



DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE UMA PAREDE COM ESTRUTURA LEVE EM AÇO ENFORMADO A FRIO

Cláudio Martins^a, Margarida Gonçalves^a, Paulo Santos^a, José Costa^b, Nelson Soares^{a,b} e Luís Simões da Silva^a

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

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

Resumo. A avaliação do coeficiente de transmissão térmica de paredes com estrutura leve em aço (LSF, do inglês “*Lightweight Steel Framing*”) é essencial para determinar o seu desempenho térmico. Devido à complexidade destas estruturas, torna-se essencial a realização de uma avaliação experimental do seu comportamento térmico. Esta pode ser efetuada através do método do fluxo de calor. Neste artigo, descreve-se a realização de um ensaio experimental baseado na utilização de duas câmaras climáticas (uma quente e outra fria) e a determinação do fluxo de calor através de uma parede com estrutura em LSF. Adicionalmente, são descritos os processos de verificação da fiabilidade da utilização da câmara climática e da correta utilização dos procedimentos descritos nas normas ISO 9869 [1] e ASTM C1155-95 [2].

1. Introdução

As exigências do uso racional de energia nos edifícios aumentaram nas últimas décadas, sendo, presentemente, indissociáveis do importante conceito de construção sustentável. Na conceção de edifícios, a redução do consumo de energia e a utilização de materiais recicláveis são fatores essenciais para assegurar a sustentabilidade ambiental.

Nos últimos anos, surgiram várias alternativas aos sistemas estruturais tradicionais na edificação, como por exemplo, as estruturas leves em aço [3]–[6]. A construção em LSF usa como componente básico uma estrutura em perfis de aço enformados a frio, normalmente prismáticos e com secções transversais de pequena espessura. Devido às suas vantagens, o sistema estrutural em LSF tem tido um crescimento significativo nos últimos anos e é utilizado com sucesso em muitos tipos de edifícios de pequena altura (e.g., industriais, escritórios e residenciais).

A avaliação do coeficiente de transmissão térmica de um elemento de construção (e.g., uma parede) é essencial para determinar o seu desempenho térmico. A avaliação experimental pode ser realizada utilizando o método do fluxo de calor, também designado por método dos fluxímetros de calor, ou pelo método da Hot Box [7]. O método dos fluxímetros de calor é amplamente utilizado e permite a medição das propriedades de transmissão térmica de componentes de construção, com base nas diferenças de fluxo de calor e de temperatura, entre as superfícies

interiores e exteriores, medidas em vários pontos do elemento de construção. Esta técnica permite que os testes sejam realizados *in situ* ou em laboratório, e é relativamente simples de utilizar. No caso da análise *in situ*, as maiores dificuldades estão no estabelecimento de condições de estado estacionário, que é demorado, sendo também difícil garantir um fluxo de calor lateral nulo ou muito reduzido, em particular em elementos construtivos não homogêneos. Os procedimentos experimentais para este método são dados pelas normas ISO 9869 [1] e ASTM C1155-95 [2].

Neste artigo, descreve-se a determinação experimental (em laboratório) do coeficiente de transmissão térmica de uma parede com estrutura em LSF utilizando o método dos fluxímetros de calor e com o recurso a câmaras climáticas. O método é descrito, é verificada a fiabilidade dos resultados e é validada a sua correta utilização.

2. Equipamento e metodologia de ensaio

2.1 Descrição dos equipamentos

Os ensaios experimentais foram realizados num *apparatus* experimental constituído por duas câmaras climáticas, uma fria e outra quente, com as dimensões internas de 2,28m x 3,18m x 1,70m (A x L x P), e um pórtico central de acondicionamento de provetes (parede) com dimensões internas de 2,70m x 3,60m (A x L), correspondendo a uma área de análise de elementos verticais de 9,72 m², ilustrado na Fig. 1.

A temperatura no interior das câmaras de ensaio pode variar entre 0 °C e 50 °C, com recurso a um sistema de climatização composto por um *chiller* e resistências elétricas. Devido ao gradiente de temperatura imposto entre as duas faces da parede, é estabelecido um fluxo de calor em estado estacionário.



Fig. 1: *Apparatus* experimental

O fluxo de calor nos provetes foi monitorizado em determinados pontos por meio de termofluxímetros do tipo *Hukseflux HFP01*, com precisão de $\pm 5\%$. As temperaturas superficiais do provete e do ar foram medidas em ambas as câmaras, através de termopares do tipo K com uma precisão de $\pm 2,2$ °C. Para monitorizar a humidade do ar no interior das câmaras de ensaio, foram utilizados termohigrómetros, com precisão de $\pm 3\%$. Todas as medições dos sensores foram registadas num datalogger com a exceção dos termohigrómetros, que têm o registo de dados incorporado. Na Fig. 2 ilustram-se os sensores utilizados nos ensaios experimentais.

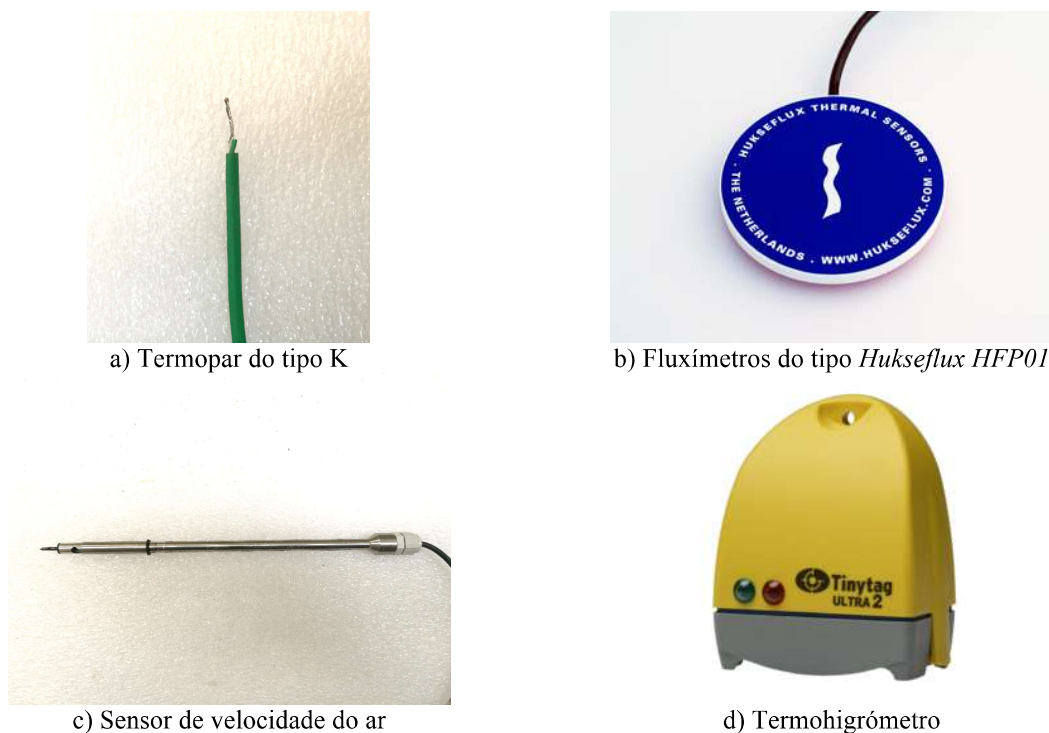


Fig. 2: Sensores utilizados nas medições

2.2 Metodologia de ensaio

Com as temperaturas e os fluxos de calor obtidos experimentalmente, pode ser calculado o coeficiente de transmissão térmica global da parede (método dos fluxímetros de calor). Como os ensaios foram realizados em condições de regime estacionário, os cálculos são realizados em conformidade com os procedimentos apresentados em várias normas para medições *in situ*, nomeadamente: ISO 9869 [1], ASTM C1046-95 [8] e ASTM C1155-95 [2].

Para obter a resistência térmica (R) do elemento, a ASTM C1155-95 [2] estabelece um procedimento de cálculo designado por técnica do somatório (“*summation technique*”). Este método utiliza o fluxo de calor e as diferenças das temperaturas superficiais da parede ao longo do tempo. Para uma rápida convergência, é necessário que as temperaturas sejam constantes, e que exista uma diferença significativa entre as temperaturas das faces exterior e interior da parede. A norma ISO 9869 [1] utiliza o método da média, que é semelhante à técnica do somatório da ASTM C1155-95 [2]. No entanto, nem todos os valores medidos durante um ensaio podem ser utilizados, sendo necessário garantir um critério de convergência estabelecido na norma ASTM C1155-95 [2]. Segundo esta norma, os valores convergem quando o fator de convergência CR_n é inferior a 10%, para pelo menos 3 períodos de duração n , ou seja, $CR_n < 0,10$.

Para garantir bons resultados, é também necessário verificar a variância do valor da resistência térmica $V(R_e)$ nos diversos pontos medidos na parede. Refira-se que o teste da variância deve ser realizado para pelo menos 3 posições dos sensores. Se a variância for menor ou igual a 10%, o valor a utilizar para a resistência térmica da parede poderá ser considerado igual ao valor médio de todos os R que cumpriram os requisitos apresentados. Verificada a convergência e variância dos valores de R , a resistência térmica do elemento é calculada pela média aritmética, conforme prescrito na ASTM C1155-95 [2].

No entanto, esta metodologia de cálculo é apenas válida para elementos homogêneos. Como a resistência térmica pode variar significativamente nas paredes com estrutura em LSF, dependendo da posição dos sensores, são obtidos dois valores diferentes para a resistência térmica - zona dos perfis de aço e zona entre perfis. O valor global da resistência térmica da parede é ponderado de acordo com as áreas de influência de cada um dos sensores, conforme proposto pela

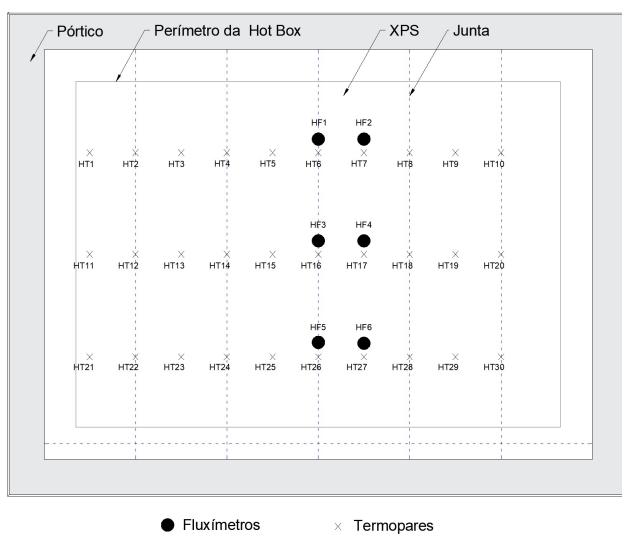
ASTM C1155-95 [2]. Torna-se deste modo necessário determinar a área de influência dos perfis metálicos. A metodologia ideal para aferir a área de influência é a utilização de imagens obtidas com câmaras de infravermelhos. Quando as imagens térmicas não são suficientes, pode-se recorrer a métodos expeditos, como o *zone method* descrito na ASHRAE [9]. Neste método é usado um fator de ponderação, aplicado à secção da parede com a ponte térmica (e.g. perfil metálico), que foi desenvolvido para calcular a largura da área de influência dos perfis metálicos.

2.3 Verificação da fiabilidade do método de ensaio

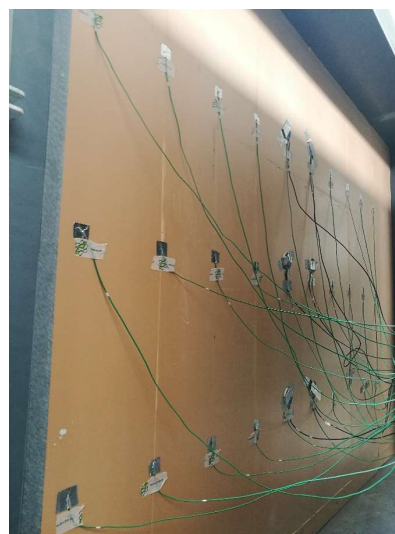
A verificação do correto funcionamento dos sensores de temperatura e do fluxo de calor, bem como da correta implementação do método de ensaio são fundamentais para assegurar a fiabilidade dos resultados. Para o efeito, foi realizada uma campanha de 3 ensaios, em que se utilizou um elemento vertical homogêneo composto por painéis de XPS (poliestireno extrudido) com 100 mm de espessura e com uma condutibilidade térmica de referência (indicada pela fabricante) $\lambda_r = 0,036 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ - parede XPS (Fig. 3).

Os ensaios experimentais foram realizados em regime permanente, com temperaturas ambiente médias de 45 °C e 15 °C nas câmaras quente e fria, respetivamente. O intervalo de convergência encontra-se entre 20 e 24 horas. O intervalo de tempo de cada amostragem de dados foi de 5 minutos. A velocidade do ar em ambas as câmaras foi de 0,5 m/s e verificou-se uma humidade média relativa de 34% na câmara quente e de 67% na câmara fria.

A parede foi instrumentada com 60 termopares, 12 termofluxímetros, 2 termohigrómetros e 2 sensores de velocidade do ar, sendo colocados metade destas quantidades em cada lado da parede (lado quente e frio) de modo a existir simetria nos pontos de medição. A Fig. 3 ilustra a localização dos sensores.



a) Localização dos sensores no lado quente



b) Parede instrumentada, lado frio

Fig. 3: Parede XPS de calibração e verificação

A condutibilidade térmica média dos painéis XPS obtida experimentalmente pelo método dos fluxímetros foi de 0,0368 W/(m.K), 2,2% mais elevada do que a obtida pelo fabricante utilizando a técnica prescrita na ISO 8302:1991[10]. Na Tabela 1 resumem-se os resultados obtidos, utilizando-se 4 casas decimais para os valores da condutibilidade térmica (λ) e 3 casas decimais para o coeficiente de transmissão térmica (U), de modo a aumentar a exatidão na análise de comparação. Caso contrário, os valores semelhantes após o arredondamento podem levar a diferenças percentuais significativas. Para além dos valores do coeficiente de transmis-

são térmica obtido para a zona central dos painéis, apresentam-se também os valores de U calculados para a zona das juntas dos painéis, permitindo a comparação entre os dois e aferir a eficácia isolante da junta.

Tabela 1: Valores da condutibilidade térmica, λ , e do coeficiente de transmissão térmica, U , dos painéis XPS dos ensaios experimentais

| Ensaio n.º | Valor de U [W/(m ² .K)] | | λ [W/(m.K)] | Diferença entre λ_r e λ | Diferença ΔU [W/(m.K)] |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|---|-----------------------------------|
| | Zona central do painel | Nas juntas de painéis | | | |
| 1 | 0,323 | 0,339 | 0,0361 | +0,3% | 0,0361 |
| 2 | 0,347 | 0,368 | 0,0379 | +5,3% | 0,0379 |
| 3 | 0,333 | 0,368 | 0,0364 | +1,1% | 0,0364 |
| Média | 0,334 | 0,358 | 0,0368 | +2,2% | 0,0368 |
| Desvio padrão | 0,012 | 0,017 | 0,001 | | 0,001 |

λ_r - Condutibilidade térmica de referência indicada pelo fabricante (0,036 W/(m.K))

Os valores obtidos permitem concluir que as zonas de juntas entre painéis aumentam ligeiramente o valor do coeficiente de transmissão térmica (+7%). No entanto, isto não afeta significativamente o valor de U_{Global} da parede, se tivermos em consideração que a área de influência das juntas devido às imperfeições nos encaixes entre painéis representa 0,8 % da área total da parede em análise. Assim, obtém-se um U_{Global} da parede de 0,0335 W/(m².K), o que reflete um aumento de 0,06% em relação ao valor de U sem juntas.

O valor da condutibilidade térmica obtido pelo método dos termofluxímetros na zona central difere apenas 2,2% do valor de referência, o que se entende como um bom resultado, tendo em consideração que a metodologia tem subjacente a ideia de que uma diferença inferior a 10% é aceitável, conforme indicado no critério da norma para aceitação de valores entre diferentes períodos de tempo ($CR_n < 0,10$).

No que diz respeito à incerteza dos dados medidos experimentalmente, deve ser tida também em consideração a precisão dos sensores que, conforme referido anteriormente, é de $\pm 0,4$ °C para os termopares e de $\pm 5\%$ para os termofluxímetros.

3. Análise do desempenho térmico da parede

A quantificação exata da transferência de calor nos elementos construtivos em LSF poderá ser ainda mais complexa de realizar do que em paredes de construção tradicional, por exemplo de tijolo [11], dada a maior heterogeneidade das propriedades térmicas (e.g. condutibilidade térmica) entre as estruturas de aço e os restantes materiais. Neste capítulo, descreve-se o provete utilizado (parede com estrutura em LSF) e determina-se o coeficiente de transmissão térmica (U), utilizando a avaliação experimental pelo método dos termofluxímetros.

3.1 Descrição da parede

A parede é constituída por elementos modulares de 1,2 m de largura, 2,50 m de altura e 0,249 m de espessura, com uma estrutura de aço galvanizado enformado a frio de paredes finas, com 3 tipos diferentes de secções transversais: "C" de alma macho, "C" de alma fêmea, e "U".

A Fig. 4a apresenta a estrutura em aço da parede, onde se detalham os 3 tipos de perfis. A Fig. 4b mostra as camadas constituintes do módulo de parede, os seus materiais e respetivas

espessuras. A Tabela 2 apresenta a constituição da parede, incluindo as espessuras e condutibilidades térmicas (λ) de cada camada de material aplicado na parede.

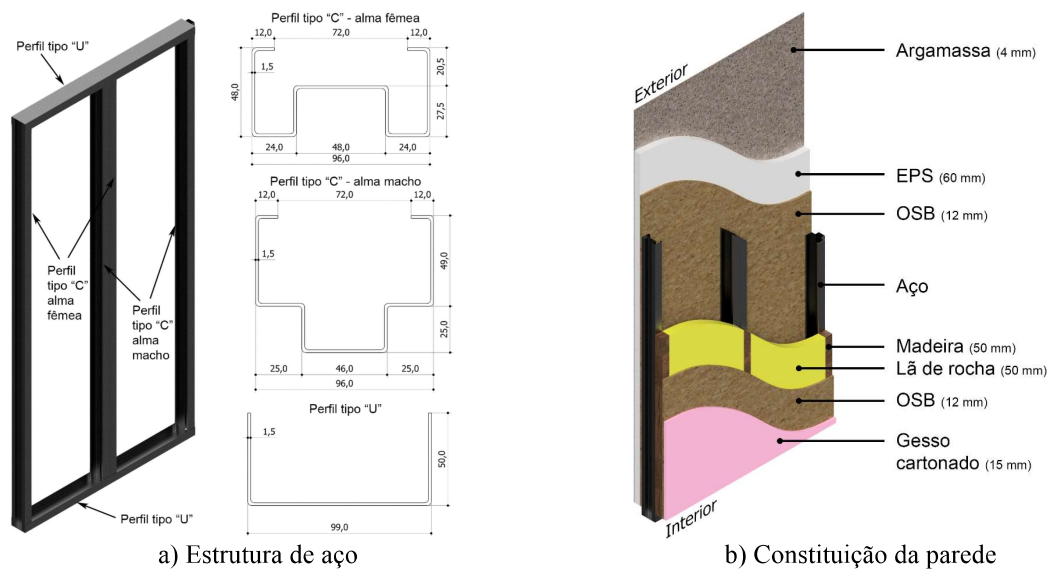


Fig. 4: Módulo de parede com estrutura em LSF

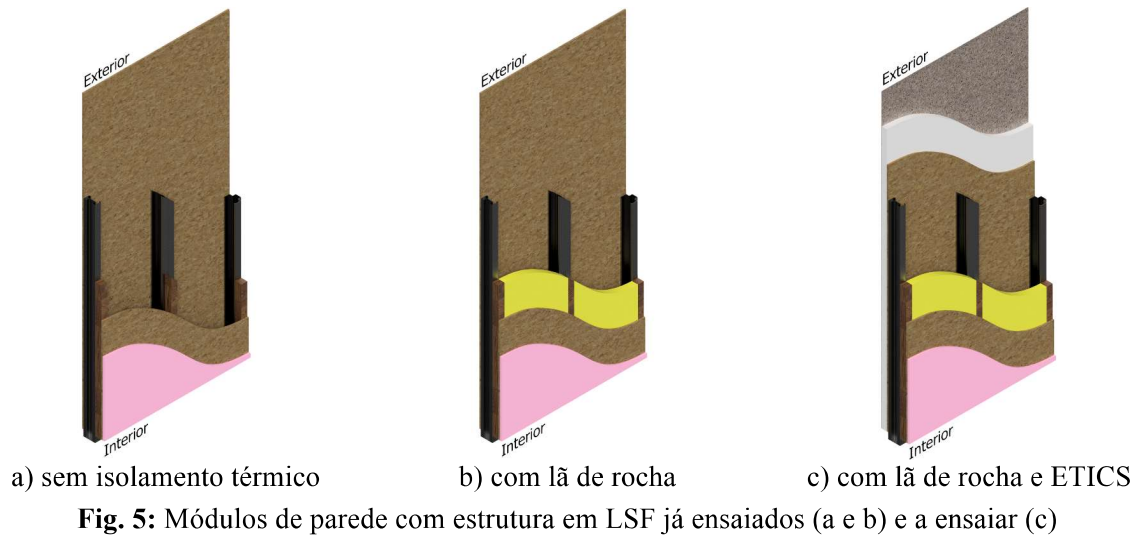
Tabela 2: Materiais da parede, espessuras e condutibilidades térmicas

| Material (da face exterior, lado frio, para a face interior, lado quente) | Espessura [mm] | λ [W/(m.K)] |
|---|----------------|---------------------|
| Acabamento do ETICS | 4 | 0,750 |
| EPS | 60 | 0,040 |
| OSB | 12 | 0,130 |
| Estrutura de aço | 96 | 61,000 |
| Lã de rocha | 50 | 0,037 |
| Madeira | 50 | 0,180 |
| OSB | 12 | 0,130 |
| Gesso Cartonado | 15 | 0,250 |

3.2 Ensaio experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados na câmara de ensaios apresentada anteriormente (Fig. 1). Os ensaios foram realizados nas mesmas condições dos ensaios descritos na subseção 2.3, tendo-se verificado uma humidade média relativa de 36% na câmara quente e 63% na câmara fria.

Os ensaios para avaliação do comportamento térmico da parede foram realizados em duas fases, por forma a permitir a comparação entre a existência (ou inexistência) de isolamento térmico (interior): (1) parede sem isolamento; (2) parede com lã de rocha. Para cada uma das duas tipologias de parede foram realizados três ensaios. As Fig. 5a e 5b permitem comparar as duas composições ensaiadas. A Fig. 5c apresenta a composição completa da parede com estrutura em LSF a ensaiar posteriormente e a Fig. 6 ilustra as paredes montadas no pórtico do *apparatus* experimental. As paredes foram instrumentadas com 54 termopares, 12 termofluxímetros, 2 termohigrómetros e 2 sensores de velocidade do ar, sendo colocados metade dos sensores em cada lado da parede (lado quente e frio) de modo a existir simetria nos pontos de medição. A Fig. 7 ilustra a localização dos sensores.

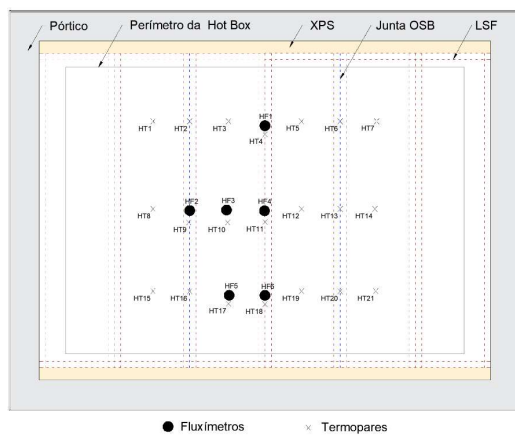


a) Acabamento em OSB



b) Lã de rocha na caixa-de-ar

Fig. 6: Parede com estrutura em LSF montada no pórtico de ensaio.



a) Localização dos sensores no lado quente



b) Parede instrumentada, lado frio

Fig. 7: Parede com estrutura em LSF

2.4 Análise e discussão dos resultados

Na Tabela 3 apresenta-se o resumo de resultados obtidos.

Tabela 3: Valores do coeficiente de transmissão térmica, U , obtidos experimentalmente

| Descrição | Valor de U [W/(m ² .K)] | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | Entre perfis | Nos perfis | Valor global |
| Sem isolamento térmico | 1,555 | 1,057 (-32%) | 1,480 (-5%) |
| Com lã de rocha na caixa-de-ar | 0,635 (-59%) | 0,824 (+30%) (-22%) | 0,706 (+11%) (-52%) |

O primeiro conjunto de medições tem como objetivo a caracterização da parede sem qualquer isolamento. Consta-se que na zona dos perfis de aço verticais existe uma diminuição do valor de U , cerca de 0,498 W/(m².K) em relação às restantes zonas da parede (entre perfis de aço), ou seja, -32%. Isto deve-se à existência de ripas verticais de madeira que proporcionam maior isolamento e atenuam a ponte térmica causada pelos perfis de aço. O valor global do coeficiente de transmissão térmica da parede é de 1,48 W/(m².K).

O segundo conjunto de ensaios pretende caracterizar o desempenho térmico da parede com o isolamento térmico na caixa-de-ar (lã de rocha). A partir dos resultados obtidos pode concluir-se que, como esperado, a lã de rocha melhora significativamente o desempenho térmico da parede, reduzindo os valores do coeficiente de transmissão térmica entre os perfis metálicos (-59%) e na proximidade dos perfis (-22%). Esta melhoria traduziu-se num decréscimo para cerca de metade (-52%) do valor de U global da parede (0,706 W/(m².K)) relativamente à parede inicial, isto é, sem qualquer isolamento térmico.

Na Fig. 8 apresenta-se um gráfico das temperaturas superficiais registadas num dos ensaios, com uma duração de 24 horas, para a parede com estrutura em LSF e lã de rocha na caixa-de-ar, confirmando-se o regime estacionário dado que as temperaturas não variam de forma significativa. As siglas “HT” e “CT” referem-se aos termopares colocados no lado quente (*hot thermocouple*) e no lado frio (*cold thermocouple*), respetivamente. A Fig. 9 ilustra graficamente a distribuição dos fluxos de calor para o referido ensaio. As siglas “HF” e “CF” indicam se o termofluxímetro está colocado no lado quente (*hot fluxmeter*) ou no lado frio (*cold fluxmeter*).

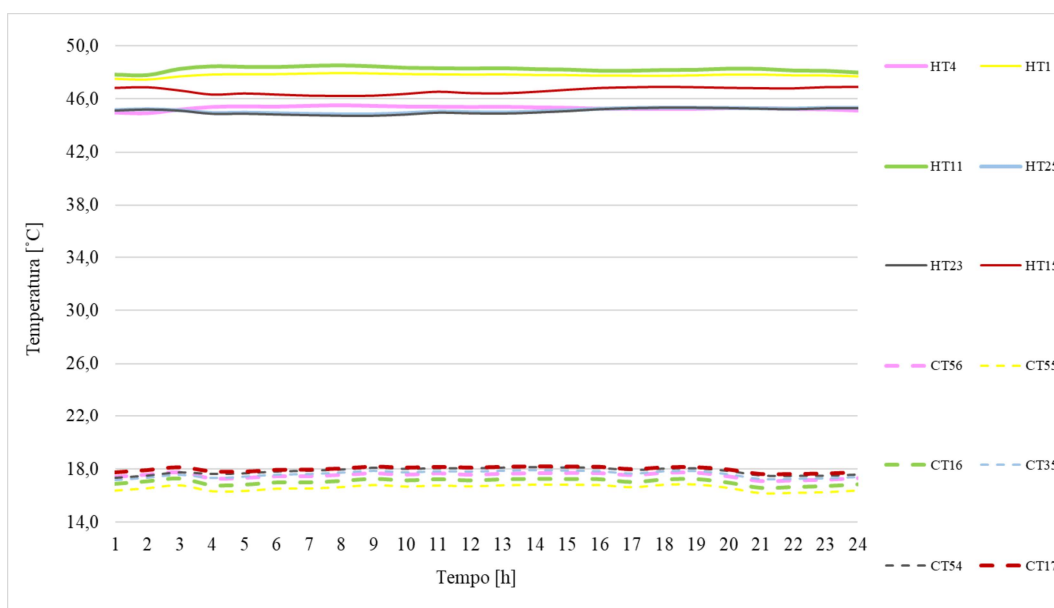


Fig. 8: Exemplo das temperaturas superficiais no lado quente (HT) e no lado frio (CT) para a parede com lã de rocha

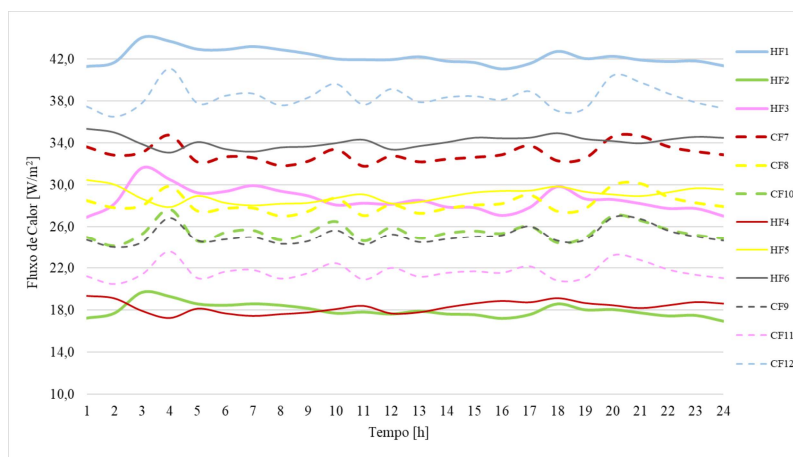
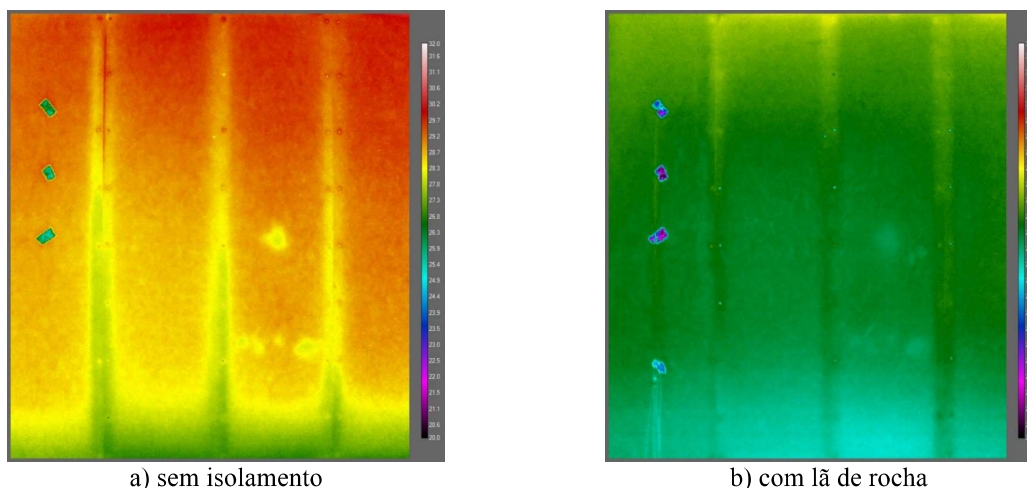


Fig. 9: Exemplo dos fluxos de calor no lado quente (HT) e no lado frio (CT) para a parede com lã de rocha

Com o objetivo de analisar a distribuição das temperaturas superficiais nas paredes testadas, foi utilizada uma câmara de radiação infravermelha. Nas imagens termográficas da Fig. 10 mostra-se a distribuição de temperaturas na superfície exterior das paredes, ou seja, no lado frio. Na Fig. 10a é ilustrada a solução sem qualquer isolamento, onde é possível identificar a localização dos perfis de aço com maior nitidez, uma vez que as ripas de madeira permitem reduzir a ponte térmica dos perfis e dessa forma, o fluxo de calor é superior entre os mesmos, fazendo com que a temperatura superficial também seja maior.

A Fig. 10b ilustra a solução com lã de rocha na caixa-de-ar da parede, sendo possível aferir que embora se tenha colocado isolamento, o mesmo não minimiza as pontes térmicas causadas pelos perfis de aço. Este facto é justificado pelo facto de o isolamento não ser contínuo, existindo apenas entre os perfis, razão pela qual a temperatura diminuiu de uma forma mais significativa nas zonas entre perfis. Note-se que, neste caso, a temperatura na zona dos perfis é ligeiramente superior.



a) sem isolamento

b) com lã de rocha

Fig. 10: Termografia por radiação infravermelha da superfície exterior (lado frio)

4. Conclusões

Neste artigo foi realizada uma análise experimental do desempenho térmico de uma parede modular com estrutura em LSF. Conclui-se que o comportamento térmico deste tipo de paredes é complexo de analisar, devido às pontes térmicas originadas pelos perfis em aço e por serem

elementos altamente heterogêneos, no que respeita às suas propriedades térmicas.

Nas duas soluções construtivas analisadas (parede com estrutura em LSF sem isolamento térmico e parede com estrutura em LSF com lâ de rocha) fica evidente a importância do isolamento térmico contínuo e são notórias as pontes térmicas criadas pelos perfis em aço, conforme ilustrado nas imagens de termografia por radiação.

De forma a caracterizar de forma mais completa o desempenho térmico da parede com estrutura em LSF, irá ser analisada futuramente uma terceira parede, com lâ de rocha na caixa de ar e isolamento térmico pelo exterior (ETICS). Todos os resultados obtidos serão usados na validação de modelos numéricos a serem utilizados na avaliação do comportamento térmico de paredes LSF com diferentes configurações.

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 PTDC/EMS-ENE/6079/2014 | POCI-01- 0145-FEDER- 016750.

Referências

- [1] ISO 9869, *Thermal insulation – Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*, International Organization for Standardization. 1994.
- [2] ASTM C1155-95, *Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data*. 2001.
- [3] P. Santos, H. Gervásio, L. Simões da Silva, and A. Gameiro, “Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings,” *Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 28, pp. 325–352, 2011.
- [4] P. Santos, L. Simões da Silva, H. Gervásio, and A. Gameiro Lopes, “Parametric analysis of the thermal performance of light steel residential buildings in Csb climatic regions,” *J. Build. Phys.*, vol. 35, no. 1, pp. 7–53, 2011.
- [5] P. Santos, L. Simões da Silva, and V. Ungureanu, *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings*. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, ISBN 978-92-9147-105-8, N. 129, 1st edition, 2012.
- [6] V. Murtinho, H. Ferreira, A. Correia, L. S. da Silva, C. Rebelo, and P. Santos, “Affordable houses: architectural concept of light steel residential house,” in *ICSA2010 – International Conference on Structures and Architecture*, 2010, pp. 1291–1297.
- [7] P. Santos, C. Martins, and L. Simões da Silva, “Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 111, no. 6, pp. 329–338, 2014.
- [8] ASTM C1046-95, *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. 2001.
- [9] R. and A. E. American Society of Heating, “ASHRAE Handbook of Fundamentals Refrigerating and Air-conditioning Engineers,” 1993.
- [10] ISO 8302, *Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Guarded hot plate apparatus*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1991.
- [11] J. Kosny, J. E. Christian, E. Barbour, and J. Goodrow, “Thermal Performance of Steel-Framed Walls,” 1994.