

DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES INTERIORES EM *LIGHT STEEL FRAME* (LSF): ESTUDO PARAMÉTRICO

Gabriela M. Lemes^a, Paulo F. A. Santos^b e Diogo M. R. Mateus^c

^{a,b,c} *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal.*

Resumo. O sistema de construção em LSF é rápido, limpo e flexível, mas os elementos de sua estrutura precisam ser adequadamente projetados e protegidos contra os efeitos das pontes térmicas causadas pela elevada condutibilidade térmica do aço. É necessário entender como ocorrem as transferências de calor através dos elementos construtivos de toda a envolvente da edificação para que se possa reduzir a perda de calor através desses elementos e diminuir o valor do coeficiente de transmissão térmica (valor de U). Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas para avaliar diferentes configurações de paredes interiores em LSF (entre espaços úteis e não úteis). Vários parâmetros foram avaliados separadamente para que fosse possível medir sua influência no valor total de U da parede.

1. Introdução

Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do total de energia consumida e cerca de 36% das emissões de CO₂ na Europa. [1] Os principais fatores com influência no consumo de energia de um edifício têm relação direta com as propriedades e forma da envolvente do edifício, o seu funcionamento, o comportamento dos seus ocupantes e o clima do local onde está situado [2] [3] [4] [5].

O setor de edifícios inclui os edifícios residenciais, comerciais, institucionais e outros não especificados. O uso de energia em edifícios abrange o aquecimento e arrefecimento de ambiente, aquecimento de águas sanitárias, iluminação, eletrodomésticos e equipamentos de cozinha [6]. Normalmente, uma parede em LSF usada como divisória interna é composta pelos seguintes elementos: (1) estrutura leve em perfis de aço enformados a frio; (2) painéis de revestimento, como gesso e OSB (“*Orientated Strand Board*”); (3) materiais de isolamento térmico e acústico, como lã mineral, que preenchem a cavidade existente entre os perfis verticais [7].

O valor da transmissão térmica (U) de elementos construtivos opacos, como é o caso de paredes em LSF, depende de vários fatores, tais como: a espessura de cada camada; o número de camadas; a condutibilidade térmica de cada material; a existência de pontes térmicas devido a presença de materiais em camadas não homogêneas (e.g., perfis em aço); a existência de espaços de ar no isolamento e das resistências térmicas superficiais [8]. Talvez os parâmetros mais relevantes em relação ao valor da transmissão térmica de um elemento construtivo em LSF sejam a quantidade de isolamento (espessura utilizada), as propriedades térmicas dos materiais (e.g., condutibilidade térmica), o seu posicionamento no elemento e a quantidade de aço presente na estrutura metálica [9] [10].

Dado à grande heterogeneidade presente no interior das paredes em LSF, com a presença de uma estrutura em aço não uniformemente distribuída no interior das paredes, é muito desafiante não só calcular com precisão o valor da transmissão térmica, mas também realizar medições precisas e fiáveis *in situ* e em laboratório [11].

Neste trabalho, o valor do coeficiente transmissão térmica (U) de paredes em LSF usadas como divisórias interiores serão avaliadas por meio de um estudo paramétrico com o objetivo de quantificar a relevância de diversos parâmetros no valor de U da referida parede.

2. Caracterização das paredes

Neste trabalho é utilizada como referência uma parede em LSF habitualmente utilizada como divisória interior. Esta parede é constituída por uma estrutura de aço composta por montantes verticais com perfis C90 (90 mm de largura) e canais horizontais com perfis U93 (93 mm de largura), ambos com 0,6 mm de espessura. A caixa-de-ar interior é totalmente preenchida por lã mineral com 90 mm de espessura. As camadas de revestimento são compostas por duas placas de gesso cartonado (12,5 mm cada) em ambos os lados da estrutura, como ilustrado na Fig. 1. A largura total da parede de referência é de 140 mm.

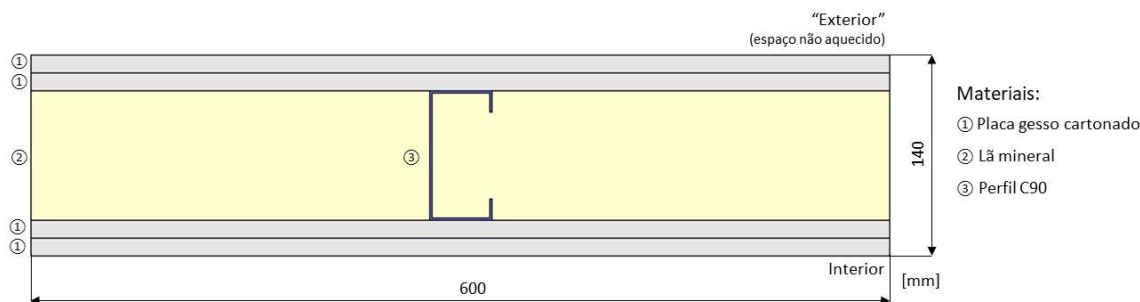


Fig. 1: Seção transversal da parede interior de referência em LSF modelada no software THERM.

A distância entre os perfis verticais da estrutura da parede de referência é de 600 mm. A composição e características de cada camada desta parede estão descritas na Tabela 1.

Mesmo sendo uma parede divisória em LSF, a mesma pode estar a separar um espaço condicionado de um espaço não aquecido (uma garagem, por exemplo) que possui uma temperatura mais baixa. Por esse motivo, a parede de referência, apesar de ser interior, também possui requisitos térmicos. Na Tabela 1 são caracterizados os materiais, as espessuras e a condutibilidade térmica de cada camada que compõe a parede interior de referência. Os elementos de fixação dos painéis na estrutura metálica (geralmente parafusos auto-perfurantes de aço) não foram considerados nas simulações numéricas, pois estas pontes térmicas pontuais possuem um valor muito reduzido e pouco afetam o valor de U global da parede [10].

Tabela 1: Características de cada camada da parede de referência: material, espessura da camada (d) e condutibilidade térmica (λ)

Camada	Material (de fora para dentro)	d [mm]	λ [W/(m·°C)]	Referências
1	PGC ¹ (2 × 12.5 mm)	25	0,175	[12]
2	Lã mineral	90	0,035	[13]
3	Perfil vertical (C90 × 43 × 15 × 0,6 mm)	90	50,000	[14]
4	PGC (2 × 12.5 mm)	25	0,175	[12]
Espessura total		140	---	

¹ PGC – Placa de Gesso Cartonado

3. Parâmetros avaliados

Os parâmetros escolhidos para serem avaliados nesta análise de sensibilidade estão discriminados na Tabela 2, bem como os valores usados em cada variação para esses parâmetros. Cada parâmetro foi identificado com um modelo (“I” de Interior) e os seus valores de variação foram codificados com a letra “V” (de Valor) e o seu número correspondente. A Fig. 2 ilustra as variações entre os modelos testados.

Tabela 2: Modelos e parâmetros avaliados

Modelo	Parâmetro	Valor de Referência	Valor 1	Valor 2	Valor 3
I ₁	Espessura dos perfis em aço [mm]	0,6	1,0	1,2	1,5
I ₂	Distância entre montantes [mm]	600	300	400	800
I ₃	Espessura da tira de CT ¹ em aerogel [mm]	---	2,5	5,0	10,0
I ₄	Material da tira CT com 10 mm	---	MS-R1 ²	XPS ³	CBS ⁴
I ₅	Painéis de revestimento				
	Espessura do PGC ⁵ [mm]	2x12,5	12,5	---	12,5
	Espessura do OSB ⁶ [mm]	---	12,0	2x12,0	---
	Espessura do XPS [mm]	---	---	---	12,0

¹CT – Corte Térmico; ²MS-R1 – Acousticork (borracha reciclada) [15]; ³XPS – Poliestireno Extrudido; ⁴CBS – Cold Break Strip (tira de corte térmico em aerogel) [16]; ⁵PGC – Placa de Gesso Cartonado; ⁶OSB – “Oriented Strand Board”.

O primeiro parâmetro avaliado foi a espessura dos perfis de aço (Modelo I₁), sendo o valor para a parede de referência 0,6 mm, uma espessura usual para paredes divisórias sem função estrutural. Também foram simulados modelos com perfis de espessura superior: 1,0, 1,2 e 1,5 mm.

A distância entre os montantes foi o parâmetro avaliado no Modelo I₂. Na parede de referência a distância entre montantes de 600 mm, que é a largura mais usual na construção em LSF, visto que os painéis de revestimentos possuem usualmente 1200 mm de largura. Também foram avaliados o desempenho de modelos com as distâncias entre perfis verticais de: 300, 400 e 800 mm.

O corte térmico é obtido pela inserção de um material com baixa condutibilidade térmica, entre os perfis de aço e a camada interior (painel que toca o perfil metálico), minimizando a ação da ponte térmica e diminuindo a quantidade de calor que atravessa a parede por essa região. Por consequência, o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) da parede reduz,

melhorando sua performance térmica. No Modelo I₃, três espessuras diferentes de tiras de corte térmico (CT) feitas em aerogel foram avaliadas, foram elas: 2,5, 5,0 e 10,0 mm.

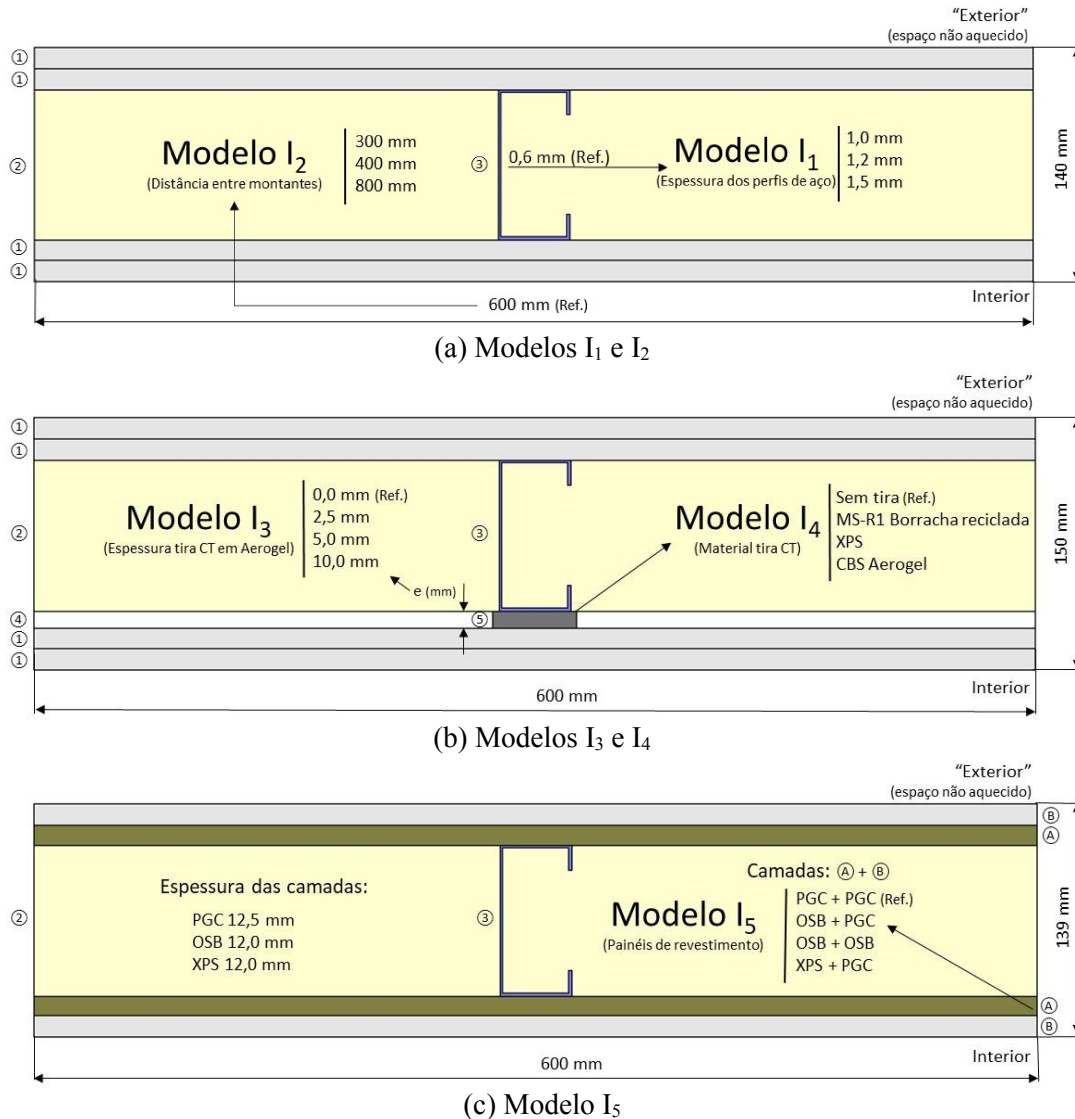


Fig. 2: Seção transversal da parede em LSF: modelos estudados e valores dos parâmetros avaliados. Camadas: ① Placa de gesso cartonado; ② Lã mineral; ③ Perfil Vertical C90; ④ Ar; ⑤ Fita de CT

Atualmente, existem no mercado vários materiais que podem utilizados como tiras de corte térmico (CT) em estruturas de paredes em LSF, tais como borracha reciclada (solução “amiga do ambiente”), poliestireno extrudado (solução mais económica) e o aerogel (material de isolamento de última geração com uma condutibilidade térmica muito reduzida). Esses materiais serão avaliados como tiras de CT com 10 mm de espessura no Modelo I₄ e suas características térmicas estão listados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores da condutibilidade térmica (λ) dos materiais usados no modelo I₄

Material	λ [W/(m.K)]	Referência
Borracha reciclada (Acousticork MS-R1)	0,122	[17]
Poliestireno extrudido - XPS	0,037	[14]
Aerogel (CBS – Spacetherm)	0,015	[16]

Para verificar a influência dos materiais dos painéis de revestimento (Modelo I₅), várias configurações foram modeladas para as paredes internas, tal como indicado na Tabela 2 e ilustrado na Fig. 2(c). A parede de referência em LSF é composta por dois painéis de gesso cartonado em cada lado da estrutura de aço, tal como mostrado na Fig. 2(a). Na primeira variação do parâmetro, as placas de gesso cartonado internas foram substituídas por painéis de OSB em ambos os lados da estrutura metálica. Na segunda variação do parâmetro, as duas placas de gesso foram substituídas por dois painéis OSB em ambos os lados. Na terceira variação, à semelhança da primeira, as placas de gesso internas foram substituídas por painéis de XPS em ambos os lados da estrutura metálica.

4. Simulações numéricas

Para este trabalho, foram realizadas simulações numéricas em duas dimensões (2D) utilizando o software de elementos finitos THERM, versão 7.6.1 [18].

4.1 Condições de fronteira

Para realizar as simulações numéricas, foram definidas inicialmente as condições de fronteira das paredes divisórias em LSF. A temperatura ambiente interior foi fixada em 20°C (uma temperatura aceitável para o conforto interior durante o inverno). Como temperatura ambiente exterior, por se tratarem de paredes divisórias, que podem efetuar a separação com espaços não aquecidos, foi adotada a temperatura de 10°C, valor intermédio entre a temperatura exterior e a temperatura de conforto adotada.

Em relação às resistências térmicas superficiais foram utilizados os valores tabelados na ISO 6946 [8] para um fluxo de calor horizontal (paredes). Os valores utilizados para as resistências térmicas superficiais internas (R_{si}) e externas (R_{se}) foram iguais a 0,13 m²·K/W (valor tabelado para R_{si}), por estarem ambas expostas a ambientes interiores.

4.2 Modelação dos espaços de ar não ventilados

Os espaços de ar dentro das paredes foram modelados usando um sólido-equivalente com uma condutibilidade térmica equivalente à resistência térmica da caixa-de-ar. Os valores da resistência térmica para os espaços de ar não ventilados foram obtidos na ISO 6946 [8]. Dividindo o valor da espessura da caixa-de-ar pelo valor tabelado da resistência térmica da mesma, é possível obter um valor de condutibilidade térmica equivalente. Este valor será atribuído ao sólido que ocupará o espaço da camada de ar na parede. A Tabela 4 mostra os valores obtidos e utilizados nas simulações numéricas.

Tabela 4: Valores da resistência térmica e condutibilidade térmica equivalente modelados nas caixas-de-ar

d_{ar} [mm]	R_{ar} [m ² ·K/W]	λ_{eq} [W/(m.K)]
2,5	0,055	0,045
5,0	0,110	0,045
10,0	0,150	0,067
90,0	0,180	0,500

d_{ar} – Espessura da caixa-de-ar; R_{ar} – Resistência térmica da caixa-de-ar (ISO 6946); λ_{eq} - Condutibilidade térmica do sólido equivalente.

4.3 Verificação do modelo numérico

Para verificar a precisão do modelo numérico 2D (software THERM) foram realizados os dois testes propostos na norma ISO 10211 [19], sendo os resultados obtidos exatamente iguais aos indicados na referida norma, confirmando o rigor do algoritmo e respetivos modelos.

Outra forma de verificar a precisão do modelo numérico é comparar os resultados obtidos pela simulação numérica de um modelo de parede simplificada, ou seja, composta apenas por camadas homogêneas (sem a estrutura em aço), com os resultados obtidos através do método de cálculo analítico, disponível na ISO 6946 [8]. Através das propriedades dos materiais apresentadas na Tabela 1 e das resistências térmicas superficiais usadas na simulação numérica, foi possível chegar a valores exatamente iguais de transmissão térmica, como mostrado na Tabela 5, confirmando a boa precisão do modelo implementado numericamente.

Tabela 5: Valores de U calculados pelo método analítico e pelo modelo numérico 2D

	Método analítico	Modelo 2D
Parede de referência em LSF sem estrutura em aço	0,321 W/(m ² .K)	0,321 W/(m ² .K)

5. Resultados e discussão

Os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) obtidos nas simulações numéricas para a divisória interna em LSF, bem como os parâmetros simulados estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de transmissão térmica (U) obtidos nas simulações numéricas 2D

Modelo	Parâmetro Avaliado	Valor de Referência	Valor 1	Valor 2	Valor 3
I₁	Espessura dos perfis em aço [mm]	0,6	1,0	1,2	1,5
	U [W/(m ² .K)]	0,449	0,474	0,482	0,491
	Diferença absoluta	-	+0,025	+0,033	+0,042
	Diferença Percentual	-	+5,6%	+7,3%	+9,4%
I₂	Distância entre montantes [mm]	600	300	400	800
	U [W/(m ² .K)]	0,449	0,580	0,515	0,420
	Diferença absoluta	-	+0,131	+0,066	-0,029
	Diferença Percentual	-	+29,2%	+14,7%	-6,5%
I₃	Espessura da tira de CT¹ Aero-gel [mm]	0,0	2,5	5,0	10,0
	U [W/(m ² .K)]	0,449	0,415	0,392	0,374
	Diferença absoluta	-	-0,034	-0,057	-0,075
	Diferença Percentual	-	-7,6%	-12,7%	-16,7%
I₄	Material da tira de CT com 10 mm	-	MS-R1²	XPS³	CBS⁴
	U [W/(m ² .K)]	0,449	0,421	0,396	0,374
	Diferença absoluta	-	-0,028	-0,053	-0,075
	Diferença Percentual	-	-6,2%	-11,8%	-16,7%
I₅	Painéis de revestimento				
	Espessura do PGC ⁵ [mm]	2 × 12,5	12,5	-	12,5
	Espessura do OSB ⁶ [mm]	-	12,0	2 × 12,0	-
	Espessura do XPS ³ [mm]	-	-	-	12,0
	U [W/(m ² .K)]	0,449	0,419	0,397	0,338
	Diferença absoluta	-	-0,030	-0,052	-0,111
Diferença Percentual	-	-6,7%	-11,6%	-24,7%	

¹CT – Corte Térmico; ²MS-R1 – Acousticork (borracha reciclada), ³XPS – Poliestireno Extrudido; ⁴CBS – Cold Break Strip (tira de corte térmico em aerogel); ⁵PGC – Placa de Gesso Cartonado; ⁶OSB – “Oriented Strand Board”.

Ao comparar o valor de U obtido para a parede divisória de referência sem a estrutura de aço ($0,321 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) e o valor calculado para a parede interior de referência, $0,449 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ é possível concluir que a estrutura metálica presente no interior das paredes em LSF é responsável por um aumento no valor de transmissão térmica da parede em cerca de 40% ($+0,128 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$). Esse grande aumento no valor de U deve-se à elevada condutibilidade térmica do aço – mesmo numa estrutura com espessura do aço de apenas $0,6 \text{ mm}$ – e também por ter isolamento térmico interno não contínuo (interrompido pelos perfis verticais).

O primeiro parâmetro avaliado foi a espessura da estrutura de aço (Modelo I_1) e, como esperado, ao aumentar a quantidade de aço, devido ao aumento da espessura da estrutura, houve um aumento no valor de U , chegando ao máximo de $+9,4\%$ para a estrutura de $1,5 \text{ mm}$ de espessura. O segundo parâmetro avaliado (Modelo I_2) refere-se à influência da distância entre montantes. O modelo de referência possui um afastamento de 600 mm e quando foi diminuído para 300 e 400 mm , ocorreu um aumento de $29,2\%$ e $14,7\%$ no valor do U da parede, respectivamente. Este aumento era esperado, pois houve um incremento da quantidade de aço por unidade de área na parede em LSF. Por outro lado, o aumento da distância de 600 para 800 mm ocasionou uma redução no valor do U da parede em cerca de $6,5\%$.

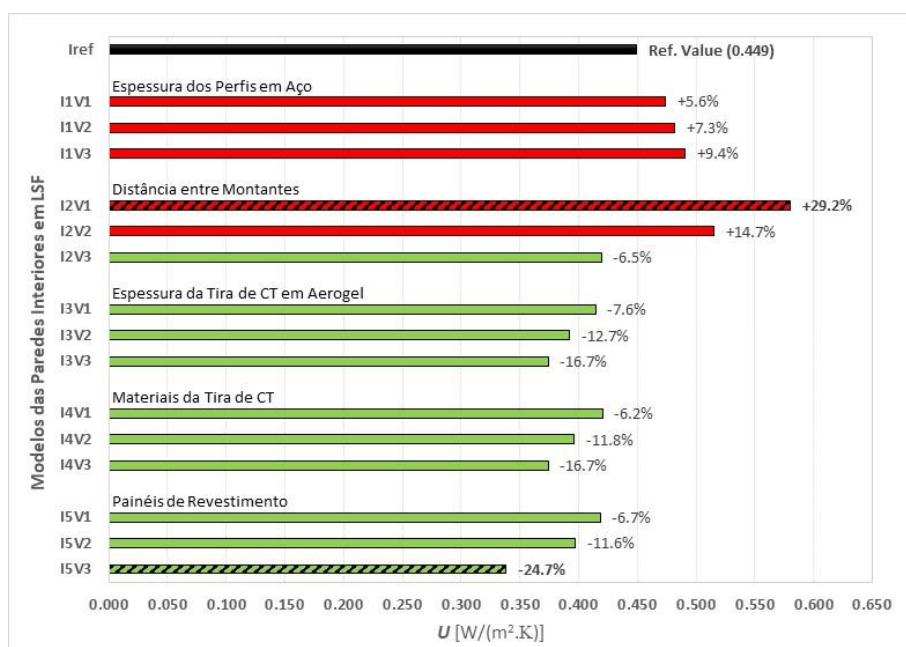


Fig. 3: Variações no valor de U dos diversos modelos avaliados.

O Modelo I_3 avaliou a eficiência do uso de uma tira de corte térmico (CT) de aerogel na estrutura de aço da parede. Como esperado, o aumento do isolamento térmico desta estrutura diminuiu os efeitos das pontes térmicas, ocasionando uma redução no valor de U da parede em $7,6\%$, $12,7\%$ e $16,7\%$ quando utilizadas tiras com espessuras de $2,5$, $5,0$ e $10,0 \text{ mm}$, respectivamente.

Continuando com a utilização de tiras de corte térmico, no Modelo I_4 foi estudada a eficiência do material utilizado nas tiras de 10 mm de espessura. Os materiais estudados foram: borracha reciclada (MS-R1), poliestireno extrudado (XPS) e aerogel (CBS). A tira de borracha reciclada proporcionou uma redução de $6,2\%$ no valor de U quando comparado com o modelo de referência (sem tira CT). Com a utilização da tira de XPS o valor de U da parede diminuiu $11,8\%$ e com a tira de aerogel a transmissão térmica da parede reduziu $16,7\%$. O aerogel é o

material que possui um valor muito baixo de condutibilidade térmica (Tabela 3) e por isso resultou nos melhores resultados para o isolamento. No entanto, ainda é um material bastante dispendioso em comparação com os outros dois estudados: borracha reciclada e XPS.

As três variações de configuração de painéis e revestimento propostas no Modelo I₅ mostraram resultados melhores que a configuração da parede de referência, pois a placa de gesso cartonado possui o maior valor de condutibilidade térmica entre os três materiais usados, ocasionando um maior valor de transmissão térmica global para a parede, como se pode observar nos resultados apresentados na Tabela 6. A redução no valor de U da parede variou desde 6,7% para a composição PGC+OSB até 24,7% para a composição de painéis PGC+XPS. A maior redução obtida com o XPS já era esperada, dada a baixa condutibilidade térmica do mesmo (0,037 W/(m.K)) em comparação com os outros materiais utilizados.

Observando os valores extremos obtidos e destacados na Tabela 6 (sombreados) e Fig. 3 (tracejado diagonal), o maior aumento no valor de U da parede (+29,2%) foi alcançado no Modelo I2V1, que corresponde a uma distância entre perfis verticais de 300 mm. A maior diminuição do valor de U (-24,7%) foi alcançado no modelo I5V3, que corresponde a composição de painéis de revestimento (PGC +XPS). Esses valores comprovam a grande relevância da quantidade de aço existente na estrutura da parede em LSF (Modelo I₂), bem como a importância da presença de uma camada de isolamento térmico contínua (Modelo I5V3), mesmo sendo de pequena espessura (12,0 mm em cada lado). Além do mais, a camada de revestimento em XPS também possui a vantagem de ser uma solução mais económica quando comparada com outros materiais (*e.g.*, aerogel).

A Fig. 4 exhibe a distribuição da temperatura e do fluxo de calor para os modelos que apresentaram maior incremento (Modelo I2V1) e o maior decréscimo (Modelo I5V3) no valor do U da parede em LSF.

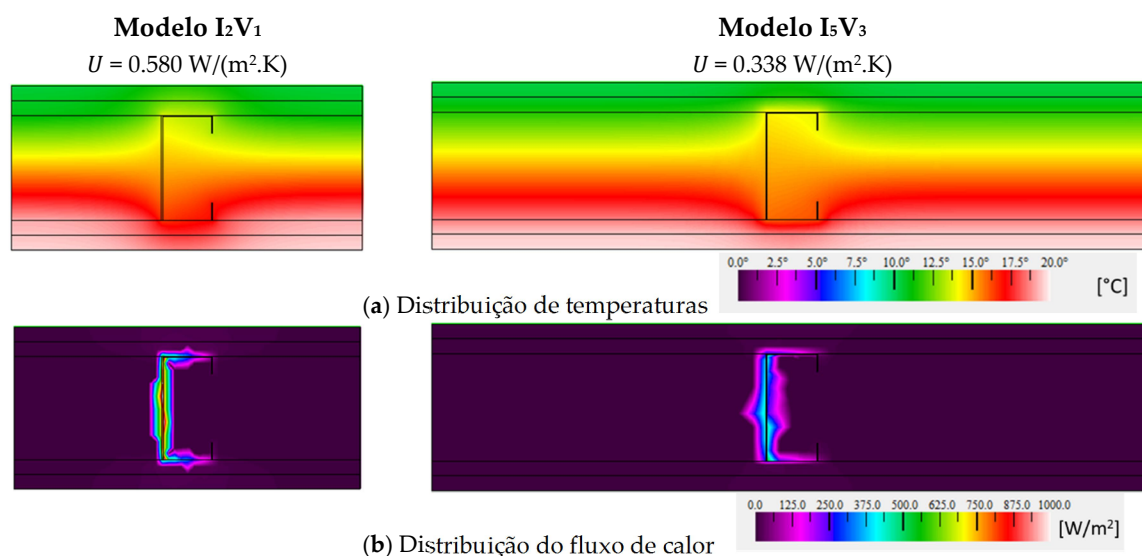


Fig. 4: Representação gráfica dos resultados dos modelos com maior aumento (distância entre perfis de 300 mm) e com maior diminuição (painéis de revestimento XPS+PGC) no valor de U da parede.

A distribuição de temperaturas em ambas as secções transversais das paredes em LSF é bastante semelhante (Fig. 4(a)), e a influência dos perfis de aço na distribuição de temperatura é visível, dada a alta condutibilidade térmica do aço e, conseqüentemente, o efeito da ponte térmica causada pela sua presença. Ao analisar as imagens do fluxo de calor (Fig. 4(b)), a forte concentração do fluxo de calor ao redor do perfil de aço é clara. Adicionalmente, existem valores superiores de fluxo de calor para o Modelo I2V1 em comparação com o Modelo I5V3, denotando uma maior quantidade de calor na estrutura de aço.

6. Conclusões

Nesse trabalho, foi realizada uma análise de sensibilidade referente aos valores de transmissão térmica (U) de paredes interiores em LSF, com configurações de paredes normalmente utilizadas como divisórias interiores em edifícios. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando modelações 2D baseadas no método de elementos finitos. Foram analisados os seguintes parâmetros: (1) espessura dos perfis em aço; (2) distância entre montantes; (3) espessura da tira de corte térmico (CT) em aerogel; (4) material das tiras de CT; e (5) materiais dos painéis de revestimento. Os resultados deste estudo paramétrico foram comparados com o valor do coeficiente de transmissão térmica da parede interior de referência, $U = 0,449 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

A parede divisória em LSF estudada apresenta isolamento descontínuo no interior, potencializando os efeitos das pontes térmicas causadas pela estrutura em aço. O incremento da espessura dos perfis da estrutura metálica aumentou a transmissão térmica da parede até +9,4% (1,5 mm de espessura). O uso das tiras de CT reduziu o valor de U da parede até aproximadamente 16,7% (tira de aerogel com 10 mm espessura). O uso de tiras de CT com 10 mm em diferentes materiais também foi avaliado, apresentando as seguintes reduções no valor de U : -6,2% para a borracha reciclada, -11,8% para o XPS e -16,7% na tira de aerogel.

A maior redução no valor de U da parede foi alcançada com a alteração nos painéis de revestimento em ambos os lados da parede. Utilizando uma configuração de um painel de XPS (12 mm) e uma placa de gesso cartonado (12,5 mm) foi possível alcançar uma diminuição de 24,7%. O baixo valor de condutibilidade térmica do XPS permitiu que este funcionasse como isolamento contínuo na parede de LSF, isolando a estrutura de aço e reduzindo os efeitos das suas pontes térmicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do FEDER através do COMPETE 2020 - POCI e de fundos nacionais através da FCT, no âmbito do projeto POCI-01-0145- FEDER-032061.

Cofinanciado por: POCI-01-0145-FEDER-032061



A apoio prestado pelas seguintes empresas: Pertecno, Gyptec Ibérica, Volcalis, Sotinco, Kronospan, Hukseflux e Hilti, é também agradecido pelos autores.

Referências

- [1] European Union, “Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency,” *Official Journal of the European Union*, vol. 2018, no. May. pp. 75–91, 2018.
- [2] A. Aslani, A. Bakhtiar, and M. H. Akbarzadeh, “Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, no. September 2018, pp. 55–63, 2019.

- [3] R. Ruparathna, K. Hewage, and R. Sadiq, “Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1032–1045, 2016.
- [4] A. Paone and J. P. Bacher, “The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art,” *Energies*, vol. 11, no. 4, 2018.
- [5] 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.
- [6] IEA - International Energy Agency, *World Energy Outlook 2016*, Paris: OECD/IEA, 2016.
- [7] P. Santos, “Chapter 3 - Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings,” in *Energy Efficient Buildings*, ENG_HWA_YAP, Ed. Croatia: InTech, 2017, pp. 35–60.
- [8] ISO 6946, “Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods.” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [9] O. Kaynakli, “A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 415–425, 2012.
- [10] E. Roque and P. Santos, “The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position,” *Buildings*, vol. 7(1), no. 13, pp. 1–18, 2017.
- [11] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L. Simões da Silva, and J. J. Costa, “Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behaviour of walls, windows, and construction elements with innovative materials: a review,” *Energy Build.*, vol. 182, pp. 88–110, 2019.
- [12] Gyptec Ibérica, “Technical sheet: Standard gypsum plasterboard (in Portuguese),” 2019. [Online]. Available: https://www.gyptec.eu/documentos/Ficha_Tecnica_Gyptec_A.pdf. [Accessed: 14-Mar-2019].
- [13] Volcalis, “Technical sheet: Alpha mineral wool (in Portuguese),” 2019. [Online]. Available: https://www.volcalis.pt/categoria_file_docs/fichatecnica_volcalis_alpharolo-253.pdf. [Accessed: 14-Mar-2019].
- [14] C. Santos and L. Matias, *ITE50 - Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios (in Portuguese)*. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [15] MS-R1, “Acousticork MS-R1 Recycled rubber,” 2017. [Online]. Available: <https://amorimcorkcomposites.com/media/1334/acousticork-book-en.pdf>. [Accessed: 14-Mar-2019].
- [16] Spacetherm, “Technical sheet: Cold bridge strip,” 2018. [Online]. Available: https://www.proctorgroup.com/assets/Datasheets/Spacetherm_CBS_Datasheet.pdf. [Accessed: 14-Mar-2019].
- [17] ITeCons, “Test report HIG 363/12 - Determination of Thermal Resistance.” Instituto de Investigação e Desenvolvimento em Ciências da Construção, 2012.
- [18] Lawrence Berkeley National Laboratory, “THERM Finite Element Simulator.” 2017.
- [19] ISO 10211, “Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations.” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.