded Hot Box* e validar o protocolo experimental para a medição da condutibilidade térmica de paredes em regime permanente, foram realizadas medições numa parede simples de 3.60 m x 2.70 m (9.72 m²) composta por painéis de XPS com condutibilidade térmica de referência (fornecida pelo fabricante) de $\lambda_R = 0.036$ W/(m·°C) e com 0.10 m de espessura (Figura 5).

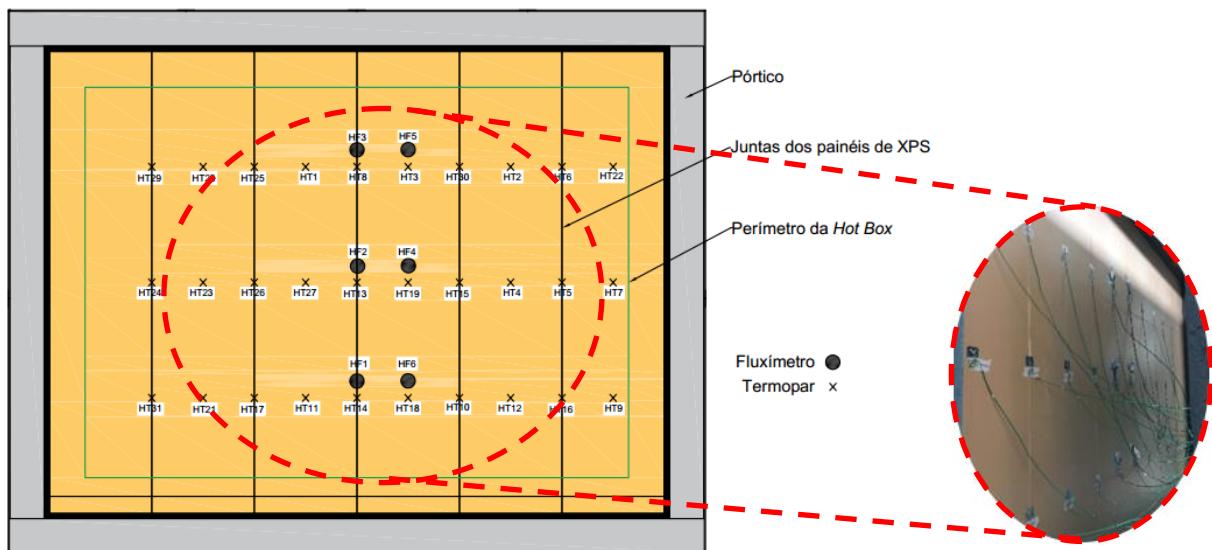


Figura 5. Representação esquemática e fotografia da localização dos sensores de aquisição de dados (temperatura e fluxo de calor) na superfície quente da parede em XPS.

Foram distribuídos seis fluxímetros e 30 termopares em cada uma das faces (quente e fria) da parede conforme esquematizado na Figura 5. Foi ainda medida a temperatura no interior de cada uma das câmaras através de um termopar localizado no centro de cada câmara. Os dados foram

monitorizados a cada intervalo de tempo de 5 minutos. Impôs-se uma temperatura média de 45 °C na câmara quente e de 15 °C na câmara fria. Verificou-se uma velocidade do ar de 0.5 m/s em ambas as câmaras climáticas, e humidades relativas médias de 34% e 67% nas câmara quente e fria, respetivamente. Foi ainda medida a condutibilidade térmica das placas de XPS usadas no equipamento *Hot Disk TPS 2500 S* (Figura 6a). As três amostras testadas no medidor de condutibilidade térmica têm uma seção quadrada de 0.1 m x 0.1 m com uma espessura de 0.04 m (Figura 6b). Os resultados obtidos nos três casos (valores obtidos com base nos ensaios efetuados nas câmaras climáticas, no medidor de condutibilidade térmica *Hot Disk TPS 2500 S*, e no valor fornecido pelo fabricante) são resumidos na Tabela 2.

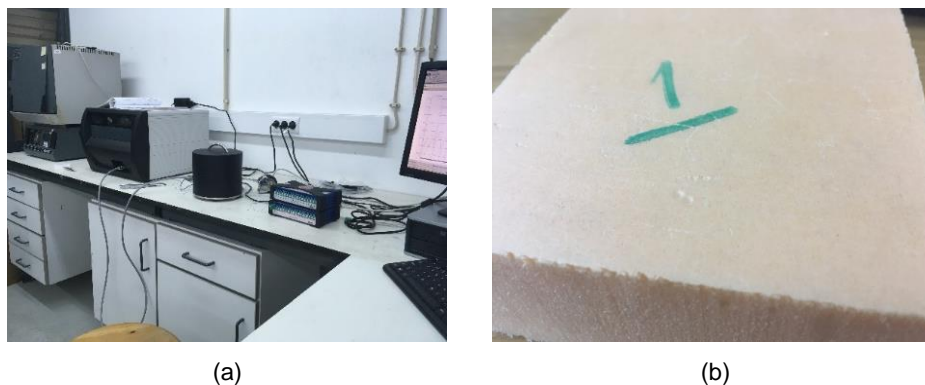


Figura 6. (a) Fotografia do equipamento *Hot Disk® TPS 2500 S* existente no DEC-UC. (b) Fotografia das amostras de XPS testadas.

Tabela 2. Condutibilidade térmica do XPS com base nos ensaios efetuados nas câmaras climáticas (λ), no medidor de condutibilidade térmica *Hot Disk TPS 2500 S* (λ_{HD}), e no valor fornecido pelo fabricante (λ_R). Valor do coeficiente de transmissão térmica da parede (U) obtido em cada ensaio efetuado nas câmaras climáticas.

Ensaio	$\lambda = e/R_e$ [W/(m·°C)]	λ_{HD} [W/(m·°C)]	Diferença entre λ e λ_{HD} [%]	Diferença entre λ e λ_R [%]	Diferença entre λ_{HD} e λ_R [%]	U [W/(m²·°C)]
nº 1	0.0360	0.0343	+5.0	0.0	-4.7	0.323
nº 2	0.0382	0.0344	+11.0	+6.1	-4.4	0.350
nº 3	0.0372	0.0335	+11.1	+3.4	-6.9	0.334
Média	0.0371	0.0341	+9.0	+3.2	-5.4	0.336

A condutibilidade térmica média (λ) da parede em XPS obtida experimentalmente pelo método dos fluxímetros foi de 0.0371 W/(m·°C), ou seja, 3.2% mais elevada do que o valor fornecido pelo fabricante (λ_R). A metodologia prescrita nas normas anteriores tem subjacente o pressuposto de que são aceitáveis valores com uma diferença inferior a 10%. Verificou-se uma diferença média de 9.0% entre os valores de λ e λ_{HD} , o que pode ser explicado pelo facto do XPS ser um isolamento térmico de células fechadas, cujo valor de λ pode variar em função da densidade, da estrutura e dimensão dos poros, bem como do teor de humidade e da temperatura do material. Segundo Koru [10], a condutividade térmica deve ser medida a uma temperatura de 10 °C, mas os ensaios no equipamento da *Hot Disk* foram realizados à temperatura ambiente de 25 °C, o que pode justificar a diferença entre os valores obtidos. Os valores de λ_{HD} e λ_R apresentam uma diferença de -5.4%.

2.4. Paredes em LSF

Todas as paredes em LSF estudadas neste artigo são constituídas por painéis modulares de 1.2 m de largura por 2.50 m de altura e 0.249 m de espessura (Figura 7a). Na estrutura metálica são usados três tipos diferentes de perfis, com diferentes secções, conforme ilustrado na Figura 7b: "C" de alma macho (perfis verticais), "C" de alma fêmea (perfis verticais), e "U" (perfis horizontais). Os ensaios experimentais foram realizados nas mesmas condições descritas anteriormente, variando-se apenas a duração do ensaio. Para cada tipologia de parede em LSF foram realizados três ensaios. A Figura 8 contém uma representação esquemática da localização dos sensores na superfície fria de uma parede em LSF: são distribuídos seis fluxímetros e 21 termopares em cada uma das faces (quente e fria) da parede. Foi ainda medida a temperatura média no interior das câmaras climáticas através de três termopares localizados no interior de cada câmara.

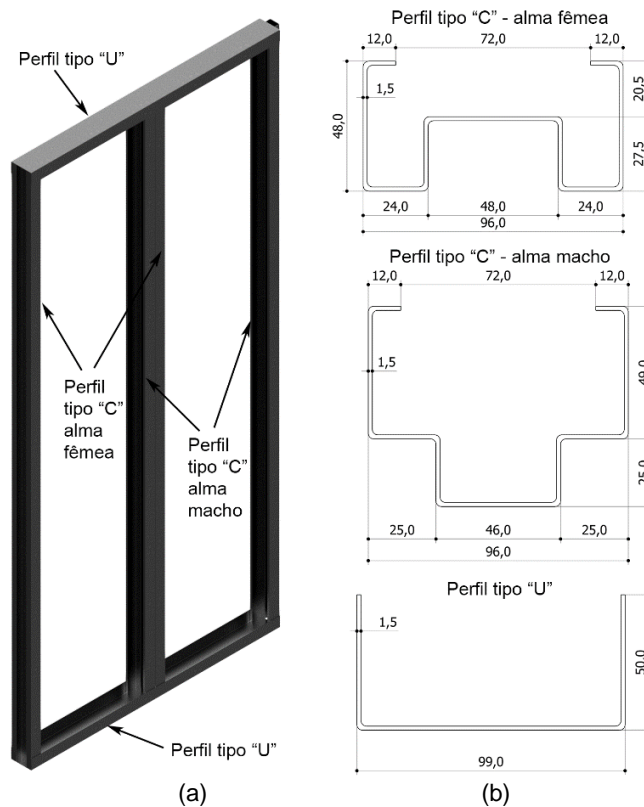


Figura 7. (a) Painel modular utilizado na estrutura em LSF e, (b) secção transversal dos diferentes tipos de perfis metálicos utilizados.

O primeiro conjunto de ensaios foi realizado numa parede com estrutura em LSF sem qualquer isolamento térmico (Figura 2b). No segundo conjunto de ensaios foi usada uma parede com estrutura em LSF e com lã de rocha colocada na caixa-de-ar (Figura 2c), conforme ilustrado na Figura 9. Por último, foi testada a parede completa, ou seja, com isolamento térmico interior (lã de rocha na caixa-de-ar) e exterior (sistema ETICS), conforme esquematizado na Figura 2d.

A Figura 10 e Figura 11 representam, respetivamente e a título de exemplo, a evolução da temperatura e do fluxo de calor medidos por alguns dos sensores (termopares e fluxímetros) distribuídos pelas superfícies quente e fria da parede em LSF com lã de rocha na caixa-de-ar e

sistema ETICS pelo exterior. Conforme se pode verificar pela evolução das curvas, é atingido o regime permanente pretendido para o ensaio, uma vez que tanto as temperaturas como os fluxos de calor registados se mantêm praticamente constantes. As siglas “HT” e “CT” referem-se aos termopares colocados nas superfícies quente (*Hot Thermocouple*) e fria (*Cold Thermocouple*) da parede, respetivamente. As siglas “HF” e “CF” indicam se o fluxímetro está colocado no lado quente (*Hot Fluxmeter*) ou no lado frio (*Cold Fluxmeter*) da parede. Na Tabela 3 apresenta-se o valor de U obtido experimentalmente para cada uma das paredes em LSF estudadas.

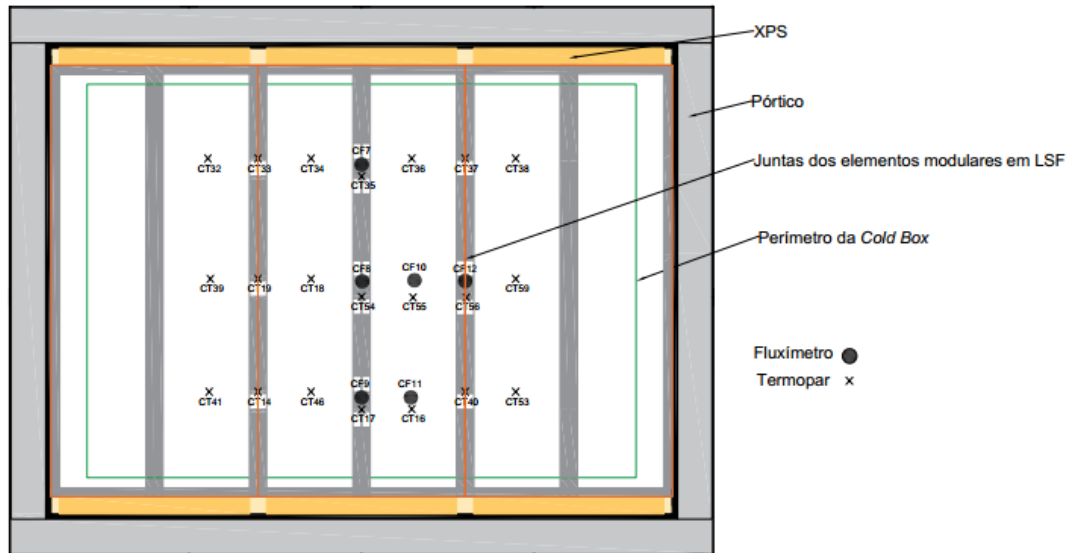


Figura 8. Representação esquemática da localização dos sensores de aquisição de dados (temperatura e fluxo de calor) na superfície fria da parede em LSF.



Figura 9. Interior da parede em LSF com lã de rocha na caixa-de-ar.

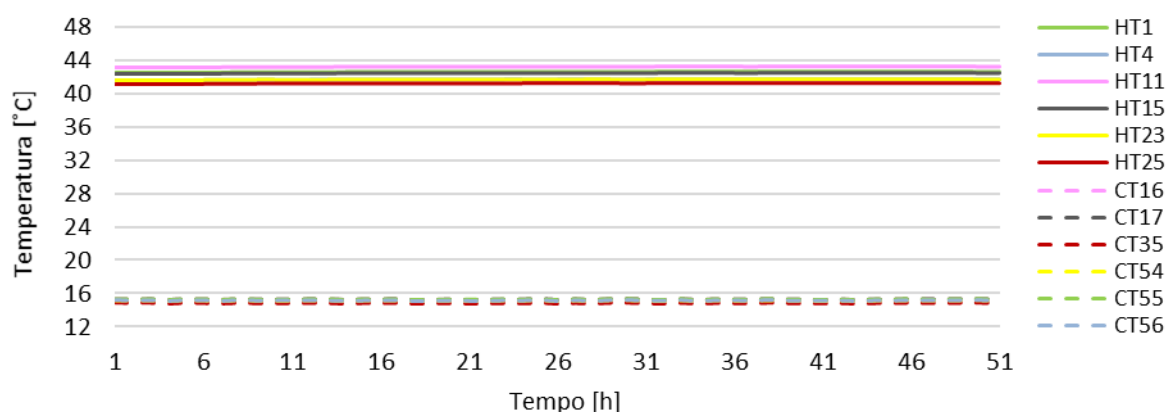


Figura 10. Exemplos da evolução das temperaturas superficiais medidas na parede LSF com lã de rocha na caixa-de-ar e sistema ETICS pelo exterior ao longo do tempo de ensaio.

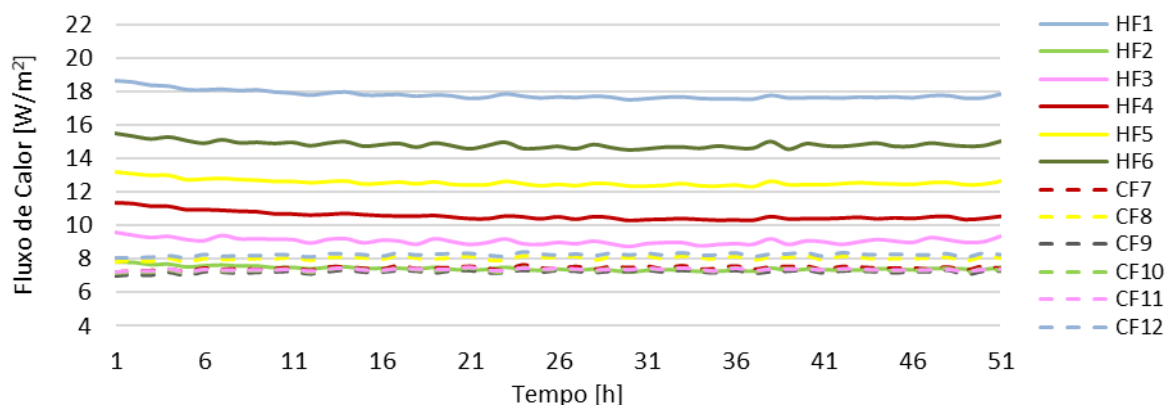


Figura 11. Evolução dos fluxos de calor medidos na parede LSF com lã de rocha na caixa-de-ar e sistema ETICS pelo exterior ao longo do tempo de ensaio.

Tabela 3. Valores de U para as três paredes LSF estudadas.

Descrição da parede	U [W/(m ² .°C)]		
	Entre perfis	Nos perfis	Valor global
Sem isolamento térmico	1.568	1.081	1.479
Com lã de rocha na caixa-de-ar	0.658	0.873	0.707
Com lã de rocha na caixa-de-ar e ETICS	0.279	0.389	0.321

Como se pode verificar, obteve-se um valor global de U de 1.479 W/(m².°C) para a parede sem qualquer isolamento térmico. Através da análise dos resultados verifica-se que, contrariamente ao que é habitual nos elementos com estrutura em LSF, o valor de U nas zonas dos perfis de aço verticais é significativamente inferior (cerca de 31%) ao das zonas da parede entre estes perfis. Isto deve-se à existência de ripas verticais de madeira que proporcionam um maior isolamento térmico nessa zona e atenuam a ponte térmica causada pelo elemento de aço. Para a parede com isolamento térmico apenas na caixa-de-ar obteve-se um valor global de U de 0.707 W/(m².°C). Assim, verifica-se que a introdução de isolamento térmico na caixa-de-ar melhora significativamente o

desempenho térmico da parede, pois o valor de U reduziu-se para cerca de metade (-52%) relativamente ao valor obtido para a parede sem qualquer isolamento térmico. Para esta tipologia de parede, verificou-se que o valor de U na zona entre os perfis de aço é cerca de 33% inferior ao valor obtido na zona dos perfis verticais, devido à existência de lã de rocha nessa região. Por último, para a parede em LSF completa, ou seja, com isolamento térmico na caixa-de-ar e pelo exterior, obteve-se o valor global de U de $0.321 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, o que se traduz numa redução de 55% relativamente ao valor obtido para a parede com lã de rocha na caixa-de-ar e numa redução de 78% relativamente ao valor de U obtido para a parede sem isolamento térmico. O valor de U na zona entre os perfis de aço é cerca de 40% inferior ao valor de U obtido na zona dos perfis verticais.

3. CONCLUSÕES

Neste artigo fez-se uma breve apresentação do Projeto *PCMs4Buildings*, de forma a enquadrar-se a investigação em curso no âmbito da Tarefa nº 4 em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de ensaio para avaliar experimentalmente o desempenho térmico de paredes em LSF, usando como ponto de partida as câmaras climáticas da *Guarded Hot Box* já existente.

Na primeira parte do trabalho foi ensaiada uma parede homogénea em XPS para verificar o bom funcionamento de ambas as câmaras climáticas e validar o protocolo experimental para a medição da condutibilidade térmica de paredes em regime permanente. Foram ainda comparados os valores obtidos para a condutibilidade térmica do XPS com base nos ensaios efetuados nas câmaras climáticas (λ) e no medidor de condutibilidade térmica *Hot Disk TPS 2500 S* (λ_{HD}), com o valor fornecido pelo fabricante (λ_R). A resistência térmica (R) foi determinada usando o *método do somatório* prescrito na norma ASTM C 1155-95. Após a análise dos resultados, cujo erro médio foi inferior a 10%, conclui-se que o protocolo experimental pode ser usado para medir a condutibilidade térmica de paredes homogéneas em regime permanente.

Na segunda parte do artigo, avaliou-se o desempenho térmico de três paredes em LSF: parede sem isolamento térmico; com isolamento térmico apenas na caixa-de-ar e, com isolamento térmico na caixa-de-ar e pelo exterior (sistema ETICS). Concluiu-se que a introdução de isolamento térmico, quer seja no interior da parede, quer seja pelo exterior, reduz para mais de metade o valor do coeficiente de transmissão térmica da parede. Tal como esperado, a parede em LSF com melhor desempenho (menor valor de U) é a parede com isolamento térmico no espaço entre os perfis de aço, e pelo exterior. O trabalho futuro passa pela adaptação do protocolo experimental para se poder avaliar o comportamento térmico de paredes em LSF com PCMs em regime transiente.

4. 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.

5. REFERÊNCIAS

- [1] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, A. G. Lopes, L. Durães, P. N. Simões, and J. J. Costa, 2016, "Kick-off presentation of the project 'PCMs4Buildings' - Systems with PCM-filled rectangular cavities for the storage of solar thermal energy for buildings" pp. 235–247, in CINCOS'S 16, Lisboa, Portugal, 3 e 4 de Novembro.

- [2] N. Soares, J. Bastos, L. D. Pereira, A. Soares, A. R. Amaral, E. Asadi, E. Rodrigues, F. B. Lamas, H. Monteiro, M. A. R. Lopes, and A. R. Gaspar, 2017, “A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 845–860.
- [3] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, 2013, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy Build.*, vol. 59, pp. 82–103.
- [4] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J. J. Costa, and L. Simões da Silva, 2017, “Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 194–209.
- [5] E. LSK, 2005, “European Lightweight Steel-framed Construction” in *Arcelor*, p. 92.
- [6] ISO, 1994, “ISO 9869 - Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance”, vol. 994.
- [7] ASTM, 2001, “ASTM C1155-95 - Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data”.
- [8] ASTM, 2001, “ASTM C1046-95 - Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components”, vol. 95, no. Reapproved.
- [9] R. and A. E. American Society of Heating, 1993, “ASHRAE Handbook of Fundamentals Refrigerating and Air-conditioning Engineers”.
- [10] M. Koru, 2016, “Determination of Thermal Conductivity of Closed-Cell Insulation Materials That Depend on Temperature and Density,” pp. 4337–4346.