



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Desempenho Térmico de Paredes com Estrutura Leve em Aço Enformado a Frio**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Construção Metálica e Mista

Autor

**Cláudio Miguel de Oliveira Martins**

Orientador

**Prof. Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos  
(DEC-FCTUC)**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Junho, 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o valioso contributo de um grupo de pessoas a quem quero exprimir os mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos, pela disponibilidade, dedicação, incentivo e empenho com que orientou este trabalho.

À minha esposa e família pela paciência e compreensão pelos longos momentos de ausência que tive nos últimos meses.

Uma palavra de apreço aos meus colegas, que tornaram mais fáceis alguns momentos difíceis, característicos do trabalho de investigação.

## RESUMO

A utilização de estruturas leves em aço enformado a frio (LSF, do inglês *Lightweight Steel Framing*) ganhou popularidade nas últimas décadas e começam a ser muito utilizadas no setor da construção civil. Este sistema estrutural apresenta várias vantagens, tais como um grande potencial de reciclagem e reutilização, permitindo a conservação de recursos naturais e do meio ambiente. Quando comparado com outros materiais, possui vantagens adicionais, tais como: peso reduzido com elevada resistência mecânica; maior facilidade de pré-fabricação, permitindo elementos modulares e maior controlo de qualidade; prazos de execução mais curtos para a montagem do edifício no local; ausência de variações dimensionais causadas pela humidade e baixo custo.

O adequado desempenho térmico da envolvente de um edifício é fundamental para proporcionar um bom comportamento térmico e para se obter uma boa eficiência energética, permitindo uma redução da sua energia operacional. Uma possível desvantagem do sistema construtivo em LSF é a elevada condutibilidade térmica do aço que poderá originar pontes térmicas, que podem ser penalizadoras se o elemento construtivo não for bem projetado e executado, existindo diversas estratégias para minimizar as pontes térmicas.

Nesta dissertação, será analisado o desempenho térmico de paredes em LSF, com particular foco, na mitigação dos efeitos das pontes térmicas originadas pela sua estrutura metálica e medidas de melhoramento do comportamento térmico. Para o efeito irão ser abordados os seguintes pontos: (1) revisão do estado da arte; (2) estudo analítico; (3) estudo experimental; (4) estudo numérico; (5) estudos paramétricos.

Nesta dissertação são avaliadas várias estratégias de mitigação de pontes térmicas em paredes em LSF, demonstrando-se que é possível aumentar o seu desempenho térmico, reduzindo o consumo de energia dos edifícios onde as mesmas forem utilizadas. Realiza-se também uma otimização das camadas de isolamento destas paredes (e.g. fazendo uso de novos materiais de isolamento: aerogel e painéis de vácuo), que combinados com as anteriores estratégias de mitigação irão permitir uma significativa diminuição do coeficiente de transmissão térmica.

## **ABSTRACT**

In recent years, the use of Lightweight Steel Framing (LSF) structures have emerged and as began to be widely used in the construction sector. This structural system present many advantages, such as a great potential for recycling and reuse, enabling the conservation of natural resources and environment. When compared with other materials, it has additional advantages such as: reduced weight with exceptional resistance in relation to its mass; easy prefabrication, allowing modular elements and greater quality control; shorter periods for assembling the building onsite; no dimensional changes caused by moisture and low cost.

A proper thermal performance of building envelope is crucial to provide a good thermal behaviour and to obtain good energy efficiency, allowing a reduction in operating energy. A possible drawback of the LSF construction system is the high thermal conductivity of steel that may lead to thermal bridges, which can be penalizing if the building elements are not properly designed and assembled, however, there are various strategies to minimize thermal bridges.

In this dissertation, the thermal performance of LSF walls is analysed, with particular focus on the mitigating effects of thermal bridges arising from their steel structure and improvement measures of the thermal behaviour. To this end are addressed the following points: (1) review the state of the art; (2) analytical study; (3) experimental study; (4) numerical study; (5) parametric studies.

This dissertation evaluates several mitigation strategies to improve thermal bridges in LSF walls, showing that it is possible to increase their thermal performance, reducing the energy consumption of buildings where they are use. It is also performed an optimization the insulation layers of these wall (e.g. making use of new insulation materials: aerogel and vacuum insulation panels), which combined with mitigation approaches will enable a significant reduction in heat transfer coefficient.

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Organização do documento.....	3
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Métodos analíticos.....	4
2.2 Métodos experimentais .....	8
2.3 Métodos numéricos .....	9
2.4 Mitigação de pontes térmicas e melhoria do desempenho térmico.....	10
3 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....	13
3.1 Estrutura de aço.....	13
3.2 Composição do módulo de parede .....	14
4 ANÁLISE DA PAREDE.....	16
4.1 Estudo analítico .....	16
4.2 Estudo experimental.....	18
4.2.1 Instalações de ensaio.....	19
4.2.2 Equipamentos.....	21
4.2.3 Termografia por radiação infravermelha.....	24
4.2.4 Ensaio realizados .....	25
4.2.5 Procedimentos de cálculo.....	26
4.2.6 Resultados obtidos.....	28
4.3 Estudo numérico.....	29
4.3.1 Condições de fronteira .....	30
4.3.2 Modelação dos espaços de ar .....	30
4.3.3 Simulação numérica 2D .....	31
4.3.3.1 Validação da utilização do <i>software</i> .....	31
4.3.3.2 Modelos 2D .....	33
4.3.4 Simulação numérica 3D .....	35
4.3.4.1 Validação da utilização do <i>software</i> .....	35
4.3.4.2 Modelos 3D .....	38
4.3.4.3 Comparativo da modelação dos espaços de ar.....	42
4.4 Validação e discussão de resultados.....	44
5 ESTUDOS PARAMÉTRICOS .....	47
5.1 Importância das perdas térmicas pela envolvente da parede.....	47

---

5.1.1	Envolvente sem perdas térmicas .....	48
5.1.2	Envolvente com perdas térmicas .....	50
5.1.2.1	Valor de U: fluxo de calor na superfície exterior .....	50
5.1.2.2	Valor de U: fluxo de calor na superfície interior .....	52
5.2	Mitigação de pontes térmicas .....	53
5.2.1	Estratégias isoladas de mitigação de pontes térmicas .....	53
5.2.1.1	Corte térmico com tiras de borracha .....	54
5.2.1.2	Perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea .....	55
5.2.1.3	Perfis metálicos verticais perfurados .....	56
5.2.1.4	Todos os perfis metálicos perfurados .....	57
5.2.1.5	Parafusos de fixação em substituição do encaixe horizontal em aço .....	58
5.2.2	Estratégias combinadas para mitigação das pontes térmicas .....	59
5.2.2.1	Combinação de: tiras de borracha, perfis de aço verticais perfurados e ligações aparafusadas .....	59
5.2.2.2	Combinação de: tiras de borracha, todos os perfis de aço perfurados e conexões aparafusadas .....	60
5.2.3	Resultados: visão geral e discussão .....	60
5.3	Medidas de melhoria do desempenho térmico .....	62
5.3.1	Estratégias isoladas de melhoria .....	62
5.3.1.1	Espuma de poliuretano .....	62
5.3.1.2	Manta isolante de aerogel de sílica .....	64
5.3.1.3	Painéis de isolamento a vácuo .....	65
5.3.2	Estratégias de melhoria combinadas .....	67
5.3.3	Resultados: visão geral e discussão .....	71
6	CONCLUSÕES .....	74
6.1	Importância das perdas térmicas pela envolvente da parede .....	74
6.2	Mitigação de pontes térmicas .....	75
6.3	Medidas de melhoria do desempenho térmico .....	75
6.4	Trabalhos futuros .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
	ANEXOS .....	81
Anexo A	Ficha do ensaio experimental E1 .....	A-1
Anexo B	Ficha do ensaio experimental E2 .....	B-1
Anexo C	Ficha do ensaio experimental E3 .....	C-1
Anexo D	Ficha do ensaio experimental E4 .....	D-1
Anexo E	Ficha do ensaio experimental E5 .....	E-1
Anexo F	Ficha do ensaio experimental E6 .....	F-1
Anexo G	Ficha do ensaio experimental E9 .....	G-1
Anexo H	Ficha do ensaio experimental E10 .....	H-1

---

---

Anexo I	Ficha do ensaio experimental E11 .....	I-1
Anexo J	Ficha do ensaio experimental E12 .....	J-1
Anexo K	Ficha do ensaio experimental E13 .....	K-1
Anexo L	Ficha do ensaio experimental E14 .....	L-1
Anexo M	Ficha do ensaio experimental E15 .....	M-1
Anexo N	Ficha do ensaio experimental E16 .....	N-1
Anexo O	Cálculos experimentais intermédios dos valores de U .....	O-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Método da zona ASHRAE (ASHRAE, 1993). .....	5
Figura 2.2 – Método da zona modificada (ASHRAE, 1993). .....	6
Figura 2.3 – Fator de zona ( $z_f$ ) do método da zona modificada (ASHRAE, 1993). .....	7
Figura 2.4 – Mitigação de pontes térmicas em perfis de aço enformados a frio. ....	11
Figura 2.5 – Mitigação de pontes térmicas em perfis de aço enformados a frio. ....	12
Figura 3.1 – Esquema da estrutura de aço do módulo de parede LSF. ....	13
Figura 3.2 – Estrutura de aço 3D do módulo de parede LSF. ....	14
Figura 3.3 – Composição do módulo de parede (Modelo A). ....	15
Figura 4.1 – Parede sem perfis de aço. ....	16
Figura 4.2 – Câmara de ensaios e pórtico móvel. ....	19
Figura 4.3 – Estrutura de aço dos módulos de parede e pórtico da câmara de ensaios. ....	20
Figura 4.4 – Fotografias da montagem do módulo de parede. ....	20
Figura 4.5 – Aplicação do ETICS na face exterior da parede no pórtico de ensaio. ....	21
Figura 4.6 – Fluxímetros do tipo Hukseflux HFP01. ....	22
Figura 4.7 – Sensores de temperatura utilizados nas medições. ....	22
Figura 4.8 – Equipamento para comunicação e registo dos dados recolhidos. ....	22
Figura 4.9 – <i>Software</i> PC200W versão 4.1. ....	23
Figura 4.10 – Localização dos sensores. ....	23
Figura 4.11 – Esquema de localização dos sensores de temperatura num plano de corte horizontal da parede. ....	24
Figura 4.12 – Termografia por radiação infravermelha. ....	24
Figura 4.13 – Exemplo dos dados registados para a parede com ETICS. ....	25
Figura 4.14 – Caso de teste n.º 1 realizado no THERM. ....	32
Figura 4.15 – Caso de teste n.º 2 realizado no THERM. ....	33
Figura 4.16 – Distribuição de temperaturas na secção horizontal da parede. ....	34
Figura 4.17 – Malha de elementos finitos da parede LSF. ....	35
Figura 4.18 – Caso de teste n.º 1 realizado no Ansys. ....	36
Figura 4.19 – Caso de teste n.º 2 realizado no Ansys. ....	36
Figura 4.20 – Caso de teste n.º 3 realizado no Ansys. ....	37
Figura 4.21 – Caso de teste n.º 4 realizado no Ansys. ....	38
Figura 4.22 – Fluxo de calor e temperatura superficial na superfície exterior, da parede com estrutura de aço vertical. ....	39
Figura 4.23 – Detalhe do modelo 3D da parede com os elementos de suporte e fixação. ....	40

---

Figura 4.24 – Fluxo de calor e temperatura superficial na face exterior, da parede com os elementos de suporte e fixação.....	41
Figura 4.25 – Fluxo de calor e temperatura superficial na face interior, da parede com os elementos de suporte e fixação.....	42
Figura 4.26 – Fluxo de calor na face interior da parede com envolvente adiabática e vetores velocidade do ar.....	43
Figura 4.27 – Distribuição de temperaturas no interior do módulo de secção transversal horizontal da parede com ETICS: apenas perfis de aço verticais. ....	45
Figura 4.28 – Temperaturas da superfície exterior, previstos pelo modelo FEM 3D: parede sem ETICS. ....	46
Figura 5.1 – Fluxo de calor e temperaturas superficiais: Modelo A - envolvente adiabática. ....	49
Figura 5.2 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	50
Figura 5.3 – Fluxo de calor: vista da superfície interior.....	52
Figura 5.4 – Modelo H: com tiras de borracha.....	54
Figura 5.5 – Fluxo de calor no Modelo A e H: vista da superfície exterior. ....	55
Figura 5.6 – Modelo I: Perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea. ....	55
Figura 5.7 – Fluxo de calor no Modelo A e I: vista da superfície exterior.....	56
Figura 5.8 – Modelo J: perfis verticais perfurados.....	57
Figura 5.9 – Modelo J <sub>3</sub> : todos os perfis de aço estrutural perfurados (exceto conexões horizontais).....	58
Figura 5.10 – Modelo K: 9 parafusos em substituição dos encaixes horizontais de aço.....	58
Figura 5.11 – Modelo L: tiras de borracha com 10 mm, perfis verticais de aço perfurados e 9 parafusos de fixação. ....	59
Figura 5.12 – Modelo M: tiras de borracha com 10 mm, perfis de aço perfurados e 9 parafusos de fixação.....	60
Figura 5.13 – Estudo paramétrico: Resumo dos resultados para os modelos de mitigação das pontes térmicas. ....	61
Figura 5.14 – Modelos da parede com espuma de poliuretano. ....	63
Figura 5.15 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	64
Figura 5.16 – Modelo R: com manta de isolamento de aerogel em ambos os lados.....	65
Figura 5.17 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	65
Figura 5.18 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	66
Figura 5.19 – Soluções combinadas de parede com espuma de poliuretano e perfis verticais de aço perfurados.....	67
Figura 5.20 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	68
Figura 5.21 – Soluções combinadas de parede com espuma de poliuretano e perfis de aço perfurados. ....	68
Figura 5.22 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	69

---

---

Figura 5.23 – Soluções combinadas da parede com aerogel ou painéis de vácuo e perfis de aço perfurados. ....	70
Figura 5.24 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior. ....	70
Figura 5.25 – Estudo paramétrico: Resumo dos resultados para os modelos de melhoria do desempenho térmico. ....	72
Figura A.1 – Localização do sensor do ensaio n.º E1. ....	A-1
Figura A.2 – Temperaturas do ensaio n.º E1. ....	A-1
Figura A.3 – Fluxo de calor do ensaio n.º E1. ....	A-2
Figura B.4 – Localização do sensor do ensaio n.º E2. ....	B-1
Figura B.5 – Temperaturas do ensaio n.º E2. ....	B-1
Figura B.6 – Fluxo de calor do ensaio n.º E2. ....	B-2
Figura C.7 – Localização do sensor do ensaio n.º E3. ....	C-1
Figura C.8 – Temperaturas do ensaio n.º E3. ....	C-1
Figura C.9 – Fluxo de calor do ensaio n.º E3. ....	C-2
Figura D.10 – Localização do sensor do ensaio n.º E4. ....	D-1
Figura D.11 – Temperaturas do ensaio n.º E4. ....	D-1
Figura D.12 – Fluxo de calor do ensaio n.º E4. ....	D-2
Figura E.13 – Localização do sensor do ensaio n.º E5. ....	E-1
Figura E.14 – Temperaturas do ensaio n.º E5. ....	E-1
Figura E.15 – Fluxo de calor do ensaio n.º E5. ....	E-2
Figura F.16 – Localização do sensor do ensaio n.º E6. ....	F-1
Figura F.17 – Temperaturas do ensaio n.º E6. ....	F-1
Figura F.18 – Fluxo de calor do ensaio n.º E6. ....	F-2
Figura G.19 – Localização do sensor do ensaio n.º E9. ....	G-1
Figura G.20 – Temperaturas do ensaio n.º E9. ....	G-1
Figura G.21 – Fluxo de calor do ensaio n.º E9. ....	G-2
Figura H.22 – Localização do sensor do ensaio n.º E10. ....	H-1
Figura H.23 – Temperaturas do ensaio n.º E10. ....	H-1
Figura H.24 – Fluxo de calor do ensaio n.º E10. ....	H-2
Figura I.25 – Localização do sensor do ensaio n.º E11. ....	I-1
Figura I.26 – Temperaturas do ensaio n.º E11. ....	I-1
Figura I.27 – Fluxo de calor do ensaio n.º E11. ....	I-2
Figura J.28 – Localização do sensor do ensaio n.º E12. ....	J-1
Figura J.29 – Temperaturas do ensaio n.º E12. ....	J-1
Figura J.30 – Fluxo de calor do ensaio n.º E12. ....	J-2
Figura K.31 – Localização do sensor do ensaio n.º E13. ....	K-1
Figura K.32 – Temperaturas do ensaio n.º E13. ....	K-1
Figura K.33 – Fluxo de calor do ensaio n.º E13. ....	K-2
Figura L.34 – Localização do sensor do ensaio n.º E14. ....	L-1

---

Figura L.35 – Temperaturas do ensaio n.º E14. ....	L-1
Figura L.36 – Fluxo de calor do ensaio n.º E14. ....	L-2
Figura M.37 – Localização do sensor do ensaio n.º E15.....	M-1
Figura M.38 – Temperaturas do ensaio n.º E15. ....	M-1
Figura M.39 – Fluxo de calor do ensaio n.º E15. ....	M-2
Figura N.40 – Localização do sensor do ensaio n.º E16. ....	N-1
Figura N.41 – Temperaturas do ensaio n.º E16. ....	N-1
Figura N.42 – Fluxo de calor do ensaio n.º E16.....	N-2

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Materiais da parede e propriedades (Modelo A) .....	15
Quadro 4.1 – Cálculo analítico do valor de U da parede sem aço.....	18
Quadro 4.2 – Valores globais do coeficiente de transmissão térmica dos ensaios experimentais. .....	29
Quadro 4.3 – Resultados do caso de teste n.º 2 realizado no THERM. ....	33
Quadro 4.4 – Comparação entre os valores definidos na ISO 10211 (2007) e <i>software</i> , para o caso de teste 3. ....	37
Quadro 4.5 – Comparação entre os valores definidos na ISO 10211 (2007) e <i>software</i> , para o caso de teste 4. ....	38
Quadro 4.6 – Resumo dos resultados de validação e verificação do modelo FEM 3D. ....	45
Quadro 5.1 – Estudo paramétrico da importância das perdas térmicas pela envolvente da parede: resumo dos modelos e resultados. ....	48
Quadro 5.2 – Estudo paramétrico para a mitigação das pontes térmicas: resumo dos modelos e resultados. ....	61
Quadro 5.3 – Estudo paramétrico para melhoramento do desempenho térmico: resumo dos modelos e resultados.....	71
Quadro A.1 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E1.....	A-2
Quadro B.2 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E2.....	B-2
Quadro C.3 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E3.....	C-2
Quadro D.4 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E4.....	D-2
Quadro E.5 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E5.....	E-2
Quadro F.6 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E6.....	F-2
Quadro G.7 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E9.....	G-2
Quadro H.8 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E10.....	H-2
Quadro I.9 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E11.....	I-2
Quadro J.10 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E12.....	J-2
Quadro K.11 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E13.....	K-2
Quadro L.12 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E14.....	L-2
Quadro M.13 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E15.....	M-2
Quadro N.14 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E16.....	N-2
Quadro O.15 – Cálculo do valor de U da parede com ETICS.....	O-1
Quadro O.16 – Cálculo do valor de U da parede sem ETICS.....	O-2

## SIMBOLOGIA

<b>A<sub>1</sub></b>	- Área de influência dos perfis metálicos [m <sup>2</sup> ]
<b>A<sub>2</sub></b>	- Área de influência das zonas centrais, sem perfis metálicos [m <sup>2</sup> ]
<b>CR<sub>n</sub></b>	- Taxa de convergência
<b>d</b>	- Distância entre o banzo do perfil metálico e a superfície da parede [m]
<b>e</b>	- Espessura do material [m]
<b>m</b>	- Largura do banzo do perfil metálico [m]
<b>q</b>	- Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]
<b>R</b>	- Resistência térmica [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>r</b>	- Resistividade térmica [m.K/W]
<b>R<sub>e</sub></b>	- Resistência térmica estimada [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>e1</sub></b>	- Resistência térmica estimada na zona dos perfis metálicos [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>e2</sub></b>	- Resistência térmica estimada na zona sem perfis metálicos [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>m</sub></b>	- Resistência térmica média ponderada [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>se</sub></b>	- Resistência térmica superficial exterior [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>si</sub></b>	- Resistência térmica superficial interior [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>R<sub>T</sub></b>	- Resistência térmica total [m <sup>2</sup> .K/W]
<b>T<sub>se</sub></b>	- Temperatura superficial exterior do elemento [°C]
<b>T<sub>si</sub></b>	- Temperatura superficial interior do elemento [°C]
<b>U</b>	- Coeficiente de transmissão térmica [W/(m <sup>2</sup> .K)]
<b>V(R<sub>e</sub>)</b>	- Variância dos valores de R <sub>e</sub>
<b>W</b>	- Largura da área de influência dos perfis metálicos [m]
<b>z<sub>f</sub></b>	- Fator de zona
<b>λ</b>	- Condutibilidade térmica [W/(m.K)]

## ABREVIATURAS

- 2D** - Bidimensional
- 3D** - Tridimensional
- CFD** - Dinâmica dos fluidos computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics*
- e.g.** - Por exemplo, do latim *exempli gratia*
- EPS** - Poliestireno expandido moldado
- ETICS** - Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior, do inglês *External Thermal Insulation Composite Systems*
- FEA** - Análise de elementos finitos, do inglês *Finite Element Analysis*
- FEM** - Método dos elementos finitos, do inglês *Finite element method*
- ITE50** - Informações Científicas e Técnicas, série 50
- LNEC** - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- LSF** - Estruturas leves em aço, do inglês *Light Steel Framing*
- OSB** - *Oriented strand board*
- RCCTE** - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
- REH** - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
- VIPs** - Painéis de isolamento térmico a vácuo, do inglês *Vacuum Insulation Panels*
- XPS** - Poliestireno extrudido

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

As exigências para a redução do consumo de energia nos edifícios aumentaram nas últimas décadas, como resultado de uma maior preocupação com a construção sustentável. Na conceção dos projetos de edifícios, a redução do consumo de energia e a utilização de materiais recicláveis, são fatores essenciais para a sustentabilidade ambiental. Na Europa, 40% do consumo de energia provém da utilização em edifícios (Santos et al., 2012). Os sistemas de climatização de espaços, aquecimento e arrefecimento, estão entre os principais responsáveis pelo consumo de energia, que dependem fortemente do clima e da região onde o edifício está localizado (Santos et al., 2012).

Uma maior eficiência energética dos edifícios leva a uma redução do consumo de energia, diminuindo também os custos durante a fase de utilização dos mesmos. Isto exige a melhoria dos sistemas de construção e uso de novas tecnologias. Dado o elevado potencial do sector da construção, para a mitigação das emissões de gases com efeito de estufa e os objetivos europeus estabelecidos nas diretivas sobre o desempenho energético de edifícios (*Energy Performance Building Directive*) (European Parliament, 2010), sobre edifícios com balanço energético quase nulo (“*nearly zero-energy buildings*”) para o ano de 2020, é essencial, não só aumentar a contribuição de fontes renováveis de energia, mas também melhorar a eficiência energética dos edifícios. Este último exige o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de construção.

Nos últimos anos, surgiram várias alternativas aos sistemas estruturais tradicionais de edifícios, por exemplo: estruturas leves em aço (LSF do inglês *Light Steel Framing*). A construção LSF usa como componente básica uma estrutura em perfis de aço enformados a frio. Normalmente, estes elementos de aço são prismáticos e têm secções transversais de pequena espessura. O sistema estrutural LSF apresentou um crescimento significativo nos últimos anos e é utilizado com sucesso em muitos tipos de edifícios (e.g., industrial, escritórios e edifícios residenciais). Estes sistemas apresentam muitas vantagens (Santos et al., 2012) (Santos et al., 2011) (Murtinho et al., 2010) (Santos, Gervásio, et al., 2011), tais como: a redução de peso; excepcional resistência em relação à sua massa; pré-fabricação mais fácil, com a possibilidade de criação de elementos modulares; prazos mais curtos para a montagem do edifício no local; não têm variações dimensionais provocadas pela humidade; baixo custo; e elevado potencial no que diz respeito à reciclagem e reutilização.

No entanto, as estruturas leves em aço também apresentam algumas desvantagens (Santos et al., 2012). A alta condutividade térmica do aço pode criar pontes térmicas que, se não forem tratadas corretamente durante a fase de concepção, podem penalizar significativamente o desempenho térmico e eficiência energética do edifício. As pontes térmicas podem também causar patologias construtivas, redução dos níveis de conforto e criação de condições de insalubridade associados à ocorrência de fenômenos de condensação, que são impulsionados por superfícies frias, localizadas dentro das componentes de construção. Isto é particularmente importante em edifícios onde a humidade relativa possa ser elevada, podendo diminuir a durabilidade dos materiais. Outra potencial desvantagem do sistema de construção LSF é a baixa massa térmica e conseqüente reduzida inércia térmica, levando a maiores flutuações diárias de temperatura, originando maior desconforto para os ocupantes e maior consumo de energia. Isto é particularmente relevante para climas com amplitudes térmicas diárias mais elevadas, como por exemplo os climas mediterrânicos.

Como já mencionado, as pontes térmicas podem penalizar o comportamento térmico e a eficiência energética de edifícios com estrutura em aço se não forem tratadas corretamente. Para minimizar as pontes térmicas provocadas pelos perfis de aço, existem várias estratégias, como por exemplo assegurar a continuidade do isolamento térmico. Caso contrário, o comportamento térmico e a eficiência energética do edifício podem ser seriamente afetados, devido à grande perda de calor que ocorre na sua envolvente. Esta perda de calor pode aumentar o consumo de energia para aquecimento, podendo chegar a 30%, sendo ainda maior do que a possível economia de energia, quando se utilizam coletores solares térmicos para a produção de águas quentes sanitárias (Erhorn-Klutting & Erhorn, 2009). Assim, a seleção adequada e correta posição dos materiais de isolamento térmico, dentro dos elementos de construção da envolvente do edifício, é crucial para mitigar as pontes térmicas, sendo esta situação ainda mais crítica em edifícios com estrutura em LSF. Além disso, o isolamento térmico desempenha um papel fundamental na poupança energética e no ciclo de vida do edifício (Gervásio, et al., 2010).

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste no estudo do desempenho térmico de paredes leves com estrutura em aço enformado a frio, em que se realiza a caracterização (analítica, experimental e numérica) da parede objeto de estudo, determinando o seu coeficiente de transmissão térmica. Outro objetivo é otimizar as paredes, com enfoque na minimização das pontes térmicas originadas pela estrutura metálica e melhoramento do seu desempenho térmico. Salienta-se que na atual regulamentação, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), ou em especificações técnicas (e.g. ITE50 do LNEC), não existem valores tabelados ou métodos analíticos, para cálculo do coeficiente de transmissão

térmica (U) neste tipo de estruturas, sendo assim necessário realizar ensaios experimentais e/ou modelações numéricas para obtenção do referido coeficiente, que permite caracterizar o desempenho térmico dos elementos referidos.

Neste trabalho, pretende-se também descrever os ensaios experimentais realizados com a parede modular em LSF, de modo a quantificar e avaliar o valor da transmissão térmica e perdas térmicas, pela periferia da parede. Posteriormente serão realizados modelos numéricos avançados tridimensionais (3D) pelo método dos elementos finitos (FEM, do inglês *Finite element method*), que serão validados por comparação com os ensaios experimentais. Finalmente, usando o modelo validado, serão realizados diversos estudos paramétricos, para avaliar: a importância das perdas térmicas pela envolvente periférica da parede; as estratégias de mitigação das pontes térmicas; e as medidas de melhoria do desempenho térmico.

### **1.3 Organização do documento**

Este documento está organizado em seis capítulos.

Este primeiro capítulo contém a introdução, onde se expõe: o enquadramento do tema, sua importância, exposição de objetivos e organização do documento.

No segundo capítulo realiza-se uma revisão do estado da arte, sendo descritos os métodos analíticos, experimentais, numéricos e estratégias de mitigação de pontes térmicas.

No capítulo 3 é descrito o caso de estudo, como uma descrição pormenorizada da parede estudada e seus materiais constituintes.

O quarto capítulo apresenta os estudos realizados, analítico, experimental, numérico, e seus resultados.

No quinto capítulo realizam-se estudos paramétricos: importância das perdas térmicas pela envolvente periférica; mitigação das pontes térmicas e estratégias de melhoramento do desempenho térmico.

Para finalizar, no sexto capítulo tecem-se as principais conclusões do trabalho realizado.

## 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

A correta caracterização do desempenho térmico dos elementos envolventes de um edifício é crucial para prever corretamente, na fase de projeto, o seu comportamento térmico e eficiência energética. Um dos parâmetros mais importantes é o coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ), que permite calcular a transferência térmica, existente nos elementos construtivos e saber o balanço de calor, permitindo assim estimar as necessidades energéticas para aquecimento ou arrefecimento dos espaços.

Dada a maior heterogeneidade das propriedades térmicas (e.g. condutibilidade), entre as estruturas de aço e outros materiais, a quantificação precisa da transmissão térmica em estruturas LSF é ainda mais difícil de realizar do que na construção tradicional, por exemplo em paredes de tijolo (Kosny et al., 1994). O valor de  $U$  pode ser determinado utilizando diferentes abordagens, que têm diferentes níveis de precisão/fiabilidade, incluindo os cálculos analíticos, avaliações experimentais e modelos computacionais numéricos.

### 2.1 Métodos analíticos

A ISO 6946 (2007) apresenta um método de cálculo analítico, para avaliar o coeficiente de transmissão térmica de elementos de construção. No entanto, este método apenas é aplicável para elementos de construção, com camadas termicamente homogêneas e não inclui os elementos em que as camadas isolantes são ligadas por elementos metálicos lineares.

Para superar este problema e proporcionar um método simplificado, para o cálculo do valor de  $U$  para paredes com perfis em aço enformados a frio, um dos primeiros métodos a ser desenvolvido, foi o método da zona ASHRAE (ASHRAE, 1993). O método da zona ASHRAE pode ser usado, para calcular o valor da resistência térmica ( $R$ ) de um elemento construtivo, e.g. tipo parede, quando este contém elementos de alta condutibilidade térmica, tais como perfis de aço, na sua secção transversal. Este método é uma modificação do método de caminho paralelo, em que a parede é dividida em vários percursos paralelos, de caminhos de fluxo de calor com diferentes condutâncias, de superfície para superfície, e é aplicado um fator de ponderação de área de parede com uma ponte térmica originada pelo perfil de aço. A largura da área de influência originada pelos perfis de aço é calculada a partir da equação:

$$W = m + 2 \times d \quad [m] \quad (1)$$

com:  $W$  = largura da área de influência dos perfis metálicos [m];  $m$  = largura do banzo do perfil metálico [m]; e  $d$  = distância entre o banzo do perfil metálico e a superfície da parede [m]. A Figura 2.1 ilustra as dimensões  $d$  e  $m$ .

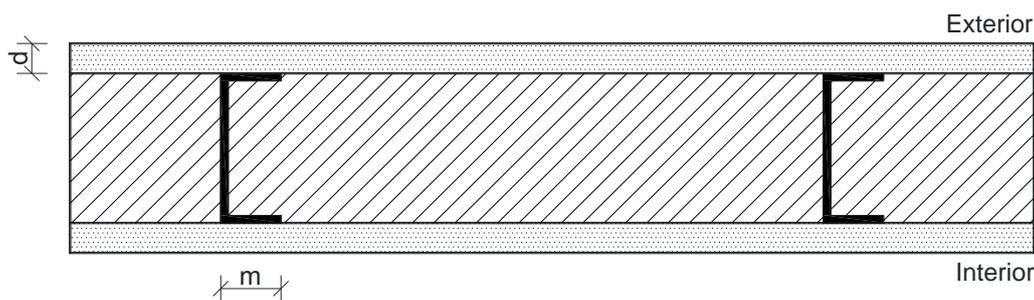


Figura 2.1 – Método da zona ASHRAE (ASHRAE, 1993).

O método da zona ASHRAE tem a limitação de apenas ser aplicável a paredes e lajes com perfis metálicos aplicados numa só direção. Não sendo aplicável em situações com perfis perpendiculares entre si.

Com base no método anterior, Jan Kosny desenvolveu o método da zona modificada para paredes com isolamento na cavidade entre perfis (Kosny et al., 1994), que difere do método precedente na forma como a área de influência da ponte térmica do perfil de aço é estimada, levando a resultados mais fiáveis. Neste método a largura da zona depende de três parâmetros: relação entre a resistividade térmica dos materiais de revestimento e isolamento da cavidade entre perfis; dimensão (profundidade) dos perfis; e espessura dos materiais de revestimento. A equação é:

$$w = L + z_f \sum_{i=1}^n d_i \quad [m] \quad (2)$$

com:  $w$  = largura da área de influência dos perfis metálicos [m], visível na Figura 2.2;  $z_f$  = fator de zona, retirado da Figura 2.3;  $d_i$  = espessura da camada  $i$  na zona A da Figura 2.2 [m]; o índice  $i$  identifica o material na zona A; e  $n$  = número total de materiais na zona A.

O fator de zona é obtido a partir do ábaco apresentado na Figura 2.3, onde se tem que entrar com resistividade térmica e largura do perfil ( $d_s$  da Figura 2.2). A resistividade térmica obtém-

se da divisão da resistividade térmica média das camadas de revestimento (zona A) e a resistividade térmica do isolamento da cavidade. A equação é:

$$r = \frac{r_{camadas\ revestimento}}{r_{camada\ de\ isolamento\ da\ cavidade}} \quad (3)$$

com:  $r$  = resistividade térmica;  $r_{camadas\ revestimento}$  = resistividade térmica média das camadas de revestimento do lado onde se pretende calcular a largura da área de influência dos perfis metálicos [m.K/W];  $r_{camada\ de\ isolamento\ da\ cavidade}$  = resistividade térmica do isolamento da cavidade [m.K/W]; onde a  $r_{camadas\ revestimento}$  e a  $r_{camada\ de\ isolamento\ da\ cavidade}$  são obtidas pela equação:

$$r_{camada} = \frac{1}{\lambda} [m.K/W] \quad (4)$$

onde:  $r_{camada}$  = resistividade térmica da camada [m.K/W];  $\lambda$  = condutibilidade térmica [W/(m.K)].

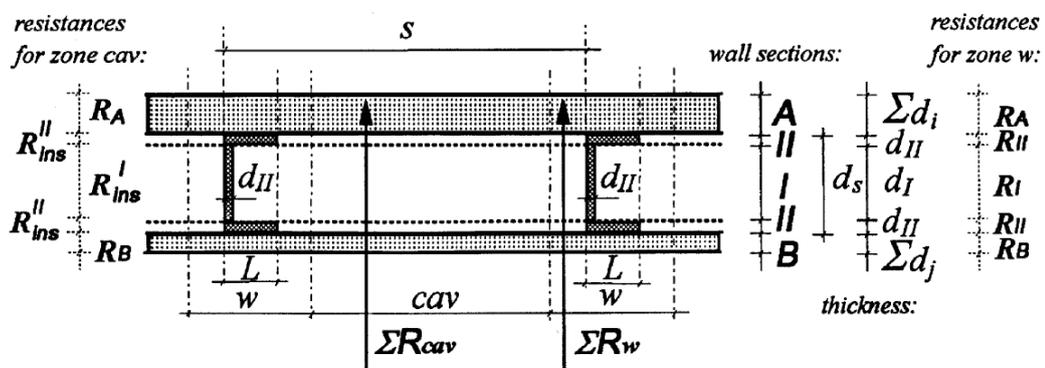


Figura 2.2 – Método da zona modificada (ASHRAE, 1993).

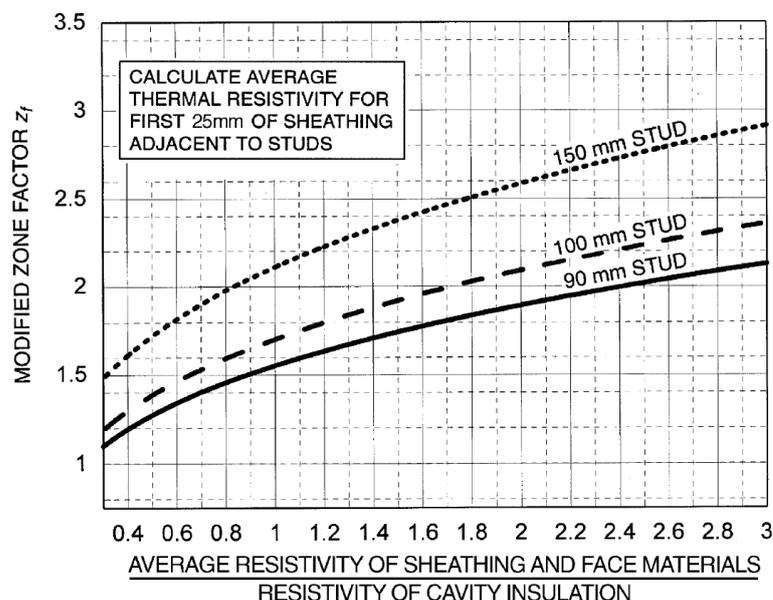


Figura 2.3 – Fator de zona ( $z_f$ ) do método da zona modificada (ASHRAE, 1993).

O método da zona modificada tem as limitações do método anterior, acrescido do facto de apenas ser aplicável o ábaco da Figura 2.3 a paredes com a caixa-de-ar entre os perfis preenchida com isolamento. O fator de zona ( $z_f$ ) é igual a 2 para as paredes com caixa-de-ar, ficando a equação igual à do método da zona ASHRAE (Equação (1)). O método da zona modificada tem a vantagem, em relação ao anterior, de obter valores mais fiáveis para paredes com caixa-de-ar preenchida por isolamento.

Mais recentemente, Doran e Gorgolewski sugeriram um método simplificado para elementos de construção LSF enformados a frio e híbridos, em que o isolamento térmico é atravessado por perfis metálicos (Gorgolewski, 2007). Este método é uma adaptação do método estabelecido na norma ISO 6946 (2007), que inclui vários parâmetros adicionais (por exemplo, a largura do banzo, espaçamento e profundidade do perfil) para explicar o comportamento térmico global do elemento de aço. A resistência térmica real deixa de ser o valor médio entre a  $R_{min}$  e a  $R_{max}$ , passando a ser um valor de  $R'$  ponderado. A equação proposta é:

$$R' = p \cdot R_{max} + (1 - p) \cdot R_{min} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (5)$$

em que o fator  $p$  é obtido através da equação:

$$p = 0,8 \cdot \frac{R_{min}}{R_{max}} + 0,44 - 0,1 \cdot \frac{w}{40 \text{ mm}} - 0,2 \cdot \frac{600 \text{ mm}}{s} - 0,04 \cdot \frac{d}{100 \text{ mm}} \quad (6)$$

onde:  $w$  = a largura do banzo do perfil de aço [mm];  $s$  = o espaçamento entre perfis de aço [mm];  $d$  = largura da alma [mm].

A formulação apresentada foi calibrada com base em modelações numéricas através do método dos elementos finitos, para avaliar o fluxo de calor real através dos perfis de aço e os resultados foram comparados (para encontrar correlações) com os valores previstos obtidos pelo método simplificado. O erro médio foi inferior a 3% para um intervalo de 52 casos simulados. Foram considerados três tipos diferentes de construções: parede com “estrutura quente”, com todo o isolamento colocado do lado exterior da estrutura de aço; parede com “estrutura de aço fria”, todo o isolamento colocado do lado interior da estrutura de aço; e parede híbrida com isolamento em ambos os lados da estrutura de aço. Este método tem as mesmas limitações de aplicabilidade que os anteriores, apenas é aplicável a paredes com perfis metálicos aplicados numa só direção. Tem a vantagem de dar valores mais rigorosos que os anteriores.

## 2.2 Métodos experimentais

A avaliação experimental da transmissão térmica de um elemento de construção é essencial para a calibração e validação de qualquer modelo analítico ou numérico. Estes testes podem ser realizados utilizando o método do fluxo de calor, também designado por método dos fluxímetros de calor, ou pelo método da *Hot Box*. 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 no laboratório e é relativamente simples de usar. No caso da análise *in situ*, as maiores dificuldades estão no estabelecimento de condições de estado estacionário, que é demorado, e é difícil garantir um fluxo de calor lateral nulo ou muito reduzido. Os procedimentos experimentais para este método são dados pelas normas ISO 9869 (1994) e ASTM C1155-95 (2001). Na Subsecção 4.2.5 desta dissertação são apresentadas as equações mencionadas nestas normas, que permitem aferir o valor de U.

O método da *Hot Box* é um procedimento de avaliação experimental do valor de U, que só é aplicável em instalações laboratoriais. Estes testes são realizados através da criação de um diferencial de temperatura, entre o elemento em análise, e mantendo a diferença térmica por um determinado período de tempo. As normas mais usadas para realização destes ensaios, definição dos procedimentos experimentais e para a calibração da *Hot Box* são: a norma Europeia ISO 8990 (1996), a americana ASTM C1363 (2011) e a russa GOST 26602.1-99 (1999).

A termografia por radiação infravermelha é uma técnica experimental complementar, que permite localizar as pontes térmicas e respetivas perdas de calor. Caso se utilize o método dos

fluxímetros de calor, esta técnica ajuda também a identificar os melhores locais para instalação de sensores, de modo a garantir uma distribuição representativa da instrumentação ao longo do elemento em análise. Esta abordagem é sugerida na norma ASTM C1155-95 (2001) e são explicadas na norma ASTM C1046-95 (2001) as vantagens da utilização desta metodologia na cateterização do elemento construtivo de modo a aferir as diferentes zonas de fluxo de calor, para determinar os melhores locais para colocação de sensores. Adicionalmente a norma ASTM C1060 (2011) explica e define o uso adequado dos sistemas de imagens termográficas por radiação infravermelha para as inspeções térmicas dos elementos de construção. Este procedimento permite também a deteção de cavidades (ou caixas-de-ar) onde o isolamento possa ter sido colocado de forma inadequada ou está ausente e permite também a identificação de áreas com isolamento corretamente aplicado.

O trabalho de Zalewski et al. (2010) descreve também a utilização de termografia por raios infravermelhos, para avaliar as pontes térmicas em paredes com perfis de aço e mostra as suas vantagens e limitações. O método foi utilizado para determinar experimentalmente os aspetos quantitativos das perdas de calor através da envolvente e consiste em obter as variações de temperatura na superfície, que posteriormente se caracterizam com fluxímetros de calor. A termografia por radiação infravermelha deve ser utilizada com cuidado/atenção porque existem muitos parâmetros que podem perturbar as leituras (variações de emissividade das superfícies, temperatura ambiente, humidade relativa, radiações infravermelhas parasitas, radiação solar, etc.).

### **2.3 Métodos numéricos**

Atualmente estão disponíveis vários métodos computacionais numéricos avançados, como a análise de elementos finitos (FEA) e a dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Com estes métodos numéricos avançados podem-se produzir modelos, altamente detalhados das componentes do edifício e fornecer valores mais precisos e confiáveis, para as suas propriedades térmicas (e.g. resistência térmica). Em comparação com a abordagem experimental, estes modelos numéricos sofisticados, quando validados, tem a vantagem de serem menos caros, em termos de tempo e dinheiro, permitindo a racionalização dos recursos e otimização dos elementos construtivos. Obviamente que, a precisão destes algoritmos numéricos avançados, devem ser verificados. Para este fim, a ISO 10211 (2007) estabelece as especificações a serem seguidas, durante a modelação de pontes térmicas em edifícios e casos de teste, para avaliar a precisão dos algoritmos numéricos e validar o método de cálculo, verificando o cálculo dos fluxos de calor e temperaturas superficiais.

Por definição, quando há uma ponte térmica, o fluxo de calor através de um elemento de construção torna-se bidimensional ou tridimensional, em vez de unidimensional. Devido ao fluxo de calor lateral originado pelos perfis de aço, o efeito tridimensional torna-se muito relevante em construções LSF. Por isso, alguns métodos analíticos simplificados não devem ser aplicados, porque podem fornecer resultados imprecisos. Além disso, as medições experimentais neste tipo de estruturas também podem fornecer resultados não confiáveis. Deste modo, uma avaliação rigorosa (medida ou calculada) do desempenho térmico dos elementos de construção LSF não é uma tarefa fácil, sendo o fluxo de calor lateral um fator chave.

## 2.4 Mitigação de pontes térmicas e melhoria do desempenho térmico

Nos últimos anos têm sido realizados um conjunto significativo de trabalhos para avaliar e melhorar o comportamento térmico das soluções construtivas com estruturas de aço. Kosny & Christian (1995) mostraram que a utilização de isolamento térmico exterior contínuo é uma forma eficaz de melhorar o desempenho térmico e reduzir as pontes térmicas. Além disso, o aumento do espaçamento entre os perfis permite um aumento da resistência térmica (valor de R maior). A eficiência desta mudança diminui à medida que a quantidade de isolamento exterior aumenta. A melhoria no valor de R causada pelo aumento do espaçamento entre os perfis de aço pode chegar a 20% com 13 mm de EPS e cerca de 15% com 25 mm de EPS (Kosny & Christian, 1995).

Höglund & Burstrandb (1998) estudaram uma maneira eficiente para reduzir o fluxo de calor, através do aumento do caminho do fluxo de calor e através da redução da área do perfil de aço, com a inserção de ranhuras na alma do perfil. Além disso, eles também concluíram que os banzos do perfil de aço funcionam como coletores de calor. Se o comprimento do banzo diminui, o valor de U também diminui. Blomberg & Claesson (1998) realizaram um estudo semelhante, que também concluiu que uma das estratégias mais eficientes para diminuir o fluxo de calor, é a utilização de perfis de aço perfurados. O estudo mostra que a espessura de um perfil de aço padrão tem de diminuir seis vezes, para alcançar as propriedades térmicas equivalentes de um perfil metálico com ranhuras. Além disso, o fluxo de calor através de um perfil diminui à medida que o número de ranhuras estreitas aumenta.

A Figura 2.4a ilustra o aumento do caminho do fluxo de calor através da redução da área de alma do perfil de aço, com a inserção de perfurações na alma. Outra solução possível é a utilização de um perfil com uma geometria que permite reduzir a área de contacto dos banzos, criando uma redução da ponte térmica, aumentando assim o valor de R da parede. Este sistema é uma patente desenvolvida para melhorar termicamente paredes exteriores com estrutura de aço e permite uma melhoria no valor de R da parede até 16% (ThermaChannel, 2015).

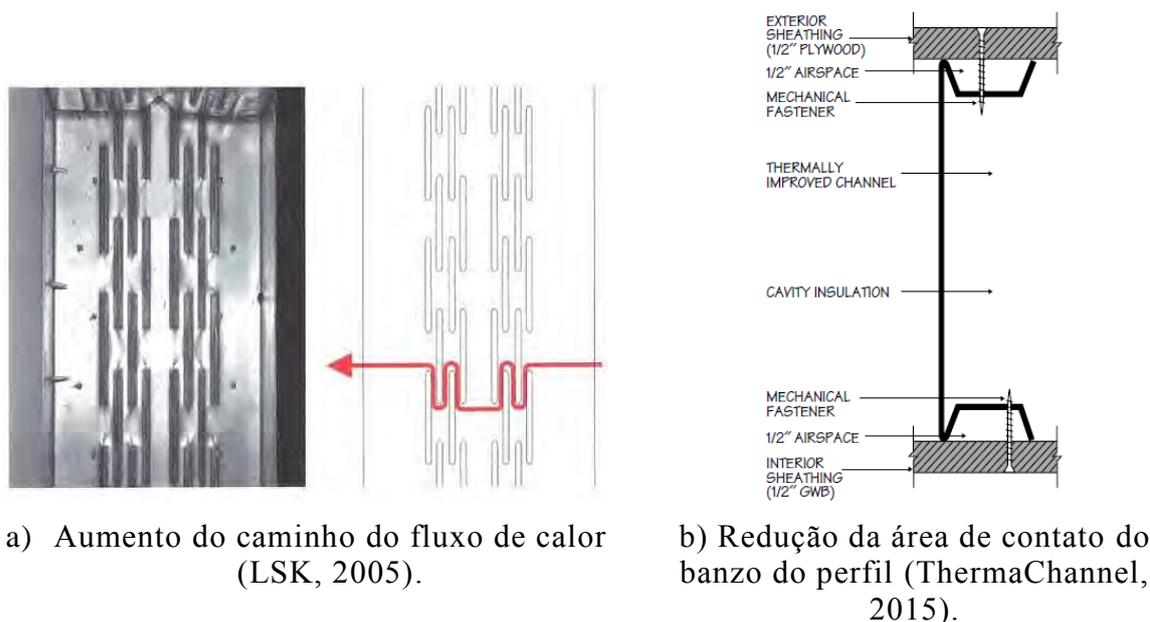


Figura 2.4 – Mitigação de pontes térmicas em perfis de aço enformados a frio.

Note-se que, sempre que é removido material da alma do perfil de aço (perfis com fendas térmicas), há uma conseqüente redução da resistência mecânica. Isto pode não ser crítico para os painéis de parede sem função estrutural, mas pode ser relevante em outros casos (Veljkovic & Johansson, 2007). Salhab & Wang (2008) propôs o método da espessura equivalente para prever a resistência mecânica de secções de perfis enformados a frio de paredes finas com alma perfurada sob compressão. Estes autores realizaram um estudo paramétrico usando simulações de elementos finitos. Eles concluíram que a perfuração da alma pode reduzir significativamente a resistência do perfil e os parâmetros mais relevantes são: largura da alma em relação à espessura, relação entre a largura perfurada e a largura bruta e relação entre a largura sólida e a largura total da zona de perfuração.

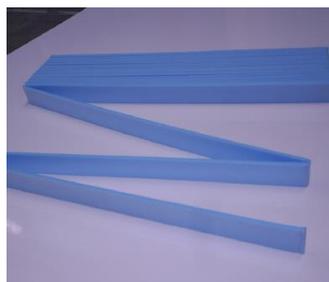
Para atenuar e/ou evitar as pontes térmicas, boas regras de concepção e projeto têm um papel fundamental. As estratégias que levam a melhorias são as seguintes: (1) manter a geometria da fachada tão simples quanto possível; (2) evitar a interrupção da camada de isolamento; (3) unir as camadas de isolamento na largura total, nas junções de elementos de construção; (4) utilização de um material com a menor condutibilidade térmica possível, sempre que a interrupção da camada de isolamento seja inevitável; (5) instalação de aberturas, tais como portas e janelas, em contacto com a camada de isolamento (Santos et al., 2012).

A Figura 2.5a ilustra um exemplo de um elemento que introduz uma quebra térmica, permitindo a criação de uma barreira na transmissão térmica entre as camadas exteriores e interiores do

edifício. Os cortes térmicos podem ser incorporados em estruturas de aço e permitem a transmissão simultânea de cargas elevadas. Outro exemplo, visível na Figura 2.5b, é a colocação de material de isolamento, aplicado localmente ao longo dos perfis, permitindo a mitigação das pontes térmicas. Esta solução consiste na colocação de uma tira de material isolante, que é colada à estrutura de aço através de um adesivo.



a) Cortes térmicos para elementos de edifícios (Schöck, 2015).



b) Tiras de corte térmico para elementos construtivos (Cemintel, 2007).

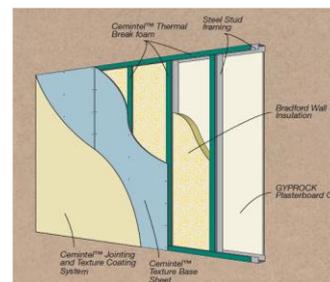


Figura 2.5 – Mitigação de pontes térmicas em perfis de aço enformados a frio.

A utilização de novos materiais de isolamento também permitem uma grande melhoria do desempenho térmico de paredes com baixas espessuras. As mantas de isolamento de aerogel, são um dos mais promissores materiais de isolamento térmico, que surgiram nos últimos anos. Elas tem uma condutibilidade térmica inferior, 2 a 2,5 vezes menor que a lã mineral convencional (Baetens et al., 2011). Outros materiais promissores são os painéis de isolamento a vácuo (VIPs, do inglês *Vacuum Insulation Panels*), que têm uma resistência térmica mais elevada, entre 5 a 8 vezes superior a outros materiais de isolamento convencionais (Alam et al., 2011). Os VIPs podem alcançar bons resultados com espessuras baixas, mas têm ainda algumas desvantagens: são caros, frágeis, difíceis de adaptar no local da construção (não podem ser cortados ou perfurados), têm um custo elevado quando as dimensões são personalizadas e exibem uma diminuição das propriedades térmicas ao longo do tempo (Baetens et al., 2010).

### 3 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

#### 3.1 Estrutura de aço

A parede de referência, designada por Modelo A, é constituída por elementos modulares de 1,2 m de largura e 2,49 m de altura, com uma estrutura de aço galvanizado enformado a frio de paredes finas, com três diferentes tipos de secções transversais: "C" (100x40x10x1 mm), "L" (75x40x1 mm) e "Z" (75x22x1 mm).

Na Figura 3.1 apresenta-se um desenho técnico da estrutura de aço da parede, onde se detalham as três conexões de aço horizontais. Na Figura 3.2 apresenta-se uma renderização 3D, que ilustra a estrutura de aço e identifica os tipos de perfis.

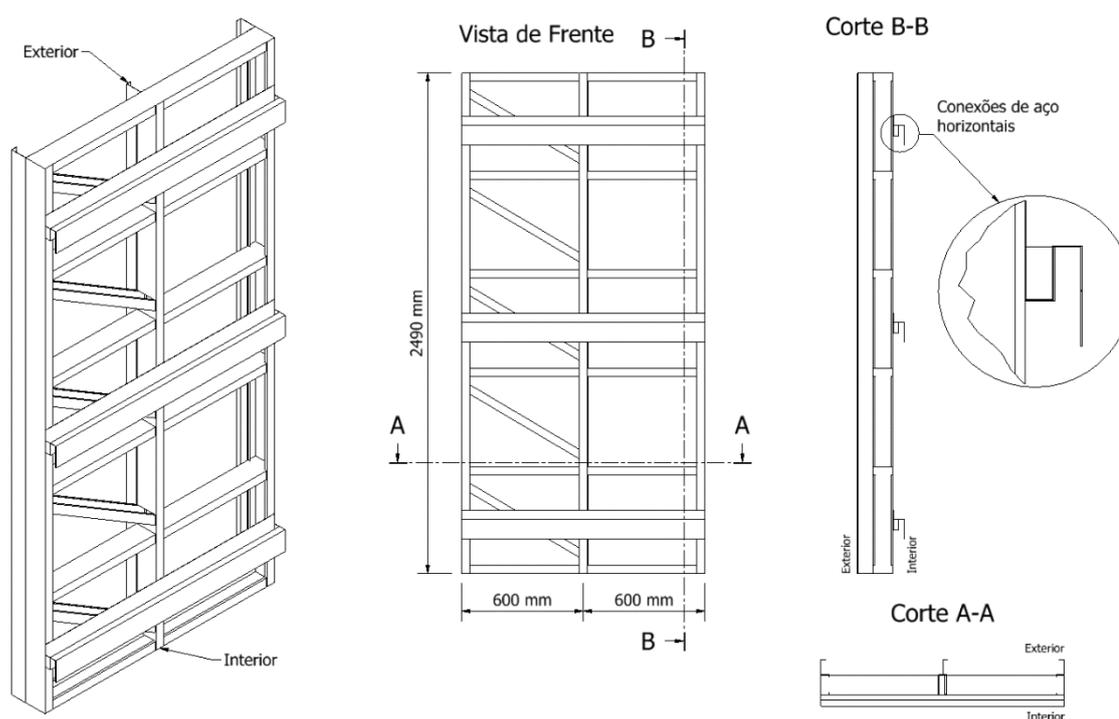


Figura 3.1 – Esquema da estrutura de aço do módulo de parede LSF.

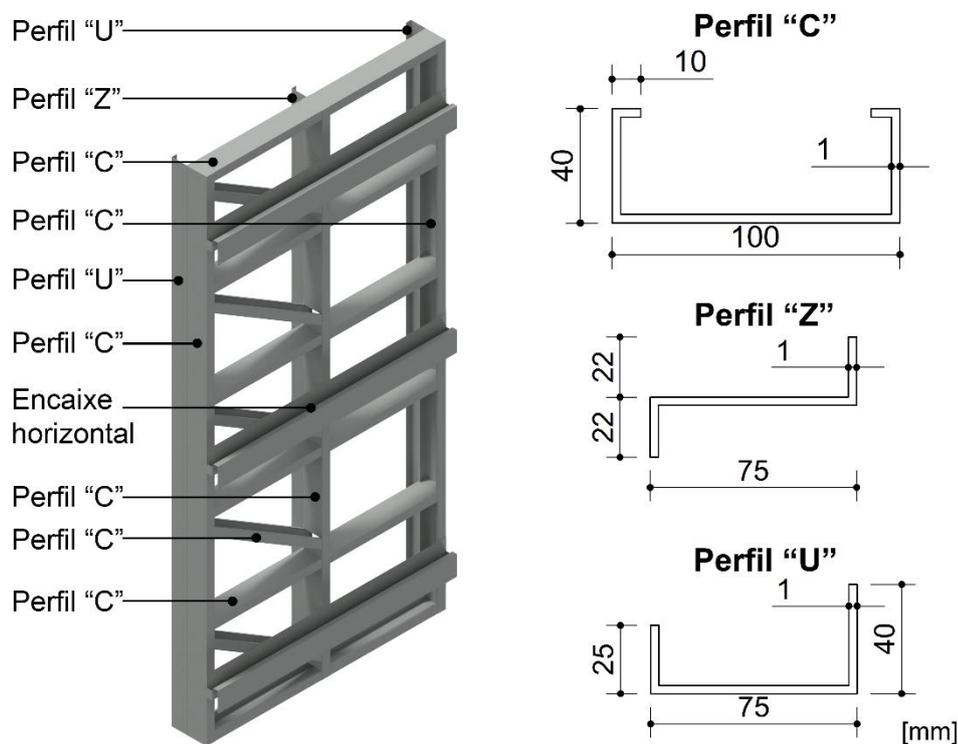


Figura 3.2 – Estrutura de aço 3D do módulo de parede LSF.

### 3.2 Composição do módulo de parede

A Figura 3.3 mostra as camadas constituintes do módulo de parede, seus materiais e espessuras. A parede modular é composta por duas partes, o corpo exterior, fixo à estrutura de aço, e a parte interior, removível, ligada por três conexões de aço horizontal já apresentadas (ver Figura 3.1 e Figura 3.2). O Quadro 3.1 apresenta a composição da parede, incluindo as espessuras e condutibilidades térmicas ( $\lambda$ ) de cada camada de material aplicado na parede.



Figura 3.3 – Composição do módulo de parede (Modelo A).

Quadro 3.1 – Materiais da parede e propriedades (Modelo A)

Material (da face exterior para a face interior)	Espessura [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]
Acabamento do ETICS ( <i>External Thermal Insulation Composite Systems</i> )	4	0,750
EPS (isolamento do sistema ETICS)	40	0,040
Membrana resistente à água e vento	(Negligenciado nos cálculos térmicos)	
OSB ( <i>Oriented strand board</i> )	11	0,130
Lã de rocha	40	0,034
Ar <sup>1</sup>	166	0,922
Estrutura de aço (C100x40x10x1, U75x40x1 and Z75x22x1)	175	50,000
Lã de rocha	40	0,034
Madeira	15	0,180
OSB	11	0,130
Gesso Cartonado	13	0,250
<b>Espessura Total [mm]</b>	325	

<sup>1</sup> Condutibilidade térmica equivalente

## 4 ANÁLISE DA PAREDE

No presente capítulo apresentam-se os estudos realizados para o módulo de parede, nomeadamente o estudo: analítico, experimental e numérico.

### 4.1 Estudo analítico

O cálculo analítico apenas é possível ser realizado em elementos de construção com camadas termicamente homogéneas. Os modelos simplificados apresentados na Secção 2.1 apenas permitem analisar elementos construtivos, como as paredes, quando estes são atravessados na secção transversal por elementos metálicos que têm desenvolvimento vertical. Os modelos são aplicáveis a geometrias simples, como por exemplo perfis do tipo “C” ou “U”.

A estrutura de aço da parede em estudo está fora do âmbito dos modelos simplificados, devido a ter perfis horizontais, diagonais, encaixes horizontais e inclusive perfis verticais paralelos. Outro fator que dificulta o cálculo analítico são os encontros entre perfis, onde existem maiores concentrações de aço.

Tendo em conta, a impossibilidade de calcular analiticamente com rigor a parede objeto de estudo, realiza-se um estudo da parede sem a estrutura de aço (Figura 4.1). Este vai permitir estudar a influência do aço na parede, comparar resultados e validar os modelos numéricos.

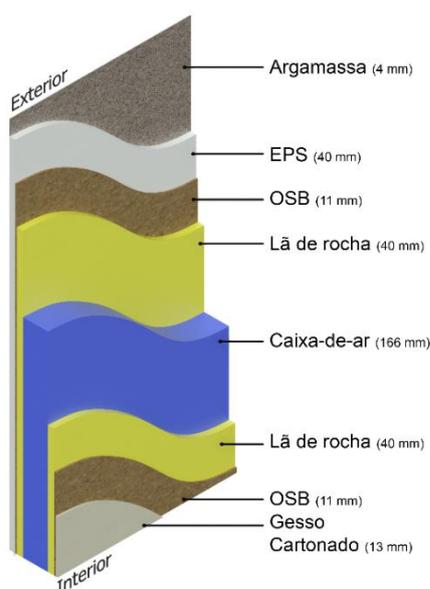


Figura 4.1 – Parede sem perfis de aço.

Para obter o coeficiente de transmissão térmica do módulo de parede é necessário calcular em primeiro lugar a resistência térmica ( $R$ ) de cada material, que se obtém a partir do quociente entre a espessura do material e a sua condutibilidade térmica. A equação é:

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]} \quad (7)$$

com:  $e$  = espessura do material [m];  $\lambda$  = condutibilidade térmica [W/(m.K)].

De seguida tem que se calcular a resistência térmica do elemento construtivo homogéneo, que é obtido pela soma das resistências anteriormente calculadas. A equação é:

$$R = \sum_{j=1}^n R_j = \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j} \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]} \quad (8)$$

onde: o índice  $j$  = número do material; e  $n$  = número total de materiais.

O passo seguinte é obter a resistência térmica total, que tem em conta as resistências térmicas superficiais, exterior e interior, através da equação:

$$R_T = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se} \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]} \quad (9)$$

onde:  $R_T$  = resistência térmica total [m<sup>2</sup>.K/W];  $R_{si}$  = resistência térmica superficial interior [m<sup>2</sup>.K/W];  $R_{se}$  = resistência térmica superficial exterior [m<sup>2</sup>.K/W]; com  $R_{se} = R_{si} = 0,13$  [m<sup>2</sup>.K/W].

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) obtém-se a partir da equação:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)}] \quad (10)$$

No Quadro 4.1 apresenta-se o cálculo do valor  $U$  para a parede sem aço, tendo-se obtido 0,249 W/(m<sup>2</sup>K).

Quadro 4.1 – Cálculo analítico do valor de U da parede sem aço.

<b>Materiais</b>	<b>e</b> [m]	<b><math>\lambda</math></b> [W/(m.K)]	<b>R</b> [m <sup>2</sup> .K/W]
Acabamento do ETICS	0,004	0,750	0,005
EPS	0,040	0,040	1,000
OSB	0,011	0,130	0,085
Lã de rocha	0,040	0,034	1,176
Ar	0,166	0,922	0,180
Lã de rocha	0,040	0,034	1,176
OSB	0,011	0,130	0,085
Gesso cartonado	0,013	0,250	0,052
		<b>R<sub>T</sub></b> [m <sup>2</sup> .K/W]	4,020
		<b>R<sub>se</sub>=R<sub>si</sub></b> [m <sup>2</sup> .K/W]	0,130
		<b>U</b> [W/(m <sup>2</sup> K)]	<b>0,249</b>

## 4.2 Estudo experimental

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho em Guimarães. Nesta secção apresenta-se a metodologia de ensaio utilizada, descrevem-se os equipamentos, apresentam-se os resultados e conclusões obtidas.

As principais normas que serviram de referência à realização dos ensaios experimentais e à análise dos respetivos resultados são:

- ASTM C1046–95 (*Reapproved 2001*), *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components* (ASTM C1046-95, 2001);
- ASTM C1155–95 (*Reapproved 2001*), *Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data* (ASTM C1155-95, 2001);
- ISO 9869:1994, *Thermal insulation – Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance* (ISO 9869, 1994).

#### 4.2.1 Instalações de ensaio

Os ensaios experimentais foram realizados numa câmara de ensaios com as dimensões internas de 2,87m x 4,84m x 2,48m, Figura 4.2, que está colocada dentro de uma instalação laboratorial maior. Os elementos modulares, objeto de estudo, foram acoplados à câmara de ensaios por meio de um pórtico móvel de aço, também visível na Figura 4.2 (cinzento), com as dimensões de 4,18m x 2,69m, correspondendo a uma área de parede 11,27 m<sup>2</sup>.

A temperatura no interior da câmara de ensaio foi controlada por um aparelho de ar condicionado, que permite a temperatura máxima de aproximadamente 31 °C. Devido ao gradiente de temperatura imposto entre as duas faces da parede, é estabelecido um fluxo de calor, quase em estado estacionário. Todo este processo é monitorizado através de um conjunto de sensores descritos na secção seguinte.

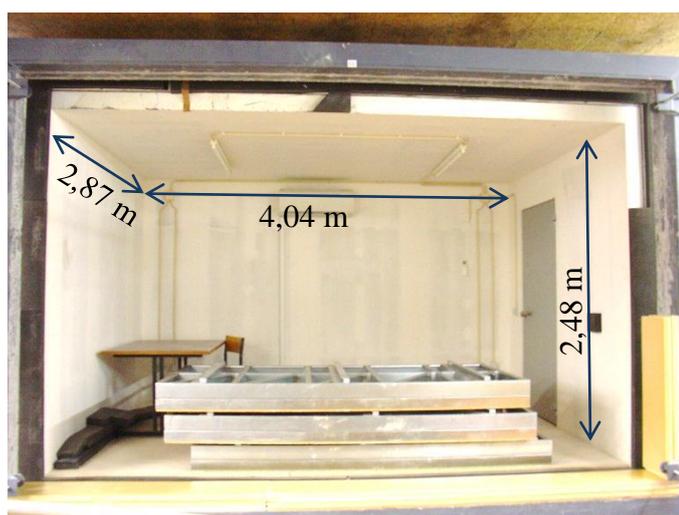


Figura 4.2 – Câmara de ensaios e pórtico móvel.

O pórtico da câmara de ensaio foi preenchido com três módulos de parede, com 1,20 m de largura, e um módulo menor, de 0,39 m de largura, que se ilustra na Figura 4.3. Para minimizar as perdas de calor pela periferia da parede, entre os módulos de parede e o pórtico de aço ao longo de todo o seu perímetro, foi colocada uma camada de isolamento contínuo de XPS, com 10 cm de espessura (Figura 4.3). A fixação dos módulos de parede ao pórtico foi realizada por elementos de aço em forma de "L".

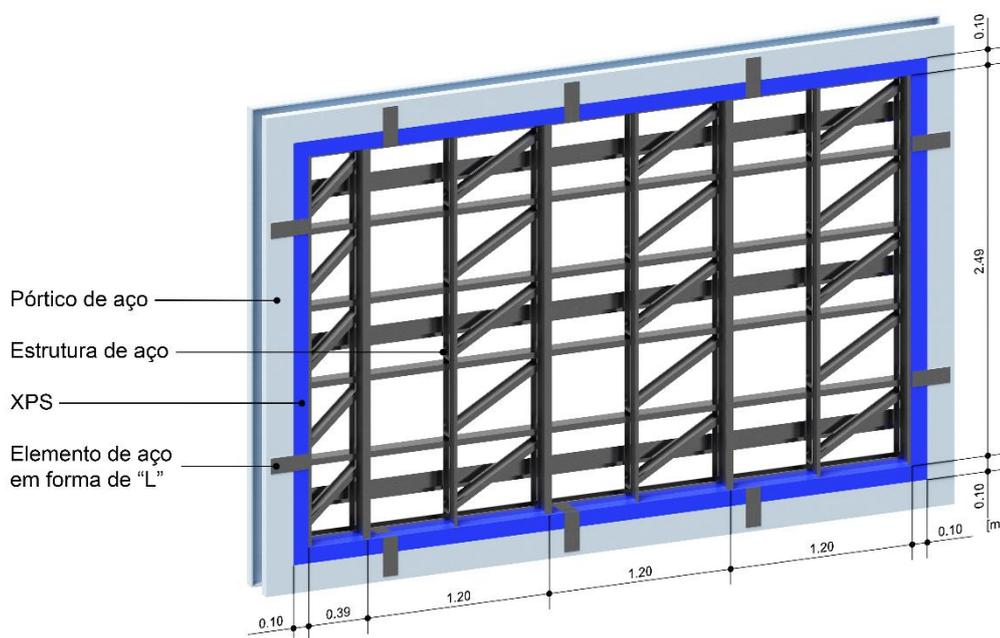


Figura 4.3 – Estrutura de aço dos módulos de parede e pórtico da câmara de ensaios.

A Figura 4.4a mostra uma vista do interior da estrutura da parede de LSF no pórtico da câmara de ensaio. A Figura 4.4b mostra a vista exterior da parede (onde falta montar um módulo) antes da aplicação do ETICS.



a) Vista interior da parede LSF.



b) Vista exterior da parede LSF.

Figura 4.4 – Fotografias da montagem do módulo de parede.

Após o preenchimento de toda a área do pórtico com os módulos de parede estruturais e após a realização da campanha de ensaios sem ETICS, foi aplicado o isolamento térmico pelo exterior, conforme ilustrado na Figura 4.5, onde se podem observar as fases de montagem: colocação do EPS (Figura 4.5a), aplicação da rede de fibra de vidro (Figura 4.5b), colocação da argamassa-cola (Figura 4.5c) e aplicação da camada de revestimento e acabamento (Figura 4.5d).

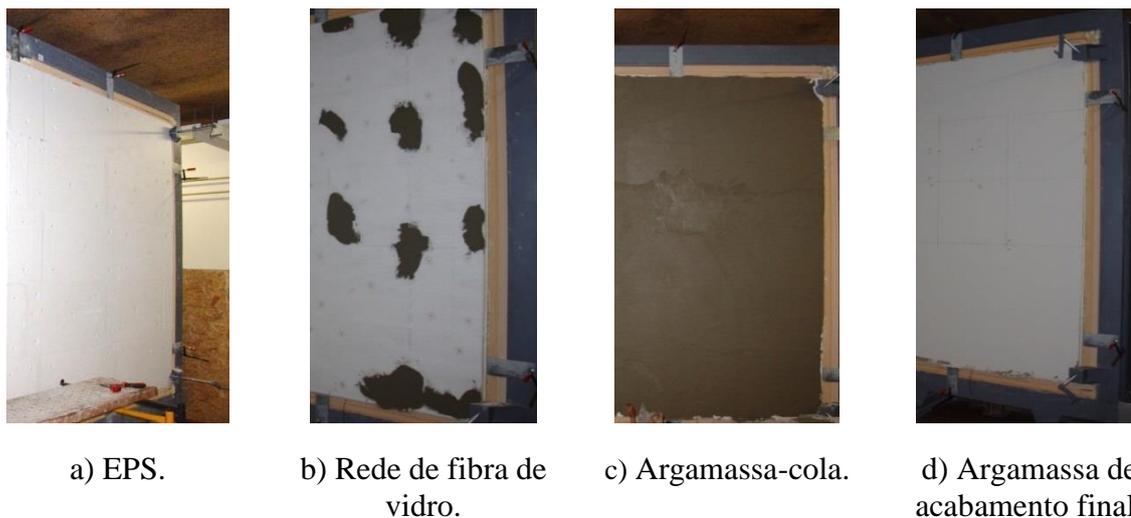


Figura 4.5 – Aplicação do ETICS na face exterior da parede no pórtico de ensaio.

#### 4.2.2 Equipamentos

O fluxo de calor das paredes testadas foi monitorizado em determinados pontos-chave da parede (ver Figura 4.10) por meio de sensores de fluxo de calor do tipo Hukseflux HFP01, com precisão de  $\pm 5\%$  (Figura 4.6). As temperaturas da superfície interior e exterior foram medidas através de sensores de temperatura da superfície PT100 com uma precisão de  $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.7a). Para medir a temperatura no interior da caixa-de-ar da parede foi utilizado um sensor de temperatura PT100 do tipo agulha (Figura 4.7b). Para monitorizar a temperatura e humidade do ar ambiente no interior e exterior da câmara de ensaio, foram utilizados termo-higrómetros, com precisão de  $\pm 3\%$  (Figura 4.7c).



a) Face negativa, lado frio.



b) Face positiva, lado quente.

Figura 4.6 – Fluxímetros do tipo Hukseflux HFP01.



a) PT100 de superfície.



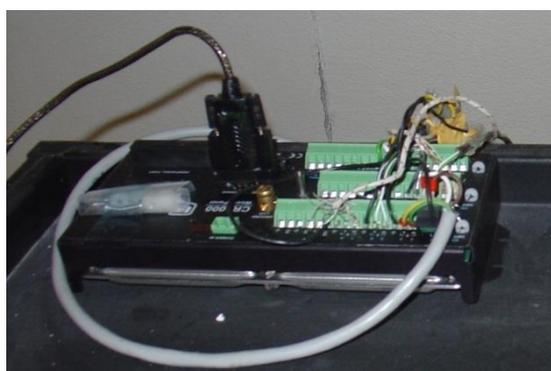
b) PT100 do tipo agulha.



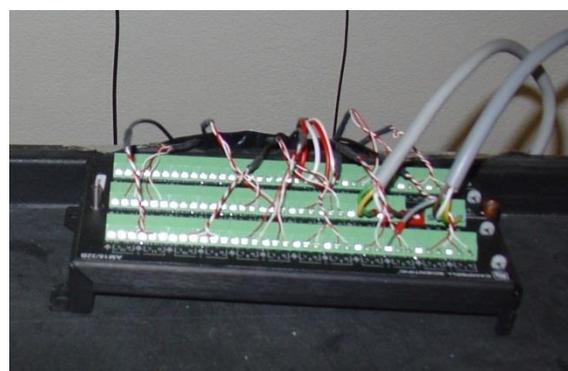
c) Termo-higrómetro.

Figura 4.7 – Sensores de temperatura utilizados nas medições.

Todas as medições dos sensores foram registradas num DataLogger (Campbell Scientific CR1000, Figura 4.8a) com um multiplexador (Campbell Scientific AM16 / 32B, Figura 4.8b). A exceção são os termo-higrómetros, que têm o registo de dados incorporado.



a) DataLogger.



b) Multiplexador.

Figura 4.8 – Equipamento para comunicação e registo dos dados recolhidos.

Para gerir a comunicação entre o DataLogger e o computador foi utilizado o *Software PC200W* versão 4.1 desenvolvido pela Campbell Scientific (Figura 4.9).

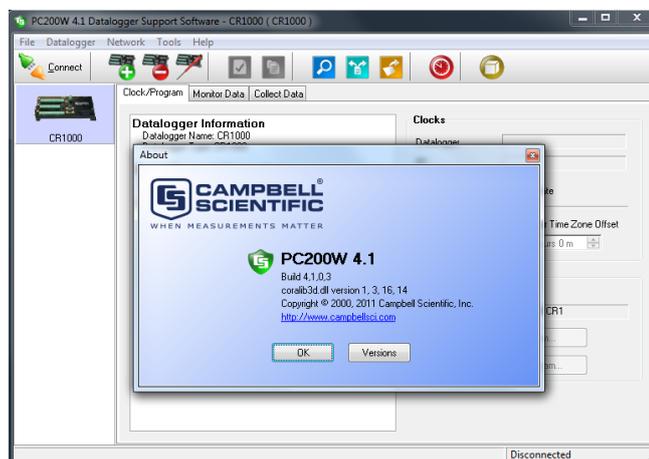


Figura 4.9 – *Software PC200W* versão 4.1.

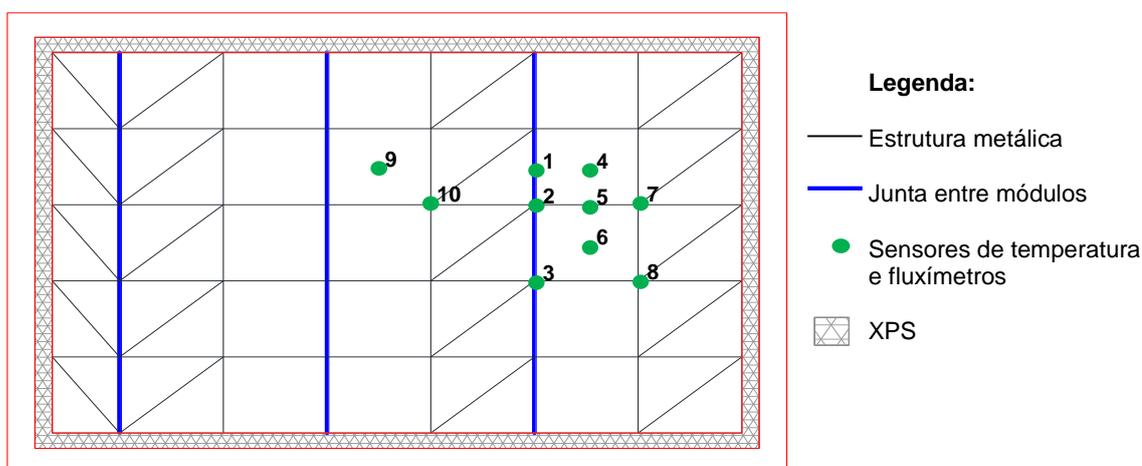


Figura 4.10 – Localização dos sensores.

O esquema da Figura 4.11 mostra a localização dos sensores de temperatura na secção transversal da parede. Os resultados aferidos no interior da parede servem para validar o modelo numérico.

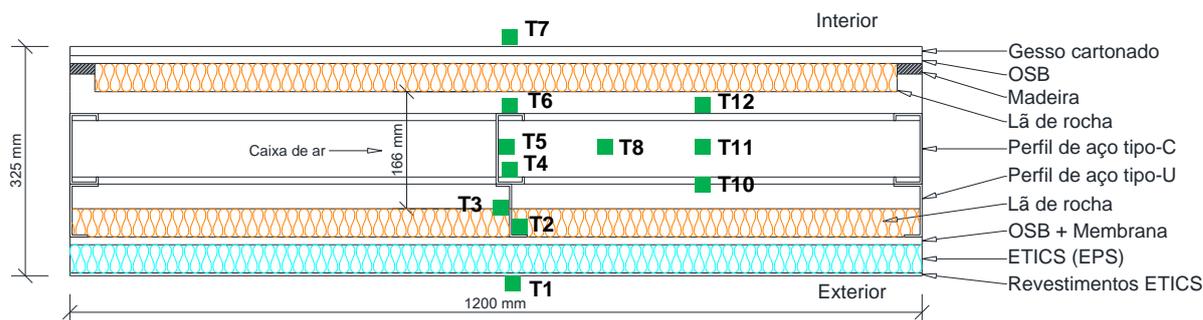


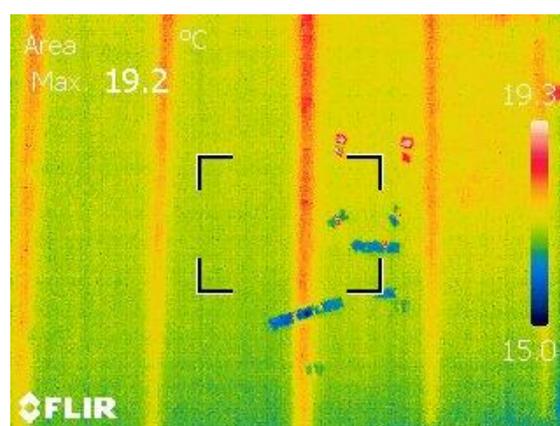
Figura 4.11 – Esquema de localização dos sensores de temperatura num plano de corte horizontal da parede.

### 4.2.3 Termografia por radiação infravermelha

Com o objetivo de observar e analisar a distribuição das temperaturas superficiais na parede testada, foi utilizada uma câmara de radiação infravermelha da FLIR Systems (T400 ThermaCAM, Figura 4.12a). A Figura 4.12b mostra a distribuição de temperaturas na superfície exterior da parede, antes de se aplicar o isolamento térmico exterior (ETICS), onde é possível ver a localização dos perfis de aço verticais. Devido às pontes térmicas e o aumento do fluxo de calor estarem relacionados, a temperatura na superfície exterior é superior na vizinhança dos perfis de aço verticais. Os perfis horizontais e diagonais não são visíveis, porque estão termicamente mais isolados e não têm contato direto com a superfície do OSB.



a) Câmara termográfica Flir ThermaCAM T400.



b) Imagem térmica por infravermelhos da parede sem ETICS, face exterior.

Figura 4.12 – Termografia por radiação infravermelha.

#### 4.2.4 Ensaios realizados

Os ensaios para avaliação do comportamento térmico das paredes foram realizados em duas fases/etapas por forma a permitir caracterizar a diferença entre ter, ou não ter, isolamento exterior (ETICS):

- Ensaios: E1, E2, E3 – Parede sem ETICS;
- Ensaios: E4, E5, E6, E9, E10, E11, E12, E13, E14, E15, E16 – Parede com ETICS;

Nos Anexos A a N são apresentadas as fichas de cada ensaio, onde se ilustra a localização dos sensores, registos de dados realizados e gráficos de temperaturas e de fluxo de calor.

A Figura 4.13a mostra um exemplo das temperaturas medidas, obtidas durante os ensaios da parede LSF com ETICS. Os resultados experimentais utilizados, para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede, foram obtidos em estado quase estacionário, que foi alcançado rapidamente, como resultado de se ter um ambiente controlado no interior da câmara de ensaio. A temperatura ambiente média interior é de 30,8 °C e a temperatura média do ambiente exterior é de 18,4 °C, no intervalo de convergência, que se encontra entre 8 e 9 horas. O intervalo de tempo de cada amostragem de dados foi de 2 minutos.

A Figura 4.13b apresenta os fluxos de calor registados, que têm a mesma tendência da temperatura. Os pontos localizados perto dos perfis de aço verticais apresentam maior fluxo de calor, como consequência de estarem na vizinhança de uma ponte térmica. Neste ensaio a diferença média do fluxo de calor entre as duas zonas é de cerca de 1,1 W/m<sup>2</sup>, que representa um aumento de 50% devido às pontes térmicas.

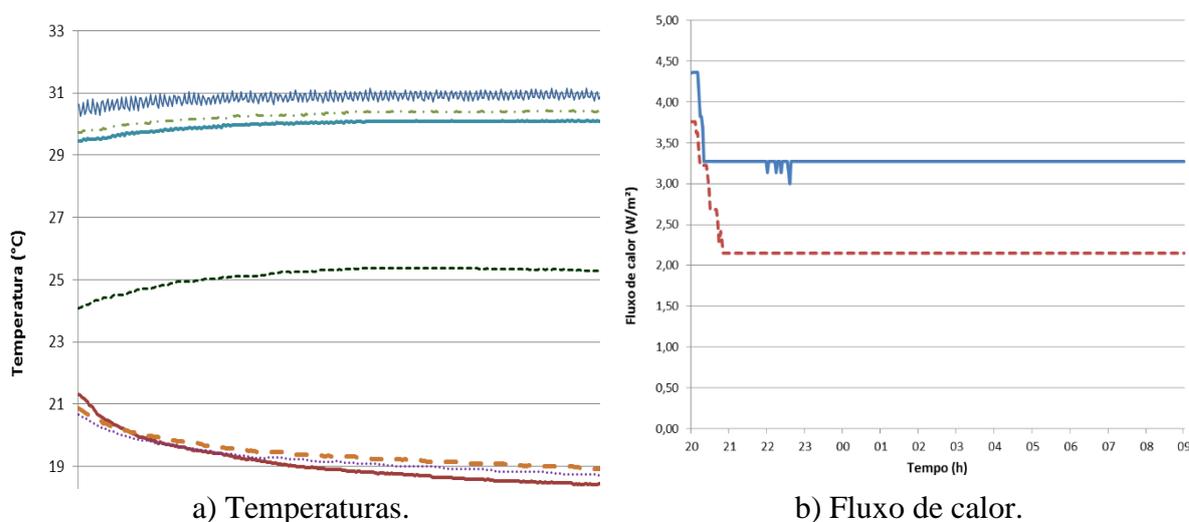


Figura 4.13 – Exemplo dos dados registados para a parede com ETICS.

#### 4.2.5 Procedimentos de cálculo

Com as temperaturas e fluxos de calor obtidos experimentalmente, pode ser calculado o coeficiente de transmissão térmica global da parede. Como os ensaios foram realizados, em condições de estado quase estacionário de temperaturas e foi utilizado o método dos fluxímetros de calor, os cálculos são realizados em conformidade com os procedimentos apresentados em várias normas para medições *in situ*, nomeadamente: ISO 9869 (1994), ASTM C1046-95 (2001) e ASTM C1155-95 (2001).

Para obter a resistência térmica da parede, a ASTM C1155-95 (2001) estabelece um procedimento de cálculo designado por técnica do somatório (“*summation technique*”). Este método de cálculo utiliza o acumular de dados de fluxo de calor e as diferenças nas temperaturas de superfície ao longo do tempo. Exige uma diferença significativa nas temperaturas, entre a face exterior e interior da parede, e temperaturas constantes para uma rápida convergência. A norma ISO 9869 (1994) utiliza o método da média que é semelhante ao método de técnica do somatório da ASTM C1155-95 (2001). A equação é:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j} [m^2 \cdot K/W] \quad (11)$$

com:  $R$  = Resistência térmica [ $m^2 \cdot K/W$ ];  $T_{si}$  = temperatura superficial interior do elemento no instante  $j$  [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ];  $T_{se}$  = temperatura superficial exterior do elemento no instante  $j$  [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ];  $q$  = fluxo de calor no instante  $j$  [ $W/m^2$ ]; o índice  $j$  = número da medição individual no tempo; e  $n$  = número total de medições.

No entanto, dos valores medidos durante um ensaio, nem todos devem ser utilizados, sendo necessário garantir um critério de convergência estabelecido na norma ASTM C1155-95 (2001), usando a seguinte equação:

$$CR_n = \frac{R_e(t) - R_e(t - n)}{R_e(t)} \quad (12)$$

com:  $CR_n$  = taxa de convergência;  $R_e(t)$  = resistência térmica estimada [ $m^2K/W$ ] no período de tempo  $t$ ;  $R_e(t-n)$  = resistência térmica estimada [ $m^2K/W$ ] no período de tempo  $t-n$ ;  $t$  = período de tempo [h];  $n$  = intervalo de tempo para verificação da convergência [h].

Os valores são convergentes 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. A variância pode ser calculada usando a seguinte equação, indicada da norma ASTM C1155-95 (2001):

$$V(R_e) = [s(R_e)/mean(R_e)] \times (100\%) \quad (13)$$

onde:  $V(R_e)$  = variância dos valores de  $R_e$ ;  $s(R_e)$  = desvio padrão da resistência térmica estimada;  $mean(R_e)$  = valor médio da resistência térmica estimada.

Refira-se que o teste da variância deve ser realizado para pelo menos três posições dos sensores ( $N \geq 3$ ). 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  $R_e$  que cumpriram os requisitos apresentados.

Verificada a convergência e variância dos valores de  $R$ , a resistência térmica média ponderada da parede é calculada conforme prescrito na ASTM C1155-95 (2001). Como a resistência térmica pode variar significativamente nas paredes LSF, dependendo da posição dos sensores, são obtidos dois valores diferentes para a resistência térmica, zona dos perfis de aço e zona entre os perfis de aço. 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 (2001):

$$R_m = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_{e1}} + \frac{A_2}{R_{e2}}} \quad [m^2 \cdot K/W] \quad (14)$$

onde:  $R_m$  = resistência térmica média ponderada [ $m^2K/W$ ];  $R_{e1}$  = resistência térmica estimada na zona dos perfis metálicos [ $m^2K/W$ ];  $R_{e2}$  = resistência térmica estimada na zona sem perfis metálicos [ $m^2K/W$ ];  $A_1$  = Área de influência dos perfis metálicos [ $m^2$ ];  $A_2$  = Área de influência das zonas centrais, sem perfis metálicos [ $m^2$ ].

Os perfis metálicos aumentam o fluxo de calor que atravessa a parede sempre que os mesmos atravessem o isolamento térmico, criando efeitos bidimensionais, que se tornam significativos na zona dos perfis e espaços adjacentes. 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 (e.g., apresentado na Figura 4.12b). Quando as imagens térmicas não são elucidativas, devido à falta de resolução do equipamento, pode-se recorrer a métodos expeditos, como o *ASHRAE zone method* (ASHRAE, 1993) apresentado na Secção 2.1. Neste método é usado um fator de ponderação, aplicado à

secção de parede com a ponte térmica (e.g. perfil metálico), que foi desenvolvido para calcular a largura da área de influência dos perfis metálicos ( $W$ ) a partir da Equação (1).

Os valores de  $W$  obtidos foram 130 mm e 120 mm para as paredes com e sem ETICS, respetivamente. A área de influência dos perfis metálicos da parede com ETICS foi determinada pela Equação (1), devido à imagem por radiação infravermelha não ser suficientemente elucidativa. Para determinar a área de influência dos perfis metálicos da parede sem ETICS utilizaram-se as imagens termográficas.

O coeficiente de transmissão térmica global ( $U_{Global}$ ) obtém-se a partir das equações (11) e (14), obtendo-se:

$$U_{Global} = \frac{1}{R_{si} + R_m + R_{se}} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (15)$$

com:  $U_{Global}$  = coeficiente de transmissão térmica global da parede [ $W/(m^2K)$ ];  $R_{se} = R_{si} = 0,13$  [ $m^2K/W$ ] são a resistência térmica superficial exterior e interior.

#### 4.2.6 Resultados obtidos

No Quadro 4.2 apresentam-se dois conjuntos de ensaios. O primeiro conjunto de medições experimentais tem como objetivo a caracterização da parede sem o sistema de isolamento térmico exterior (ETICS). Consta-se que os perfis de aço verticais aumentam em média o valor de  $U$  cerca de 0,55  $W/(m^2.K)$  em relação às restantes zonas da parede (entre perfis de aço), ou seja, 250%. O valor global do coeficiente de transmissão térmica da parede é de 0,40  $W/(m^2.K)$ , 83% mais elevado do que o valor de  $U$  medido entre os perfis de aço.

O segundo conjunto de ensaios pretende caracterizar o desempenho térmico da parede com ETICS. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, como esperado, o ETICS melhora o desempenho térmico da parede, reduzindo significativamente as diferenças entre os valores medidos da transmissão térmica entre e próximo dos perfis de aço (de 250% para 49%). Além disso, o valor de  $U$  global ponderado da parede é agora apenas 16% mais elevado (em vez de 83%) do que o valor medido entre os perfis de aço verticais.

O coeficiente de transmissão térmica global da parede diminuiu de 0,40 para 0,21  $W/(m^2.K)$  após a aplicação do ETICS, provando a importância do uso de isolamento exterior contínuo. De facto, os apenas 40 mm de EPS colocados na superfície exterior diminuem para quase metade o valor da transmissão térmica global, numa parede LSF que tem 80 mm de isolamento de lã de rocha.

Quadro 4.2 – Valores globais do coeficiente de transmissão térmica dos ensaios experimentais.

Descrição	U [W/(m <sup>2</sup> .K)]		
	Entre perfis de aço	Nos perfis de aço	Valor global da parede
Sem ETICS	0,219	0,767 (+250%)	0,40 (+83%)
Com ETICS	0,181	0,270 (+49%)	0,21 (+16%)

À data da realização dos ensaios experimentais (2011) vigorava o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)(Decreto-Lei n.º 80, 2006). Todos os valores de U obtidos (Quadro 4.2) verificam os limites regulamentares estabelecidos no RCCTE para os coeficientes de transmissão térmica em paredes da envolvente exterior opaca, no que respeita aos valores máximos admissíveis e também para os valores de referência (ainda mais exigentes). A título de exemplo, o valor de U de referência (RCCTE) para a zona climática mais desfavorável (I3) é 0,5 W/(m<sup>2</sup>.K) e os valores obtidos para qualquer uma das paredes testadas (completas, isto é, com ETICS) apresentam valores muito inferiores (menos de metade do valor de referência), conforme se pode observar no Quadro 4.2.

A legislação atualmente em vigor, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)(Portaria n.º 349-B, 2013), estabelece o valor de referência do coeficientes de transmissão térmica em paredes da envolvente exterior opaca, para a zona climática I3 de 0,30 W/(m<sup>2</sup>.K), que a partir do fim do ano de 2015 passa a ser 0,25 W/(m<sup>2</sup>.K). A parede sem ETICS não cumpre este valor de referência, no entanto ambas as paredes cumprem os valores máximos admissíveis, que no caso da zona climática I3 é 1,45 W/(m<sup>2</sup>.K).

### 4.3 Estudo numérico

O trabalho numérico realizado contemplou três fases distintas: simulação numérica, calibração dos modelos numéricos e validação. Na presente secção realiza-se uma sucinta exposição do trabalho efetuado.

Várias abordagens foram realizadas, usando-se modelos simplificados, a fim de avaliar a sua fiabilidade e as limitações. A simulação numérica tridimensional foi realizada com o principal objetivo de reproduzir os resultados dos testes experimentais e, portanto, de calibração e validação do modelo.

Na apresentação de valores de  $U$ , ao longo dos capítulos seguintes, utilizam-se três casas decimais para aumentar a exatidão na análise de comparação. Caso contrário, os valores semelhantes após o arredondamento podem levar a diferenças percentuais significativas.

#### 4.3.1 Condições de fronteira

As condições de fronteira utilizadas nos modelos numéricos são:

- Temperatura ambiente na face exterior: 18,4 °C;
- Temperatura ambiente na face interior: 30,8 °C;
- $R_{se} = R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ , resistência térmica superficial exterior e interior;

As temperaturas ambientes, acima mencionados, são os valores médios obtidos durante os testes experimentais e a resistência térmica superficial, foi obtida na norma ISO 6946 (2007) para o fluxo de calor horizontal em recintos fechados.

#### 4.3.2 Modelação dos espaços de ar

A caixa-de-ar do interior da parede foi modelada de duas maneiras. Na primeira abordagem, o ar foi modelado considerando a condutibilidade térmica equivalente de um sólido. Na segunda abordagem, o ar foi diretamente modelado como um fluido, através de um modelo dinâmico de fluidos computacionais (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Esta última abordagem tem como objetivo verificar a precisão da primeira abordagem. Dada a boa precisão obtida e redução significativa no tempo de cálculo, a maioria dos resultados apresentados neste documento foram obtidos utilizando o primeiro modelo.

A condutibilidade térmica equivalente do ar foi retirada da ISO 6946 (2007), que apresenta uma tabela de valores com a resistência térmica equivalente para espaços de ar não ventilados. A resistência térmica de  $0,18 \text{ m}^2\text{.K/W}$  é prescrita para uma caixa-de-ar com uma espessura de 166 mm, assumindo um fluxo de calor horizontal. Usando este valor obtém-se uma condutibilidade térmica equivalente ( $\lambda$ ) de  $0,922 \text{ W/(m.K)}$  através da equação:

$$\lambda = \frac{e}{R} \text{ [W/(m.K)]} \quad (16)$$

com:  $e$  = espessura [m];  $R$  = Resistência térmica [ $\text{m}^2\text{.K/W}$ ].

A segunda abordagem, mais avançada, é utilizada apenas nos modelos 3D, onde se utiliza um modelo CFD. Neste método de cálculo é utilizado o modelo de convecção natural (*buoyancy model*) e o algoritmo de Monte Carlo para a radiação (ANSYS CFX, 2013). A condutibilidade térmica do ar utilizada é de 0,0261 W/(m.K), à temperatura de 25 °C e à pressão de 1 atmosfera (ANSYS CFX, 2013).

Na Subsecção 4.3.4.3 são apresentados os resultados do modelo CFD, que comparativamente aos modelos numéricos, com condutibilidade térmica equivalente a sólido, dão resultados semelhantes, com uma diferença quase nula, de apenas 0,0046 W/(m<sup>2</sup>.K).

### 4.3.3 Simulação numérica 2D

O THERM é um *software* desenvolvido no Lawrence Berkeley National Laboratory (2015) dos EUA, que permite modelar bidimensionalmente a transferência de calor em elementos construtivos. Trata-se de um *software* baseado no método de elementos finitos que fornece o valor do coeficiente de transmissão térmica e a distribuição de temperaturas no elemento em análise, entre outros parâmetros.

A clara limitação deste *software* é o facto de apenas permitir realizar simulações 2D, o que, no caso das paredes em estudo limita a sua utilização, visto as paredes serem atravessadas por elementos metálicos que induzem efeitos tridimensionais. No entanto este *software* permite realizar a modelação das paredes com algumas simplificações, dando resultados fiáveis, motivo pelo qual foi utilizado para aferir alguns resultados que servem para comparar com os resultados experimentais e validar os modelos mais completos a criar no Ansys CFX. É de salientar que este programa tem como grande vantagem a simplicidade e rapidez com que se cria um modelo e se obtém um resultado fiável para elementos 2D.

#### 4.3.3.1 Validação da utilização do *software*

A utilização de modelos numéricos implica a validação dos mesmos, de modo a assegurar a fiabilidade dos resultados. A validação do *software* permite aferir a precisão do algoritmo, devendo ser realizada segundo a ISO 10211 (2007), que estabelece as especificações e casos de teste. Estas especificações incluem os limites geométricos e subdivisões do modelo, as condições de fronteira, de temperatura e as relações a serem utilizadas. O THERM é um *software* que está validado (Tilmans & Orshoven, 2010). No entanto a realização dos procedimentos de validação especificados na norma ISO 10211 (2007) permite validar a boa utilização do *software*.

Esta norma estabelece que para o algoritmo de cálculo do *software* ser classificado como um método de alta precisão bidimensional em estado estacionário, deve dar resultados correspondentes aos dos casos de teste de referência 1 e 2.

Na Figura 4.14 apresenta-se o caso teste n.º 1 realizado no THERM, o qual tem como objetivo calcular as temperaturas em 28 pontos equidistantes, sendo considerado validado o algoritmo de cálculo, caso a diferença entre as temperaturas calculadas pelo *software* e a norma, não excedam 0,1 °C. Neste caso de teste o *software* alcançou exatamente os mesmos valores referidos na norma, que estão colocados na matriz da Figura 4.14.

A Figura 4.15 mostra a concretização dos requisitos do caso de teste 2, sendo atingidas as mesmas temperaturas, que são apresentadas no Quadro 4.3. A taxa de *heat flow* total calculada difere em 0,0079 W/m do padrão, menor que os 0,1 W/m requeridos.

Conclui-se que o THERM está a ser corretamente utilizado, tendo-se verificado os requisitos estabelecidos na ISO 10211 (2007) para o método de alta precisão bidimensional em regime estacionário.

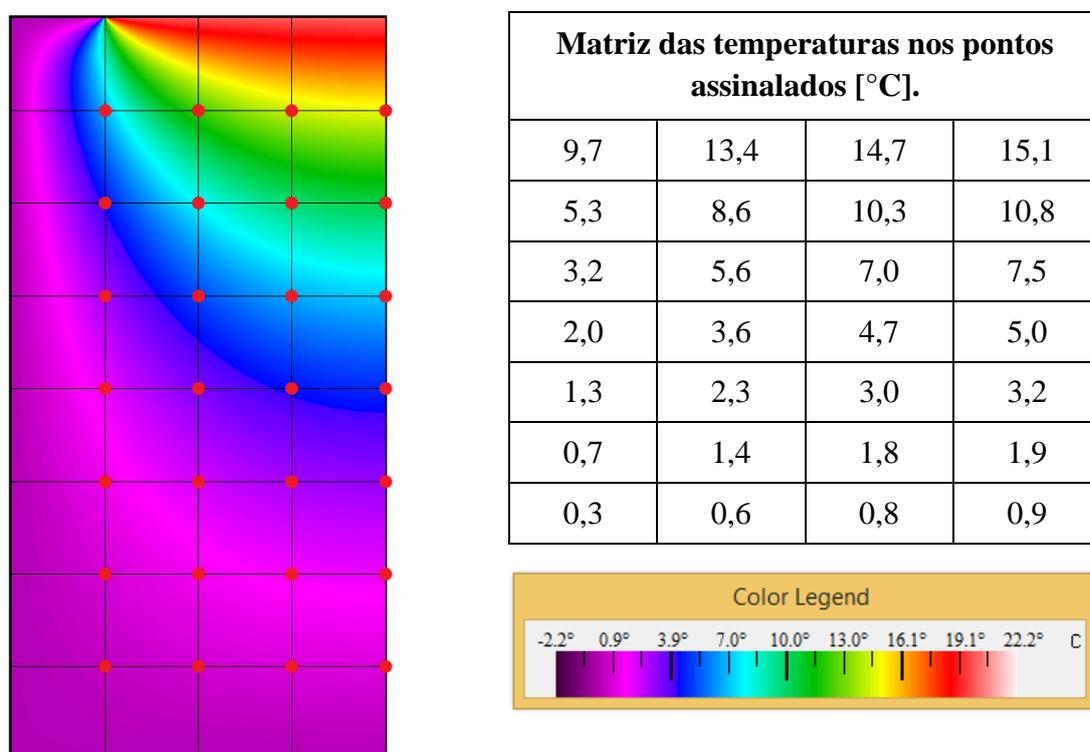


Figura 4.14 – Caso de teste n.º 1 realizado no THERM.

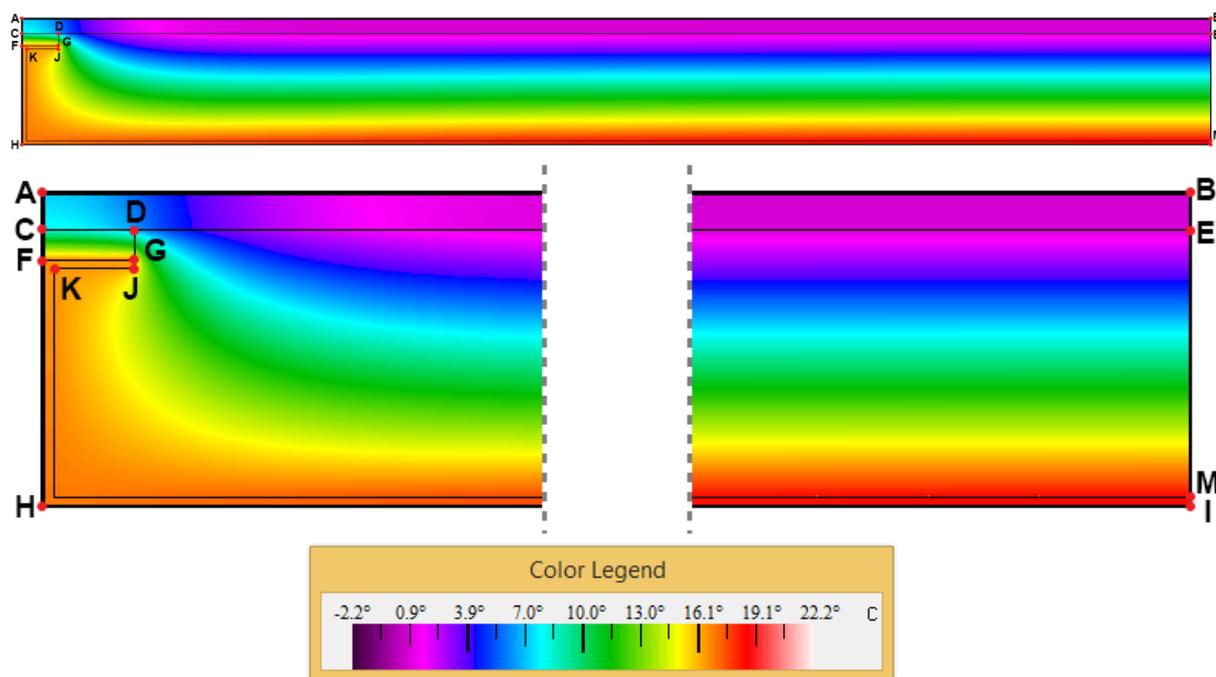


Figura 4.15 – Caso de teste n.º 2 realizado no THERM.

Quadro 4.3 – Resultados do caso de teste n.º 2 realizado no THERM.

Pontos	Temperatura [°C]
A	7,1
B	0,8
C	7,9
D	6,3
E	0,8
F	16,4
G	16,3
H	16,8
I	18,3
Taxa de <i>heat flow</i> total: 9,492 W/m	

#### 4.3.3.2 Modelos 2D

A modelação 2D tem como objetivos: aferir a fiabilidade dos resultados dos modelos 2D, sabendo que a estrutura de aço origina efeitos tridimensionais que não são possíveis de analisar bidimensionalmente com rigor; avaliar a importância da ausência da estrutura metálica

horizontal e diagonal, comparativamente aos modelos 3D; verificar o rigor do *software* realizando comparações com o resultado analítico.

Nos modelos 2D estão estabelecidas as condições de fronteira apresentadas na Subsecção 4.3.1 e utiliza-se a condutibilidade térmica equivalente do ar retirada da ISO 6946 (2007) ( $\lambda=0,922$  W/(m.K)).

A primeira simulação modela a parede sem a estrutura de aço, mantendo-se a restante composição já apresentada no Capítulo 3, a Figura 4.16a ilustra a distribuição de temperaturas na secção horizontal. O objetivo desta simulação é validar o valor de U dado pelo THERM, sabendo-se que por simples cálculo analítico se obtém o valor. Obteve-se em ambas as situações o mesmo valor, com U igual a 0,249 W/(m<sup>2</sup>.K).

Na Figura 4.16b apresenta-se a distribuição de temperaturas na secção horizontal da parede com perfis verticais. Nesta simplificação da estrutura metálica não foram considerados os perfis diagonais e horizontais. O valor de U obtido é de 0,270 W/(m<sup>2</sup>.K), correspondendo a um aumento de 0,0209 W/(m<sup>2</sup>.K), quando comparado com o exemplo anterior. Na Figura 4.16b é evidente o aumento de fluxo de calor nas zonas dos perfis de aço. Conclui-se que os perfis de aço verticais instigam um aumento de 8,4%.

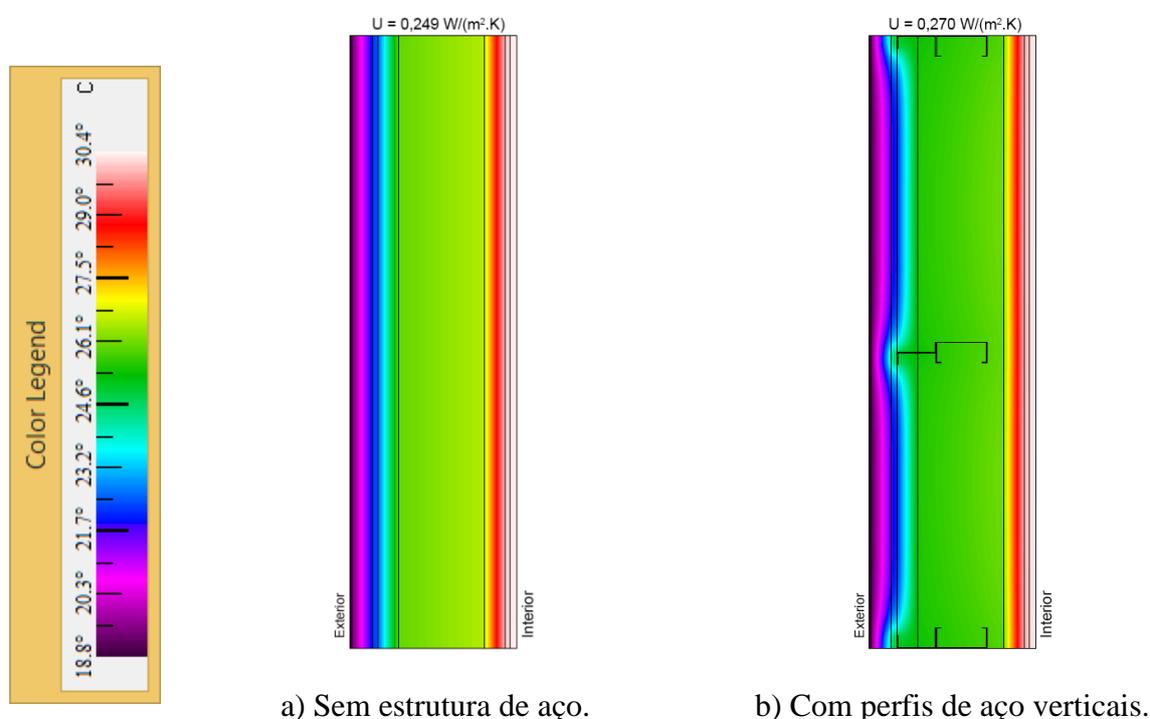


Figura 4.16 – Distribuição de temperaturas na secção horizontal da parede.

#### 4.3.4 Simulação numérica 3D

O modelo 3D detalhado da parede foi realizado com recurso ao *software* de análise por elementos finitos ANSYS CFX (2013). A Figura 4.17 mostra a malha de elementos finitos utilizada para modelar a parede LSF, em que são utilizados 308.189 nós, um número que se verificou ser suficiente, para proporcionar a convergência e para além do qual os resultados não se alteram após a implementação de refinamento adicional.

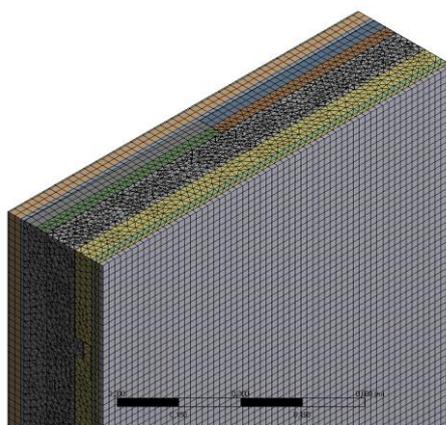


Figura 4.17 – Malha de elementos finitos da parede LSF.

##### 4.3.4.1 Validação da utilização do *software*

Analogamente à validação apresentada para o *software* 2D (Subsecção 4.3.3.1), a ISO 10211 (2007) estabelece que para o algoritmo de cálculo do *software* ser classificado como um método de alta precisão tridimensional em regime estacionário, deve dar resultados correspondentes aos dos casos de teste de referência 1, 2, 3 e 4.

Na Figura 4.18 apresenta-se o caso de teste n.º 1 realizado no Ansys, em que se realizaram duas análises. No modelo da Figura 4.18a utilizaram-se 924 nós e na Figura 4.18b utilizaram-se 72.114 nós, tendo-se obtido a diferença máxima de 0,05 °C. Embora não seja evidente, este *software* é mais rigoroso do que o anterior, devido a no THERM apenas ser possível obter temperaturas com a precisão de uma casa decimal, o que motivou não ser possível aferir a diferença de resultados para com o caso de teste. Verifica-se que o Ansys obteve uma diferença de valores inferior aos 0,1 °C impostos pela norma.

A Figura 4.19 mostra a concretização dos requisitos de caso de teste 2. A diferença máxima de todos os pontos para a temperatura, entre a norma e o modelo realizado, é de 0,048 °C, o que é inferior ao requerido na norma ISO 10211 (2007). A taxa de *heat flow* total calculada difere em 0,031 W/m da norma, valor que é inferior aos 0,1 W/m requeridos.

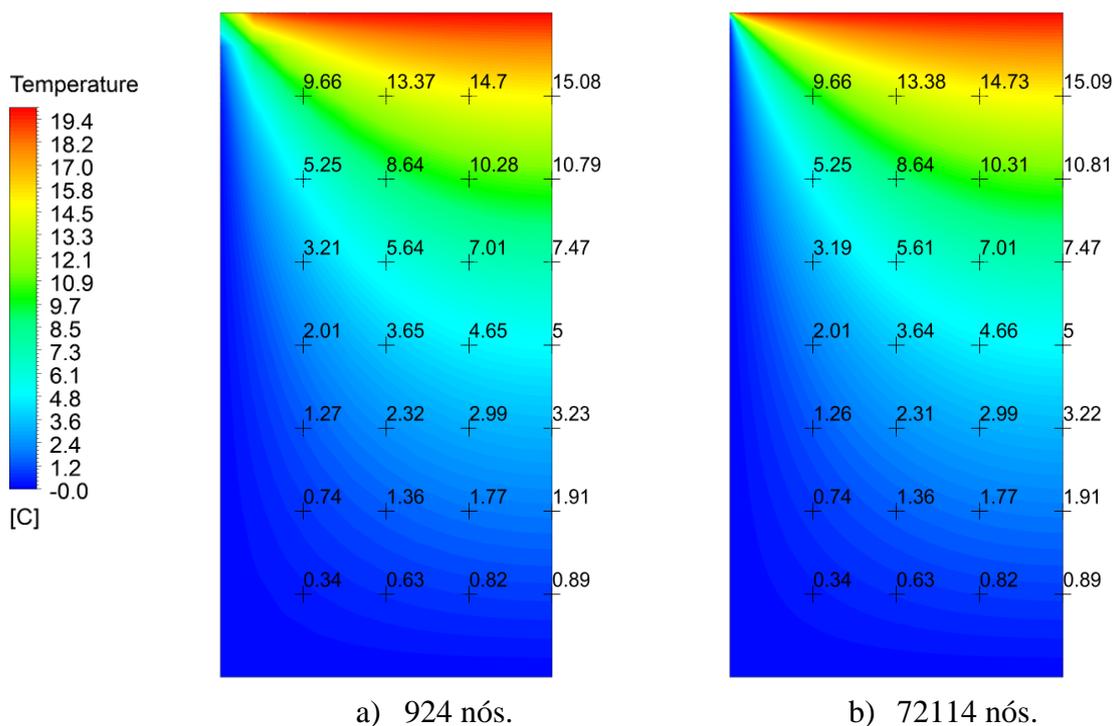


Figura 4.18 – Caso de teste n.º 1 realizado no Ansys

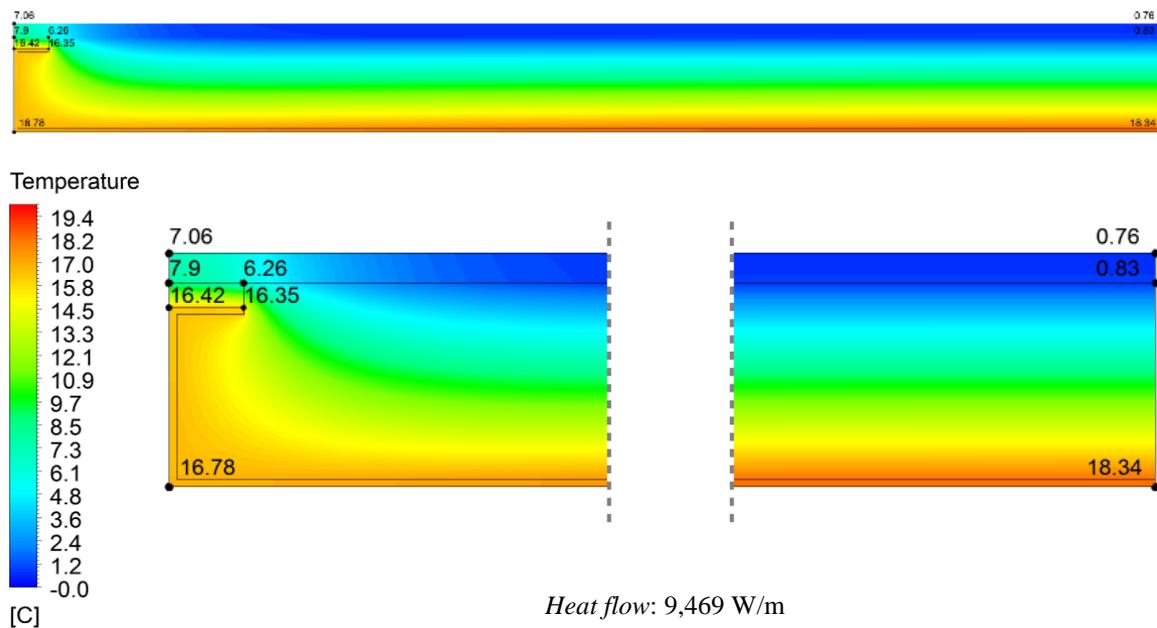


Figura 4.19 – Caso de teste n.º 2 realizado no Ansys

Na Figura 4.20 ilustra-se o caso de teste n.º 3, em que se obtiveram os resultados apresentados no Quadro 4.4. Verifica-se que o *software* cumpre os critérios requeridos na norma para este teste, evidenciando grande precisão.

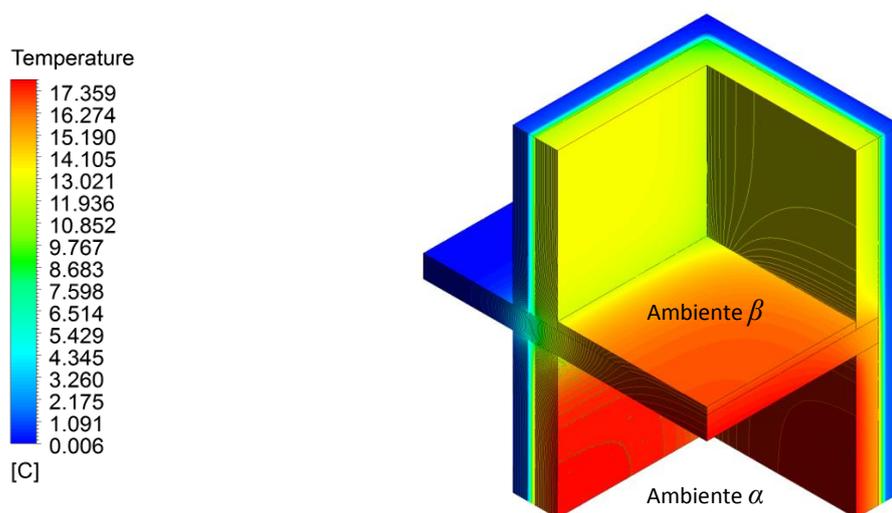


Figura 4.20 – Caso de teste n.º 3 realizado no Ansys

Quadro 4.4 – Comparação entre os valores definidos na ISO 10211 (2007) e *software*, para o caso de teste 3.

Parâmetro medido	Valor esperado	Valor obtido Ansys	Diferença	Limite da diferença
Temperatura mínima ambiente $\alpha$	11,32 °C	11,276 °C	0,044 °C	< 0,1 °C Ok
Temperatura mínima ambiente $\beta$	11,11 °C	11,127 °C	0,017 °C	< 0,1 °C Ok
<i>Heat flow</i> $\alpha$	25,15 W	25,139 W	0,04 %	< 1% Ok
<i>Heat flow</i> $\beta$	34,83 W	34,532 W	0,02 %	< 1% Ok

O caso teste de n.º 4 está ilustrado na Figura 4.21 e no Quadro 4.5 apresenta-se os resultados obtidos, os quais verificam o prescrito na ISO 10211 (2007), mostrando novamente a elevada precisão do *software*.

Conclui-se que o Ansys está a ser corretamente utilizado, tendo-se verificado os requisitos estabelecidos na ISO 10211 (2007) para o método de alta precisão tridimensional em regime estacionário.

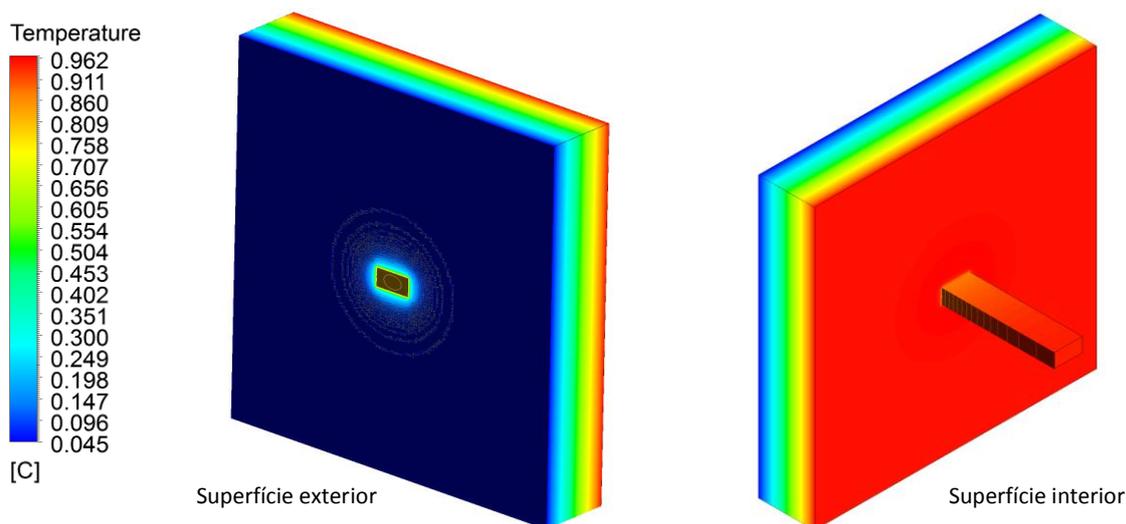


Figura 4.21 – Caso de teste n.º 4 realizado no Ansys

Quadro 4.5 – Comparação entre os valores definidos na ISO 10211 (2007) e *software*, para o caso de teste 4.

Parâmetro medido	Valor esperado	Valor obtido Ansys	Diferença	Limite da diferença
Temperatura máxima na superfície exterior	0,805 °C	0,809 °C	0,003 °C	< 0,005 Ok
Heat flow	0,540 W	0,537 W	0,61 %	< 1% Ok

#### 4.3.4.2 Modelos 3D

Os modelos 3D apresentados nesta subsecção têm como objetivos: aferir a fiabilidade dos resultados dos modelos 3D; estudar a influência da estrutura metálica; e reproduzir as condições experimentais da parede.

Nos modelos 3D da presente subsecção estão estabelecidas as condições de fronteira apresentadas na Subsecção 4.3.1, utiliza-se a condutibilidade térmica equivalente do ar retirada da ISO 6946 (2007) ( $\lambda=0,922 \text{ W}/(\text{m.K})$ ) e considera-se que a periferia da parede é adiabática.

A primeira e segunda modelação são análogas às apresentadas para os modelos 2D (Subsecção 4.3.3.2), em que se modela primeiro a parede sem a estrutura de aço, mantendo a restante composição e no segundo modelo apenas se acrescenta ao anterior os perfis de aço verticais. Na primeira modelação, parede sem estrutura de aço, obteve-se o mesmo valor de  $U$  calculado analiticamente,  $0,249 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Na segunda modelação, parede com a estrutura de aço vertical, obteve-se o valor de  $U$  de  $0,270 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Na Figura 4.22a apresenta-se o fluxo de calor na face exterior da parede, onde é visível o aumento do fluxo de calor na zona dos perfis de aço. Analogamente ao fluxo de calor pode-se observar na Figura 4.22b o aumento da temperatura nas zonas dos perfis metálicos, observando-se uma temperatura média ( $T_m$ ) na face exterior de  $18,84 \text{ }^\circ\text{C}$ .

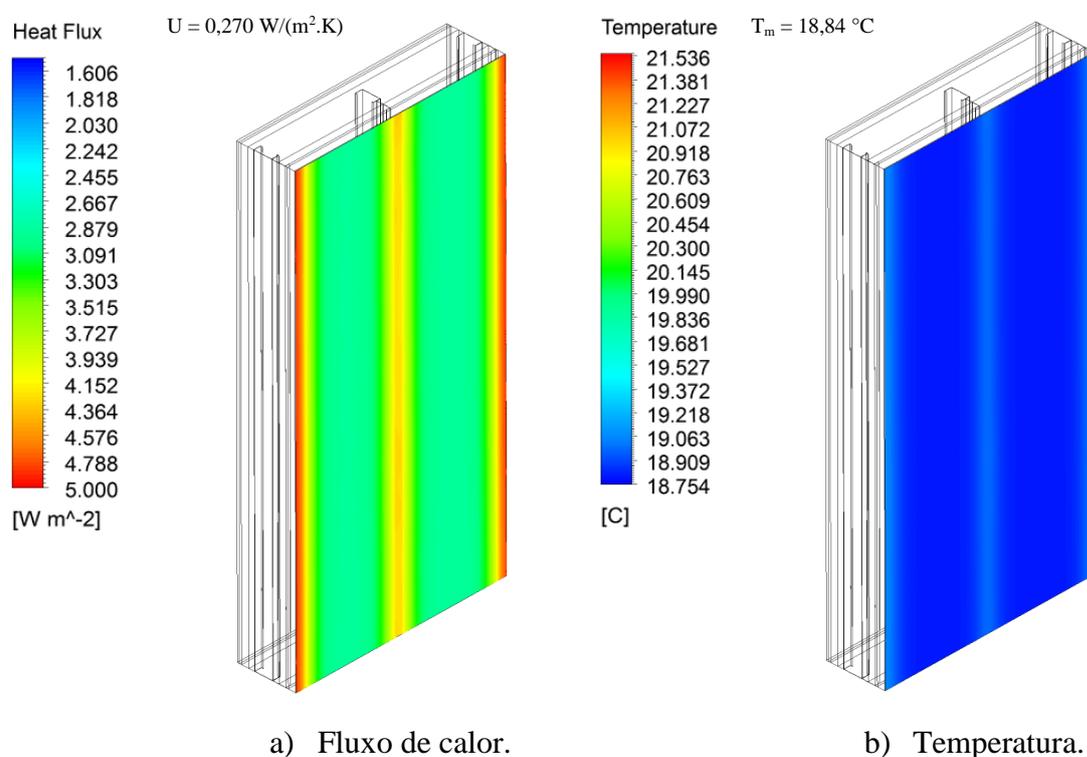
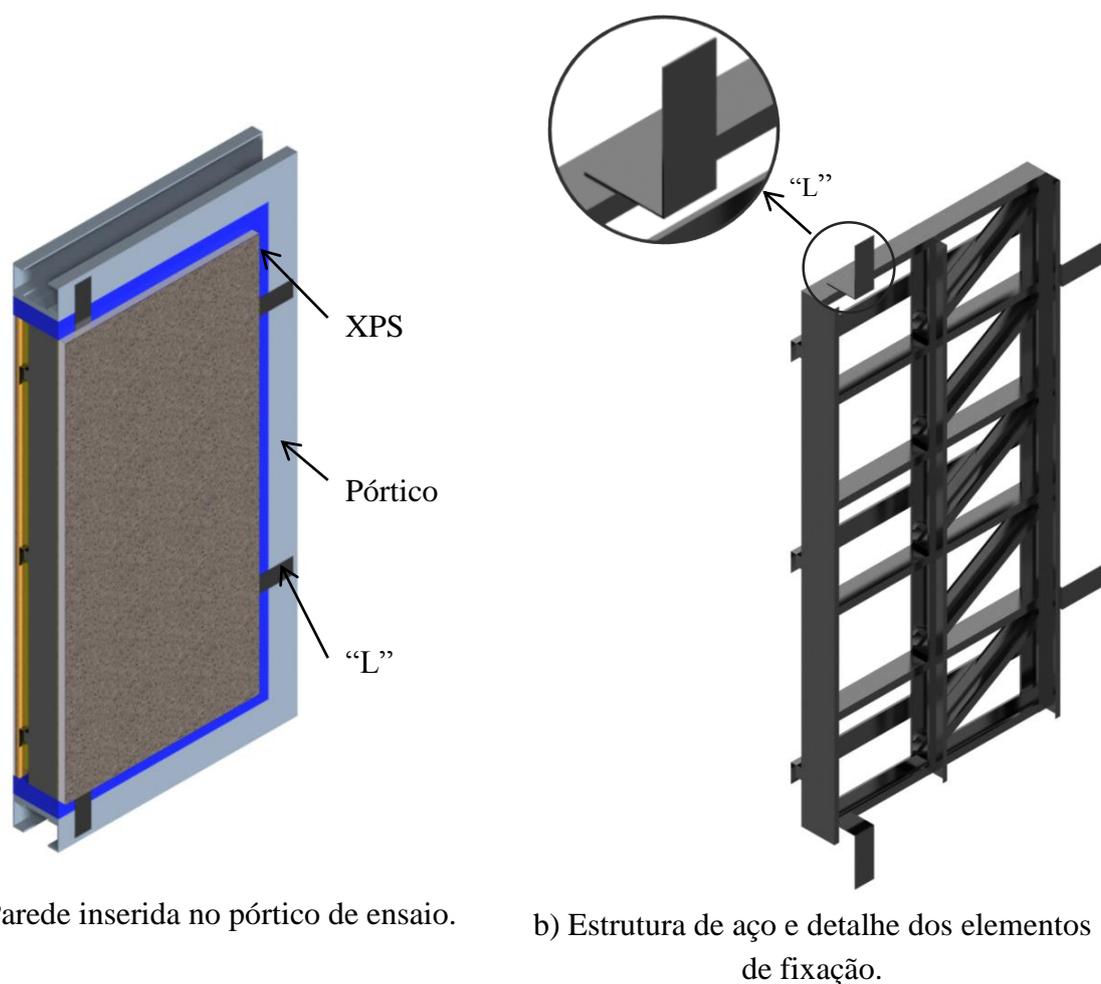


Figura 4.22 – Fluxo de calor e temperatura superficial na superfície exterior, da parede com estrutura de aço vertical.

O terceiro modelo visou reproduzir as condições experimentais em que a parede foi ensaiada. Para o efeito foi realizado um modelo numérico que contempla a parede, as condições de apoio e elementos periféricos à parede. O modelo simula, para além da parede com a estrutura de aço e outras camadas de materiais (Figura 3.1 e Figura 3.3), o perímetro da parede onde está

colocada uma camada de isolamento de poliestireno extrudado (XPS) com 10 cm, os elementos de fixação de aço em forma de "L", e o pórtico de aço da câmara climática, que se ilustra na Figura 4.23. Deste modo o modelo numérico tem em consideração as perdas térmicas que ocorrem pela envolvente periférica da parede.



a) Parede inserida no pórtico de ensaio.

b) Estrutura de aço e detalhe dos elementos de fixação.

Figura 4.23 – Detalhe do modelo 3D da parede com os elementos de suporte e fixação.

Na Figura 4.24 são apresentados os resultados do modelo numérico 3D, que tem em consideração as condições de suporte e fixação já apresentadas. A Figura 4.24a ilustra o fluxo de calor na face exterior e na Figura 4.24b apresentam-se as temperaturas na mesma face. Ambas as imagens são muito similares e mostram os locais onde existem maiores pontes térmicas e onde inerentemente as temperaturas são mais elevadas. Verifica-se que o maior fluxo de calor na periferia ocorre na zona dos elementos de fixação metálicos em forma de "L", e na face da parede ocorre na zona dos perfis de aço verticais.

O coeficiente de transmissão térmica obtido para a face exterior é de  $0,235 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  e a temperatura média da face é  $18,78 \text{ }^\circ\text{C}$ , valores que são mais baixos que os do modelo anterior, em que só existiam perfis verticais de aço. Este facto deve-se à existência de perdas térmicas pelo perímetro envolvente do módulo de parede, algo que não ocorre no modelo anterior que tem envolvente adiabática.

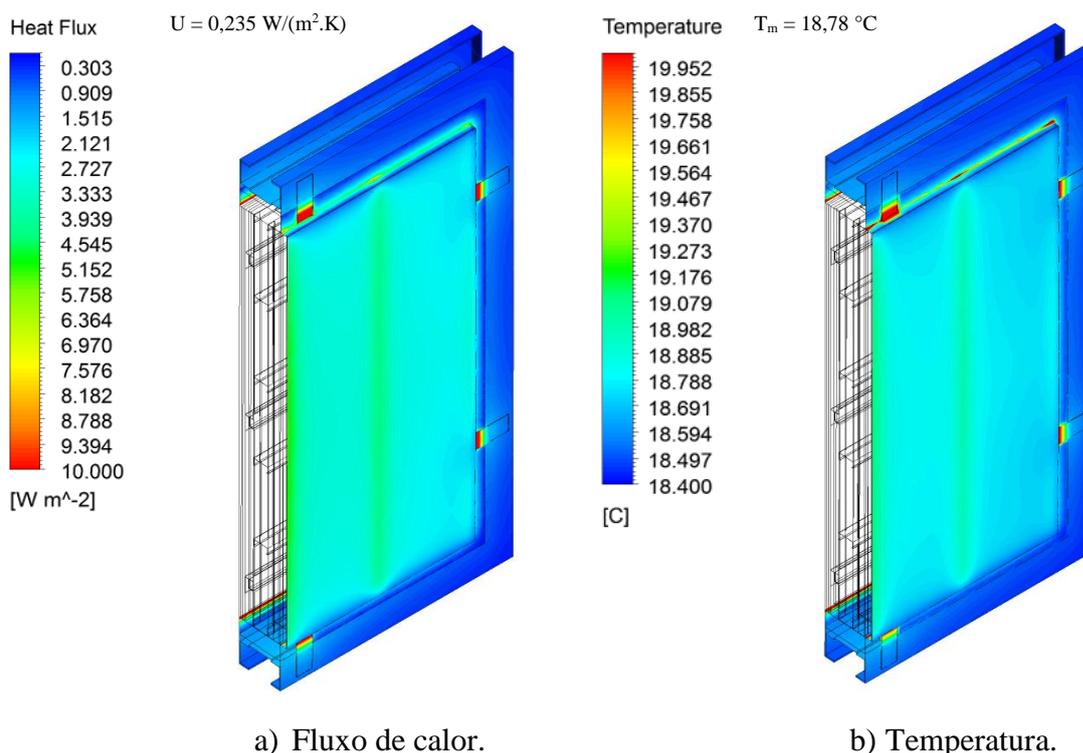


Figura 4.24 – Fluxo de calor e temperatura superficial na face exterior, da parede com os elementos de suporte e fixação.

A Figura 4.25a ilustra o fluxo de calor na face interior, sendo evidente que as zonas de maior fluxo são na periferia, onde não existe isolamento de lã de rocha, apenas existindo ripado de madeira. A segunda zona onde o fluxo de calor é também elevado, ocorre nos três locais onde estão localizados os encaixes metálicos horizontais, que também não existe isolamento térmico. A Figura 4.25b mostra a temperatura superficial interior, onde é visível que a temperatura é mais baixa nas zonas onde ocorre o maior fluxo de calor. Este fato ocorre porque se trata da face quente (interior), o que faz com que as temperaturas sejam mais baixas nas zonas de maior fluxo, acontecimento inverso ao que ocorre na face fria (exterior).

O valor de  $U$  obtido para a face interior é de  $0,452 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  e a temperatura média desta face é  $30,03 \text{ }^\circ\text{C}$ . O valor da transmissão térmica que ocorre na envolvente periférica do módulo de parede, pode ser calculado pela diferença entre o valor de  $U$  que ocorre na face interior da parede e a face exterior, obtendo-se  $0,217 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . A elevada transmissão térmica que ocorre pela periferia mostra a importância das pontes térmicas na periferia dos módulos da parede, temática que vai ser abordada no Capítulo 5.

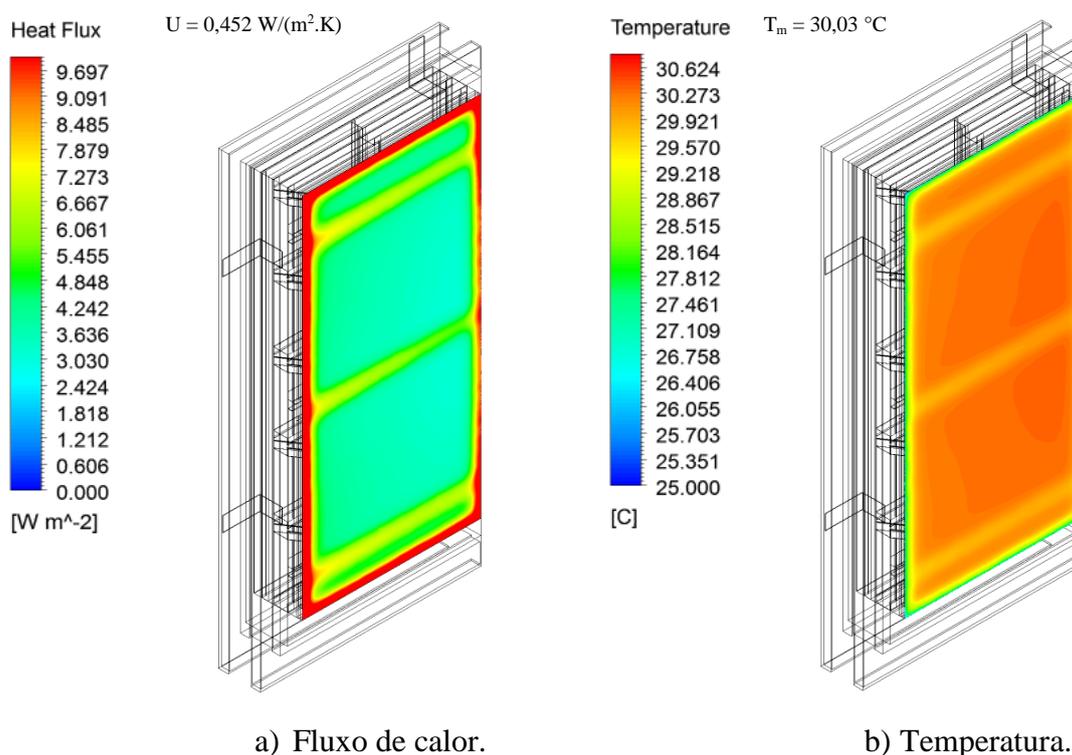


Figura 4.25 – Fluxo de calor e temperatura superficial na face interior, da parede com os elementos de suporte e fixação.

#### 4.3.4.3 Comparativo da modelação dos espaços de ar

Conforme já referido anteriormente a modelação dos espaços de ar pode ser feita de dois modos. Com o objetivo de comparar as diferenças de ambas as abordagens, realizaram-se dois modelos numéricos: (1) ar como um fluido; (2) ar como sólido equivalente. Para ambos os modelos, consideram-se condições de fronteira adiabáticas na envolvente periférica da parede, mantendo-se as restantes condições de fronteira.

A diferença da transmissão térmica entre o modelo fluido (CFD) e o modelo com ar sólido equivalente é de apenas  $0,0046 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , com os valores de  $U$  de  $0,2964$  e  $0,3010 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

respetivamente. Na Figura 4.26a e b é possível observar que as distribuições de fluxo de calor são muito semelhantes, sendo impercetíveis as diferenças. Na Figura 4.26c ilustram-se os vetores velocidade do ar na caixa-de-ar, que se obtém no modelo fluido, o que mostra o efeito da convecção no interior da parede.

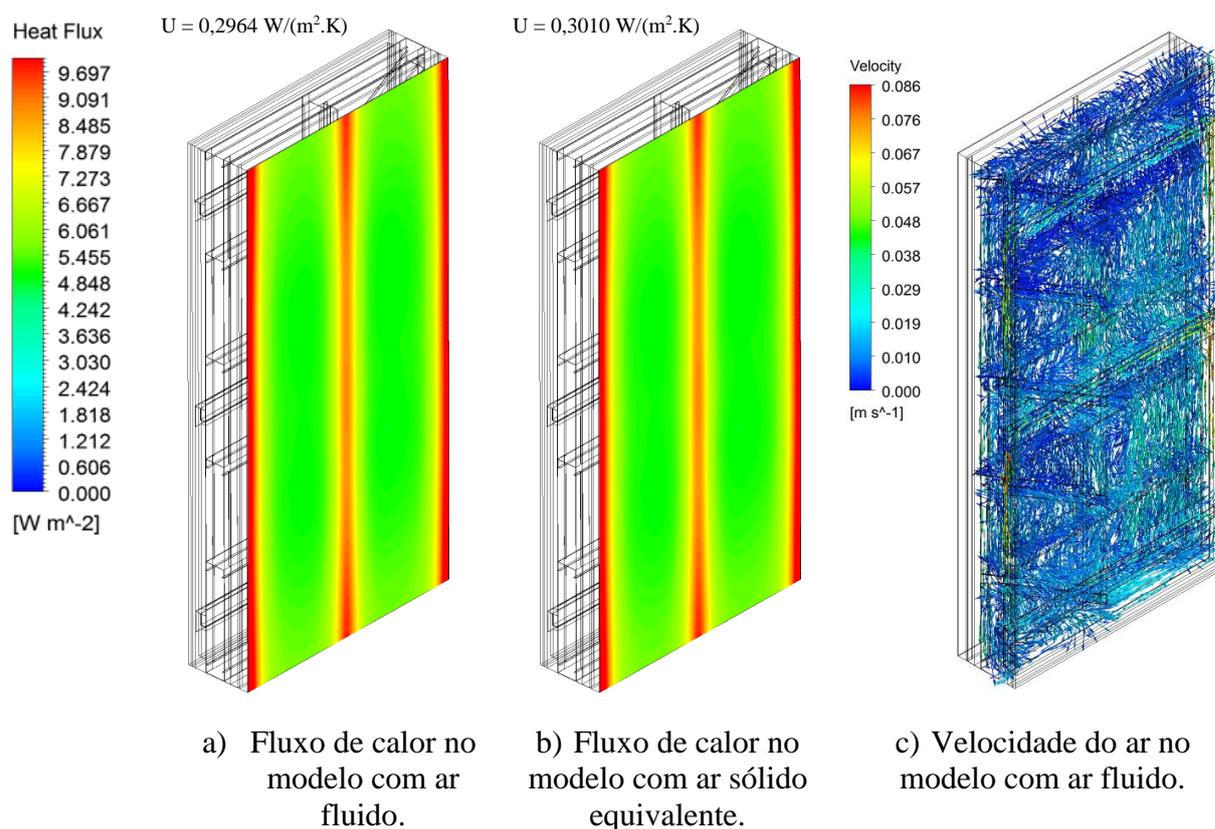


Figura 4.26 – Fluxo de calor na face interior da parede com envolvente adiabática e vetores velocidade do ar.

A diferença de tempo de computação entre ambas as abordagens é considerável, bem como os requisitos computacionais. Num computador com processador DUO a 2.50GHz e RAM de 4GB, os modelos fluidos demoram em média 124 horas e com ar sólido equivalente o tempo diminuí para 26 horas. Devido ao diferencial de tempo, quantidade de modelos numéricos realizados e diminuta diferença de resultados optou-se por utilizar a abordagem de ar sólido equivalente.

#### 4.4 Validação e discussão de resultados

O modelo 3D, que reproduz as condições experimentais, obteve um coeficiente de transmissão térmica global de  $0,235 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , que embora seja ligeiramente mais elevado do que o valor experimental ( $0,214 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), pode ser considerado aceitável, com base nos erros inerentes às abordagens experimentais e numéricas, por exemplo, a precisão dos sensores e a incerteza inerente no cálculo das zonas de influência dos perfis metálicos. Note-se, que os valores numéricos do fluxo de calor utilizados, para prever a transmissão térmica total da parede, são uma média para a totalidade da superfície de parede, em contraste com os valores obtidos na abordagem experimental com os fluxímetros, evitando algumas incertezas, tais como, a quantificação da zona de influência provocada pelos perfis de aço.

No que diz respeito à incerteza dos dados medidos experimentalmente, a precisão dos sensores de temperatura superficial e de fluxo de calor é de  $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\pm 5\%$  respetivamente. Além disso, existem outros fatores, tais como, as imperfeições de construção, a resistência térmica superficial e a definição das áreas de ponderação, necessárias para o cálculo geral da transmissão térmica, de acordo com a Equação (14).

Outra diferença entre o modelo numérico e experimental são os coeficientes de transferência de calor superficial (*Heat transfer coefficient*) interiores e exteriores, obtidos experimentalmente, os quais são iguais a  $6,98$  e  $5,97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  respetivamente. Estes valores são ligeiramente mais baixos do que o previsto pela norma EN ISO 6946 (2007), que prescreve para as condições interiores coeficientes de transferência de calor superficial de  $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , para um fluxo de calor horizontal. Este último foi utilizado nos modelos numéricos, conforme mencionado na Subsecção 4.3.1

No Quadro 4.6 apresenta-se nas primeiras linhas um resumo dos resultados já referidos e nas subsequentes mostram-se duas análises comparativas adicionais. Conforme já referido, nestas verificações adicionais, somente o módulo de parede foi modelado e não as condições de apoio e fixação utilizadas na montagem experimental. Além disso, o modelo de parede foi simplificado, para comparar os resultados, com um modelo FEM bidimensional (*software THERM*) e com a análise analítica para camadas homogéneas contínuas.

Na segunda linha comparam-se os resultados da parede mais simplificada, que não tem perfis de aço, para os quais todos os três modelos (analítico, 2D Therm e 3D Ansys) deram o mesmo valor de  $U$ :  $0,249 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

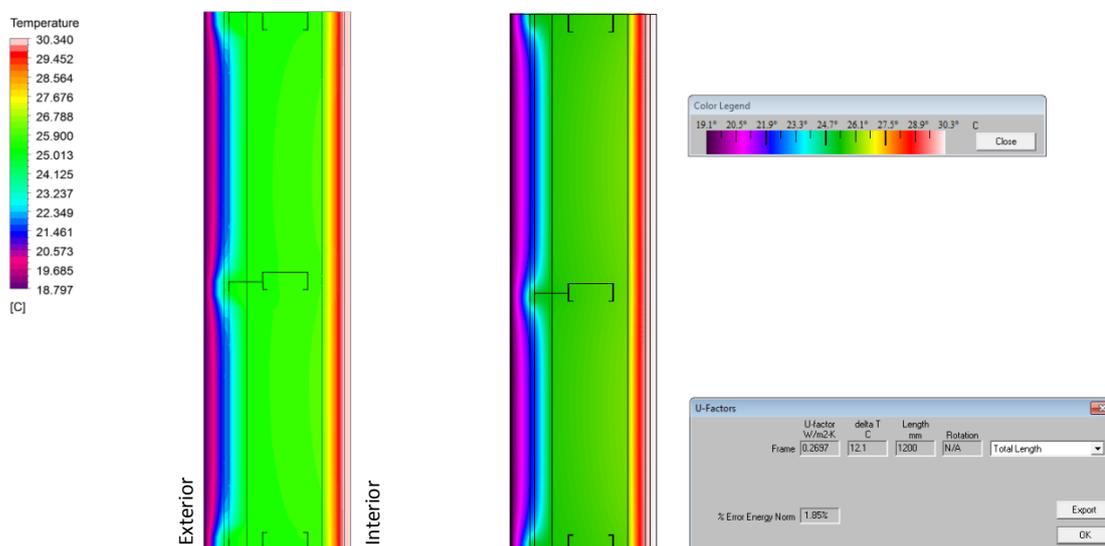
Na terceira linha do Quadro 4.6 compara-se os resultados obtidos nos modelos numéricos em que a parede é apenas composta por perfis de aço verticais. Os valores de  $U$  obtidos para esta parede simplificada foram  $0,270$  e  $0,269 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , nomeadamente para o 2D (Therm) e 3D

(Ansys). Ambos os *softwares* dão valores similares, podendo-se concluir que os modelos dão resultados fiáveis.

Quadro 4.6 – Resumo dos resultados de validação e verificação do modelo FEM 3D.

Descrição do modelo		U [W/(m <sup>2</sup> .K)]			
		Medido	3D FEM	2D FEM	Analítico
Módulo completo da parede com condições de suporte		0,214	0,235	---	---
Apenas módulo de parede	sem perfis de aço	---	0,249	0,249	0,249
	com perfis de aço verticais	---	0,269	0,270	---

A Figura 10 ilustra a distribuição de temperaturas no interior de uma secção transversal horizontal da parede em ambos os modelos, mostrando novamente a boa concordância entre ambos os *softwares*, com ligeiras diferenças perto da face exterior junto aos perfis de aço.



a) Modelo 3D FEM – Ansys CFX.

b) Modelo 2D FEM – Therm.

Figura 4.27 – Distribuição de temperaturas no interior do módulo de secção transversal horizontal da parede com ETICS: apenas perfis de aço verticais.

Adicionalmente foi criado um modelo numérico 3D da parede, com as condições de fixação e suporte iguais ao experimental, mas sem a camada exterior de ETICS. Este modelo é apresentado na Figura 4.28 e pode ser comparado com a Figura 4.12b. Note-se que em ambos os casos, as distribuições de temperatura nas faces exteriores são semelhantes, sendo evidentes as posições dos perfis de aço vertical, estando bem definidas as zonas com a temperatura mais elevadas, originadas pelo maior fluxo de calor nestes locais.

A diferença mais visível entre as distribuições de temperatura na superfície, medidas e previstas, está relacionada com o efeito chaminé (“o ar quente sobe”), que é bastante visível nas imagens termográficas (Figura 4.12b). Este efeito conduz a valores mais elevados na zona superior dos perfis verticais de aço.

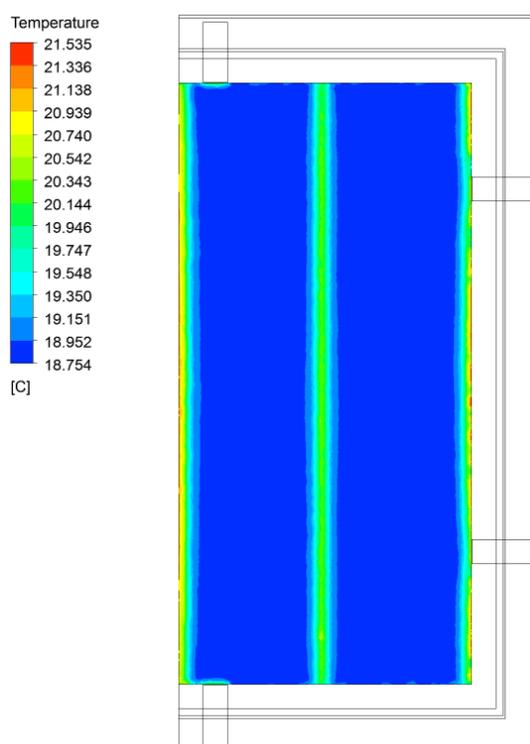


Figura 4.28 – Temperaturas da superfície exterior, previstos pelo modelo FEM 3D: parede sem ETICS.

## 5 ESTUDOS PARAMÉTRICOS

No presente capítulo apresenta-se um conjunto de estudos paramétricos que visam analisar o módulo de parede.

Devido à relevância das perdas térmicas existentes na envolvente das paredes, mesmo em condições laboratoriais (Santos et al., 2014), o primeiro estudo paramétrico incide no estudo da importância das perdas térmicas pela envolvente da parede.

O módulo de parede apresentado no Capítulo 3 tem uma resistência térmica aceitável. No entanto, pode ser melhorado significativamente. Implementando estratégias de mitigação de pontes térmicas e de melhoramento do comportamento térmico, é possível reduzir a transmissão térmica deste módulo de parede significativamente (Martins et al., 2015; Santos et al., 2014). Para o efeito realizam-se dois estudos paramétricos: (1) um analisa a mitigação das pontes térmicas; (2) o outro implementa medidas de melhoria do comportamento térmico.

### 5.1 Importância das perdas térmicas pela envolvente da parede

Para avaliar numericamente a influência das perdas térmicas pela envolvente da parede, no valor de  $U$ , foram realizados vários modelos com diferentes condições de apoio, conforme se apresenta no Quadro 5.1. Note-se que todos os modelos utilizados neste estudo paramétrico, foram obtidos a partir do modelo validado na Subsecção 4.4 (Modelo D), removendo partes, alterando as propriedades do material e definindo diferentes condições no contorno (por exemplo, envolvente adiabática).

O Quadro 5.1 apresenta também os coeficientes de transmissão térmica obtidos e a diferença em relação a um caso de referência (Modelo A), no qual as perdas térmicas pela envolvente são nulas ( $\Delta U$ ), devido à periferia da parede ser adiabática. Também são apresentados para cada modelo dois valores de  $U$ , dependendo da superfície na qual foram obtidos os valores de fluxo de calor: a superfície exterior (fria) e a superfície interior (quente).

Quadro 5.1 – Estudo paramétrico da importância das perdas térmicas pela envolvente da parede: resumo dos modelos e resultados.

Modelo	Descrição do modelo					U [W/(m <sup>2</sup> .K)] (ΔU)	
	Envolvente adiabática	“L”	XPS	Pórtico		Exterior <sup>2</sup>	Interior <sup>2</sup>
				Aço	Madeira		
A	✓					0,301 (---)	0,301 (---)
B	✓	✓				0,264 (-12%)	0,355 (+18%)
C		✓	✓			0,236 (-22%)	0,449 (+49%)
D <sup>1</sup>		✓	✓	✓		0,235 (-22%)	0,452 (+50%)
E			✓	✓		0,245 (-19%)	0,425 (+41%)
F			✓		✓	0,247 (-18%)	0,421 (+40%)
G		✓	✓		✓	0,237 (-21%)	0,447 (+49%)

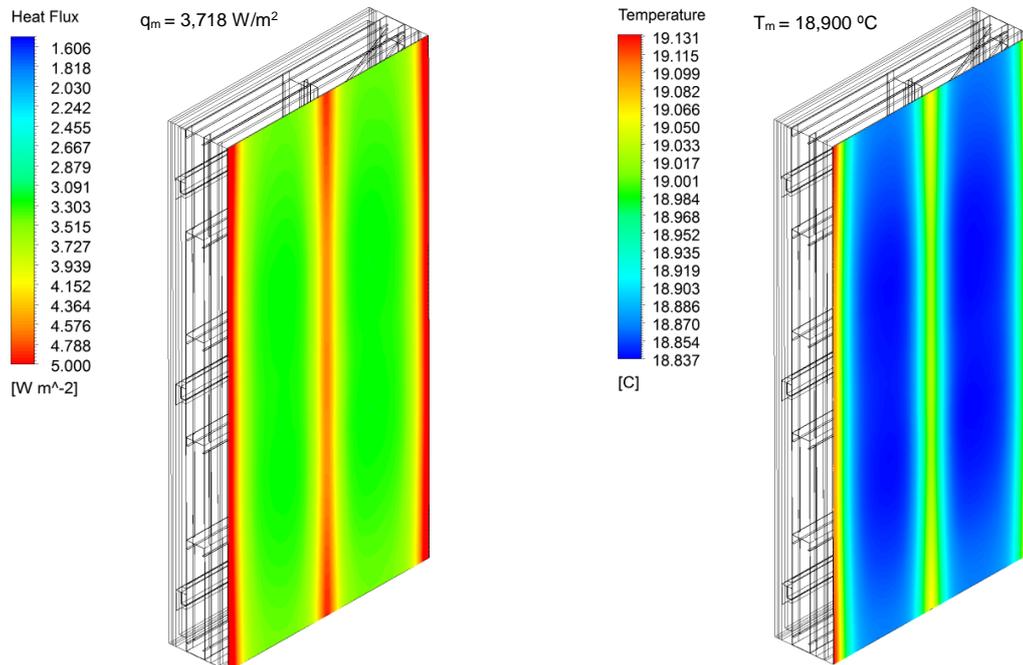
<sup>1</sup> Modelo validado/calibrado por comparação com as medições experimentais (somente fluxo de calor exterior).

<sup>2</sup> Superfície onde foram obtidos os valores de fluxo de calor.

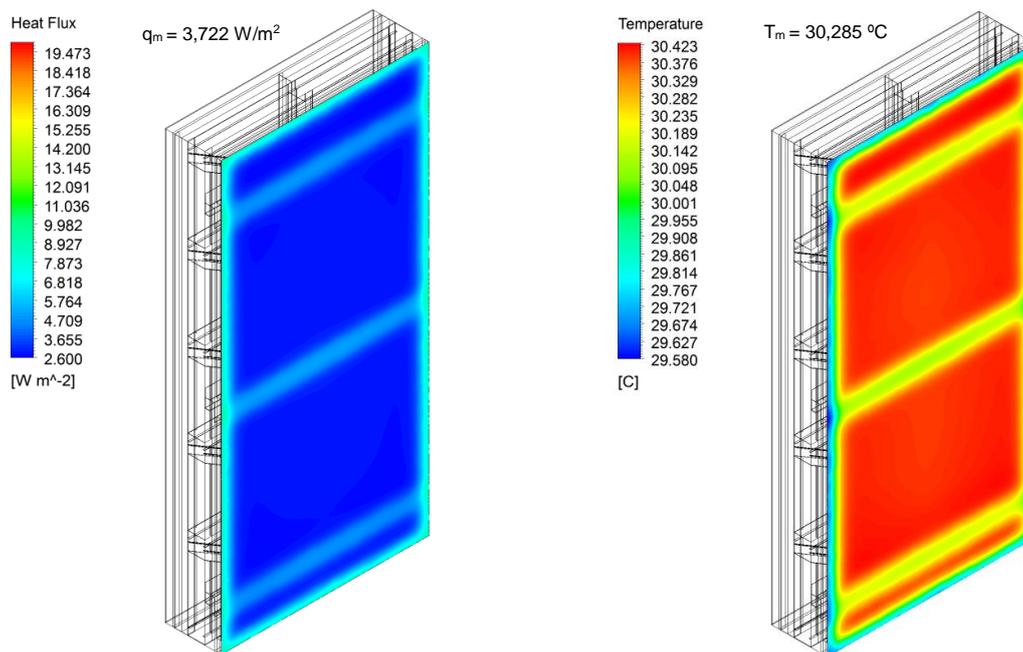
### 5.1.1 Envolvente sem perdas térmicas

Nesta modelação (Modelo A), o valor de U previsto é 0,301 W/(m<sup>2</sup>.K) para ambas as faces da parede, o que era esperado, pois não há perda de calor pela periferia (fronteira adiabática) e, por conseguinte, o valor médio do fluxo de calor em cada uma das faces da parede são iguais. Note-se que este valor é significativamente mais elevado do que o medido experimentalmente, 0,214 W/(m<sup>2</sup>.K), provando a relevância das perdas térmicas pela envolvente periférica da parede, que ocorreram nos ensaios experimentais e se analisam nas subsecções seguintes.

A Figura 5.1 ilustra o fluxo de calor e a distribuição da temperatura da superfície ao longo da parede LSF, assumindo que não há perdas de calor pela envolvente (Modelo A). Na Figura 5.1a são visíveis os efeitos dos perfis de aço verticais na superfície exterior e na Figura 5.1b são perceptíveis as ligações de aço horizontais na superfície interior da parede.



a) Vista exterior.



b) Vista interior.

Figura 5.1 – Fluxo de calor e temperaturas superficiais: Modelo A - envoltive adiabática.

## 5.1.2 Envolvente com perdas térmicas

### 5.1.2.1 Valor de U: fluxo de calor na superfície exterior

Nesta subsecção apresentam-se os valores da transmitância térmica obtida usando a média do fluxo de calor na superfície exterior da parede em LSF, previsto pelo modelo FEM 3D, para diferentes condições de apoio, conforme ilustrado na Figura 5.2 e anteriormente apresentadas no Quadro 5.1.

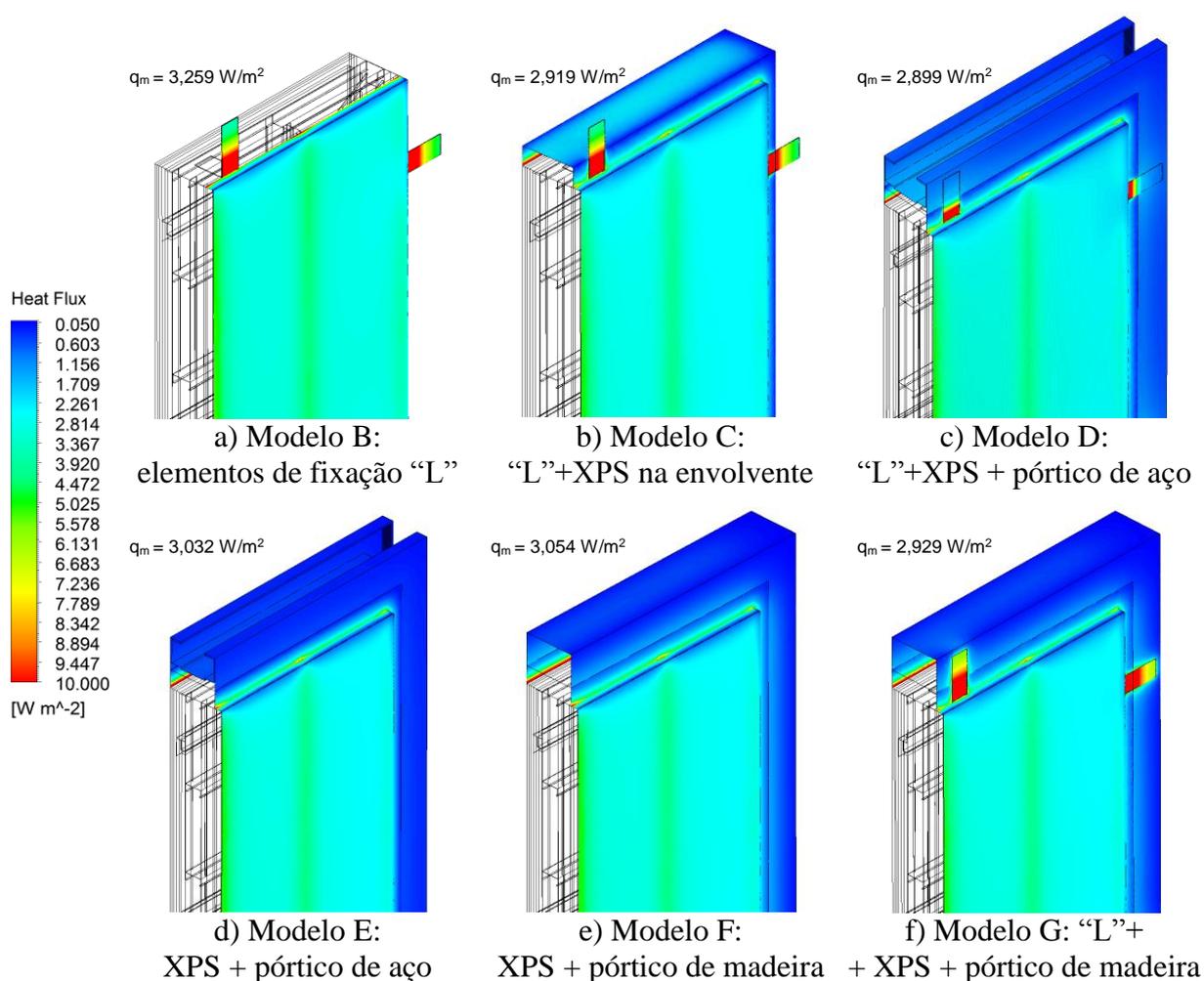


Figura 5.2 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

O Modelo B é baseado no Modelo A, com a adição de elementos de fixação em aço em forma de "L", utilizados nos ensaios experimentais. As condições de fronteira da envolvente mantêm-se adiabáticas, exceto a parte saliente do elemento em "L" e na envolvente lateral do ETICS,

em que foram aplicadas as condições de fronteira da face exterior. Estes elementos de fixação conduzem a uma diminuição do valor de  $U$  de  $0,037 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Este valor corresponde a uma redução de 12% no valor da transmissão térmica, que é devido ao fluxo de calor perpendicular à parede ser inferior, dado passar a existir um fluxo de calor lateral, devido aos elementos de fixação em aço, o que é claramente visível na Figura 5.2a. Adicionalmente, dado que a espessura do ETICS (40 mm) e do revestimento de acabamento (4 mm) serem salientes em relação ao pórtico de suporte, ocorre uma ponte térmica linear geométrica ao longo do perímetro da parede, que é claramente visível na Figura 5.2. Uma vez que toda a superfície da envolvente é adiabática no modelo de referência (Modelo A), deixando de o ser na envolvente do ETICS do Modelo B, existe um incremento de perda de calor pela periferia, levando a uma diminuição no valor de  $U$  quando o fluxo de calor é obtido na superfície da parede exterior.

O Modelo C é similar ao modelo anterior, mas tem uma camada adicional de isolamento de 10 cm de XPS em torno do perímetro da parede (as mesmas condições experimentais de isolamento aplicadas em torno da parede ensaiada). O valor de  $U$  obtido foi  $0,028$  e  $0,065 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  inferior ao dos modelos B e A respetivamente. Estes valores mostram que a camada de isolamento de 10 cm de espessura de XPS, não é suficiente para evitar as perdas térmicas na envolvente, particularmente quando existem chapas de fixação em aço. O fluxo de calor mais baixo (valor absoluto) através da parede do LSF é visível quando se compara a Figura 5.2b e a Figura 5.2a.

O Modelo D é o mesmo modelo que foi validado na Subsecção 4.4, em que existem as mesmas condições de apoio e de fixação realizadas nos ensaios experimentais, ou seja, um pórtico de aço com uma camada de isolamento de 10 cm de espessura de XPS, colocada ao longo do perímetro e vários elementos de fixação de aço em forma de "L", que fixam os elementos modulares da parede. Comparativamente ao modelo anterior, após a adição do pórtico de aço, ocorre uma diminuição no valor  $U$  de  $0,001 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Este pequeno decréscimo mostra que o fluxo de calor está a ocorrer lateralmente no XPS, junto à zona do ETICS, e nas placas de fixação de aço em forma de "L" (Figura 5.2c).

Para avaliar a importância dos elementos de fixação em forma de "L", realizou-se o Modelo E, onde os elementos foram removidos, partindo do princípio de que os módulos de parede foram fixos ao pórtico e XPS com espuma de poliuretano. O valor de  $U$  aumenta ligeiramente para  $0,245 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , em relação ao Modelo D, devido à diminuição das perdas térmicas na envolvente. Em comparação com o caso de referência (Modelo A), a diminuição do valor de  $U$  é de 19%, o que demonstra a importância destes elementos na dissipação de energia.

Os dois últimos modelos (F e G) pretendem avaliar a importância do material constituinte do pórtico (madeira em vez de aço) e o quanto pode afetar o valor de  $U$ . Quando não há elementos de fixação em forma de "L" (Modelos E e F), os valores de  $U$  obtidos são similares, o que corresponde a uma diminuição de 19% e 18% respetivamente. A relevância do material pórtico

aumenta quando os elementos de fixação de aço estão incluídos. Neste caso o Modelo G, com pórtico de madeira, mostra uma diminuição do valor de U mais elevada (21%) e no modelo D, com pórtico de aço, existe um ligeiro aumento (22%).

### 5.1.2.2 Valor de U: fluxo de calor na superfície interior

Esta subsecção apresenta os resultados do cálculo do valor da transmissão térmica da parede com o fluxo de calor obtido na superfície interior da parede (superfície quente), apresentada na Figura 5.3, para as mesmas condições de apoio anteriormente apresentados.

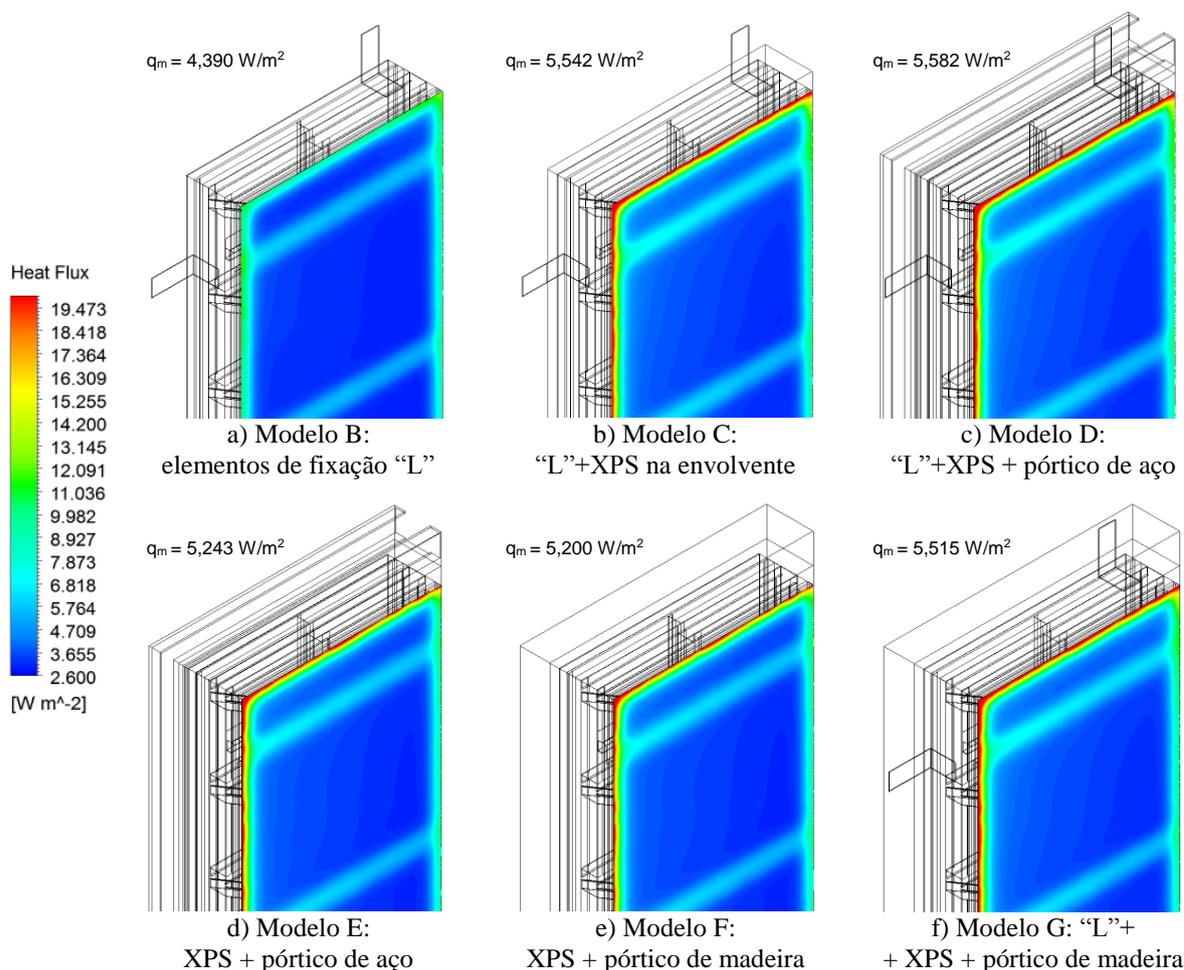


Figura 5.3 – Fluxo de calor: vista da superfície interior.

Comparando-se no Quadro 5.1 os valores de U obtidos na face interior, para os diferentes modelos (condições de apoio), uma nova tendência é observada: os valores de U aumentam quando as perdas de calor na envolvente também aumentam. Este facto era esperado, porque as perdas de calor mais elevadas no perímetro da parede também levam a um fluxo de calor mais elevado na superfície interior da parede (superfície quente, face interior da parede). Este comportamento é oposto ao observado anteriormente, porque a transmissão de calor mais elevada na envolvente leva a uma diminuição dos valores do fluxo de calor na superfície exterior (superfície fria, face exterior da parede). No entanto, o aumento no valor de U é agora muito mais pronunciado (+ 50%) em comparação com a redução anterior nos valores de U (-22%). A razão para esta discrepância é que o fluxo de calor que atravessa a superfície interior da parede é dividido em duas partes, dependendo das condições térmicas de apoio (fluxo de calor pela envolvente): (1) perpendicular - para a superfície exterior da parede (superfície fria) e (2) lateral – ao longo do perímetro da parede.

Mesmo com diferenças nos valores e sinais entre os valores de U obtidos, usando os valores de fluxo de calor da superfície de parede interior e exterior, é possível encontrar algumas semelhanças. O valor de U mais baixo ocorre quando os elementos de fixação de aço em forma "L" são adicionados ao perímetro da parede adiabática, Modelo B (+18%). As maiores diferenças no valor de U ocorreram nos outros modelos (C, D e G), sempre que os elementos de fixação acima mencionados estão presentes (cerca de + 50%). Por último, as diferenças intermédias no valor de U ocorrem nos modelos restantes (E e F), onde não há elementos de fixação (perto de +40%). Em relação a estas três características, a única que é claramente visível na Figura 5.3, é a primeira, isto é, o fluxo de calor na superfície interior da parede do Modelo B (Figura 5.3a) é claramente menor do que em todos os outros. As diferenças entre os modelos C, D e G e modelos E e F não são claramente perceptíveis nas figuras, dado que os valores são muito semelhantes.

## 5.2 Mitigação de pontes térmicas

### 5.2.1 Estratégias isoladas de mitigação de pontes térmicas

Com a finalidade de melhorar o desempenho térmico do módulo de parede apresentado na Figura 3.3, foram implementadas várias estratégias de atenuação das pontes térmicas com base no modelo validado. Os vários modelos e os resultados estão descritos nas subsecções seguintes.

Como mencionado anteriormente, o módulo de parede de referência, Modelo A (Figura 3.3), apresenta condições adiabáticas na periferia, que são condições comuns para todos os modelos

analisados neste estudo paramétrico e são as condições ideais prescritas para ensaios experimentais em laboratório.

### 5.2.1.1 Corte térmico com tiras de borracha

A primeira estratégia de melhoramento (Modelo H) consiste na realização de um corte térmico, através da colocação de tiras de borracha ( $\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) entre os perfis de aço verticais e o painel OSB, sobre a superfície exterior (Figura 5.4). Foram utilizadas duas espessuras de borracha de 5 mm (Modelo H<sub>1</sub>) e 10 mm (Modelo H<sub>2</sub>).



a) Localização das tiras de borracha na parede.

b) Dimensões das tiras de borracha.

Figura 5.4 – Modelo H: com tiras de borracha.

Os modelos H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub> conduzem a uma diminuição de 1,9% e 3,5% no valor de U, respetivamente, correspondendo a valores de U de 0,2954 W/(m<sup>2</sup>.K) e 0,2906 W/(m<sup>2</sup>.K). Estas soluções permitem uma pequena melhoria no desempenho térmico. No entanto, isso pode ser considerado uma boa opção, uma vez que a adição deste componente é económica e fácil de implementar. A Figura 5.5 mostra o fluxo de calor na face exterior dos modelos A, H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>, em que é visível a redução do fluxo de calor, principalmente na zona dos perfis verticais de aço.

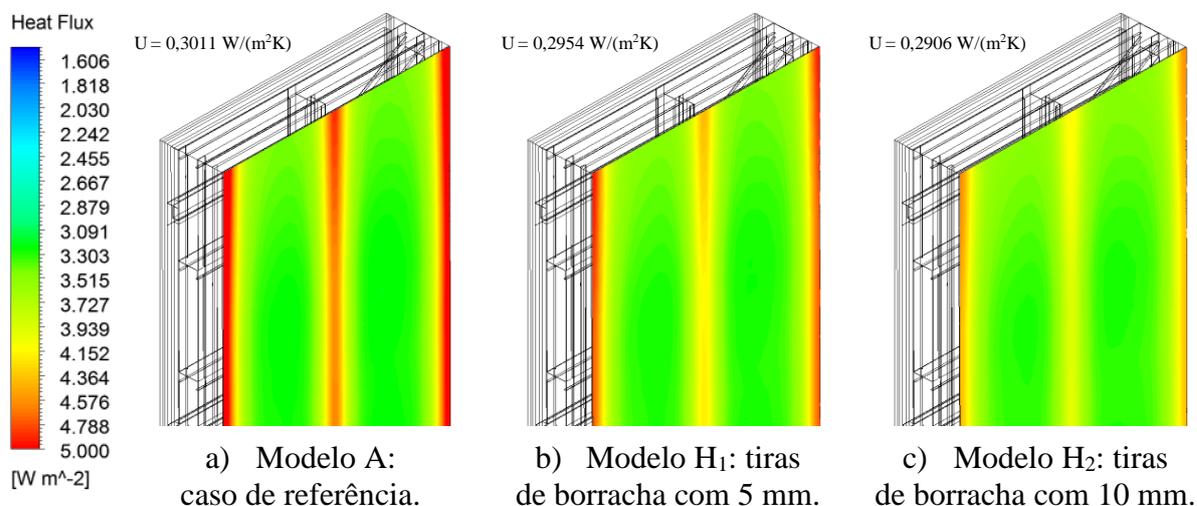


Figura 5.5 – Fluxo de calor no Modelo A e H: vista da superfície exterior.

### 5.2.1.2 Perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea

A segunda estratégia de mitigação consiste na utilização de perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea na alma, entre os módulos de parede (Figura 5.6). Todas as outras características do Modelo A são mantidas. Esta abordagem tem dois tamanhos diferentes para os encaixes de ligação: 15 mm (Modelo I<sub>1</sub>) e 25 mm (Modelo I<sub>2</sub>).

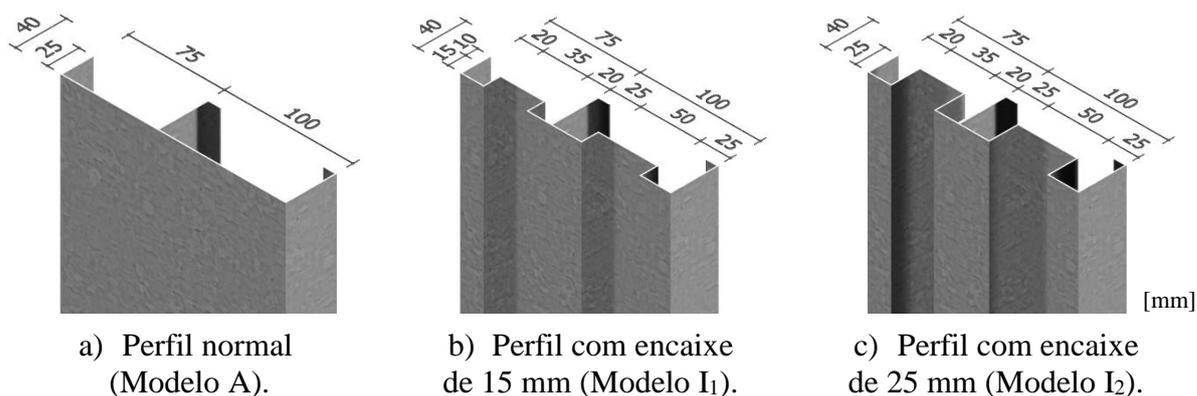


Figura 5.6 – Modelo I: Perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea.

Dos modelos de I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>, conclui-se que os perfis metálicos verticais com encaixes macho/fêmea não melhoram significativamente o valor U, causando um ligeiro aumento de 0,4% e 0,2% no valor de U, o que corresponde a um valor de U de 0,3021 W/(m<sup>2</sup>.K) e 0,3018 W/(m<sup>2</sup>.K). Estes

resultados justificam-se devido ao aumento da quantidade de área de aço no interior da parede, o que leva a um aumento da transferência de calor, devido ao aumento da área de superfície de aço dentro da parede. Embora esta solução não proporcione uma melhoria do desempenho térmico, aumenta a resistência ao corte na direção horizontal perpendicular à parede, na junção entre os módulos, permitindo-lhes trabalhar em conjunto contra as ações perpendiculares à parede (e.g. força do vento). Além disso, aumenta a velocidade de montagem das paredes devido à capacidade de acoplamento entre os módulos. Na Figura 5.7 os modelos I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> mostram um fluxo de calor semelhante ao do modelo A, conforme o esperado.

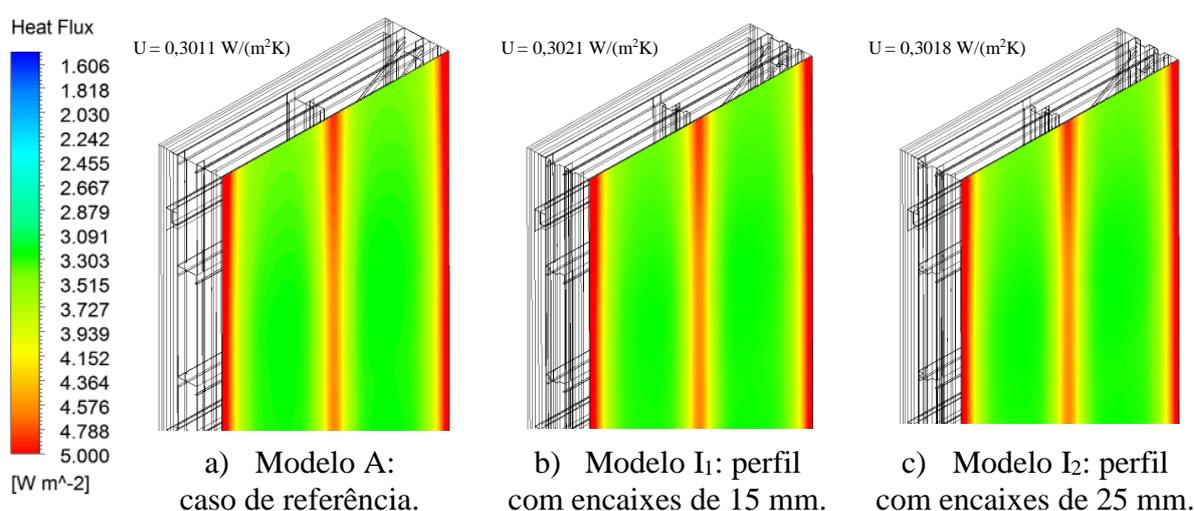


Figura 5.7 – Fluxo de calor no Modelo A e I: vista da superfície exterior.

### 5.2.1.3 Perfis metálicos verticais perfurados

A terceira abordagem de mitigação das pontes térmicas é a utilização de perfis de aço com ranhuras nos perfis verticais (ilustrado na Figura 5.8), mantendo as outras características do Modelo A. Na modelação são consideradas duas diferentes áreas perfuradas. No primeiro (Modelo J<sub>1</sub>) foi removido da alma dos perfis verticais a área de 336,6 cm<sup>2</sup>, o que corresponde a 14% da massa da alma do perfil "C" e 19% da alma dos perfis "U" e "Z". No segundo modelo (Modelo J<sub>2</sub>) foi realizada uma redução de área vertical na alma de 673,2 cm<sup>2</sup>, o que representa 28% da massa na alma dos perfis de "C" e 37% da alma dos perfis "U" e "Z".

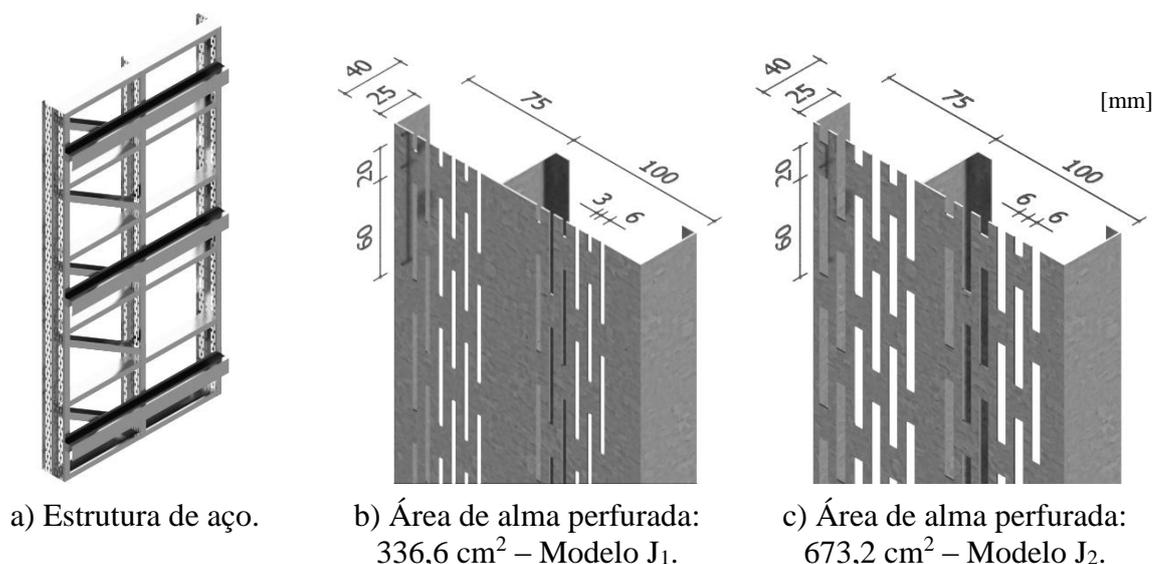


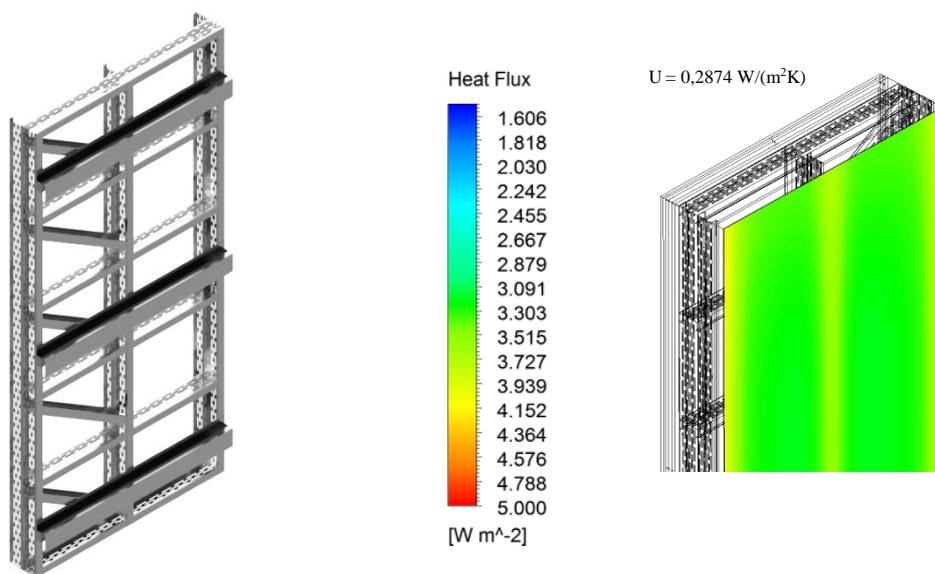
Figura 5.8 – Modelo J: perfis verticais perfurados.

O uso de perfis verticais de aço perfurados, nos modelos de J<sub>1</sub> e J<sub>2</sub>, proporcionam um benefício idêntico à solução das tiras de borracha, com uma melhoria de 3,2% e 3,5% do valor U, respetivamente, correspondendo a um valor de U de 0,2913 W/(m<sup>2</sup>.K) e 0,2904 W/(m<sup>2</sup>.K). Estes valores são mais baixos devido ao facto de a parede ter isolamento exterior. No caso de paredes com isolamento no mesmo plano do aço (manta de isolamento térmico), a melhoria é maior. Note-se que a duplicação da área de perfuração só promove uma redução de 0,3% no valor global da transmissão da parede. Isto deve-se principalmente ao facto de se ter mantido o número de ranhuras, o que confirma a tendência identificado por Blomberg & Claesson (1998).

#### 5.2.1.4 Todos os perfis metálicos perfurados

Para avaliar as vantagens térmicas de ter todos os perfis de aço perfurados, em vez de apenas os perfis verticais (Modelo J<sub>1</sub> e J<sub>2</sub>), foi criado um novo modelo, conforme ilustrado na Figura 5.9.

Este modelo demonstra que é possível reduzir em 4,54% o valor U com todos os perfis de aço perfurados, o que conduz a um valor U de 0,2874 W/(m<sup>2</sup>.K).



a) Materiais da parede.

b) Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

Figura 5.9 – Modelo J<sub>3</sub>: todos os perfis de aço estrutural perfurados (exceto conexões horizontais).

### 5.2.1.5 Parafusos de fixação em substituição do encaixe horizontal em aço

A fim de reduzir as pontes térmicas criadas pelas ligações horizontais em aço, são modelados nove parafusos, em substituição destes elementos. A Figura 5.10 mostra a localização dos parafusos na parede.

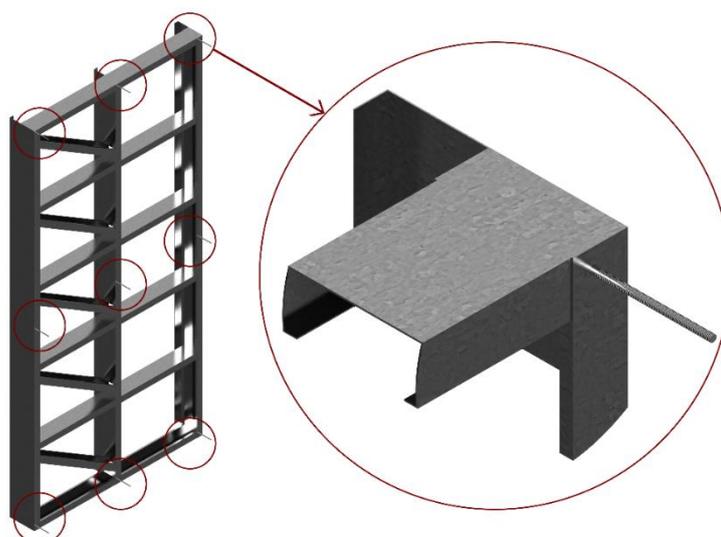


Figura 5.10 – Modelo K: 9 parafusos em substituição dos encaixes horizontais de aço.

O Modelo K mostra que é possível reduzir em 2,1% o valor de U, removendo as conexões de aço horizontais existentes no Modelo A e substituindo-os por parafusos. O valor de U obtido é de 0,2949 W/(m<sup>2</sup>.K).

## 5.2.2 Estratégias combinadas para mitigação das pontes térmicas

Para melhorar o desempenho térmico da parede vários modelos foram criados, onde se combinam as soluções anteriormente apresentadas, conforme se mostra nas subsecções seguintes.

### 5.2.2.1 Combinação de: tiras de borracha, perfis de aço verticais perfurados e ligações aparafusadas

O Modelo L é a combinação dos aperfeiçoamentos introduzidos no: Modelo H<sub>2</sub> com tiras de borracha de 10 mm; Modelo J<sub>2</sub> com perfis de aço verticais perfurados; e Modelo K com ligações aparafusadas. A Figura 5.11a mostra os pormenores do módulo de parede.

Neste modelo, foi conseguida uma melhoria do valor de U de 7,6%, o que corresponde a um valor de U de 0,2782 W/(m<sup>2</sup>.K). A Figura 5.11b mostra o fluxo de calor do Modelo L, que em comparação com a Figura 5.5 (Modelo A e H) mostra uma redução do fluxo de calor, especialmente nas proximidades dos perfis de aço verticais.

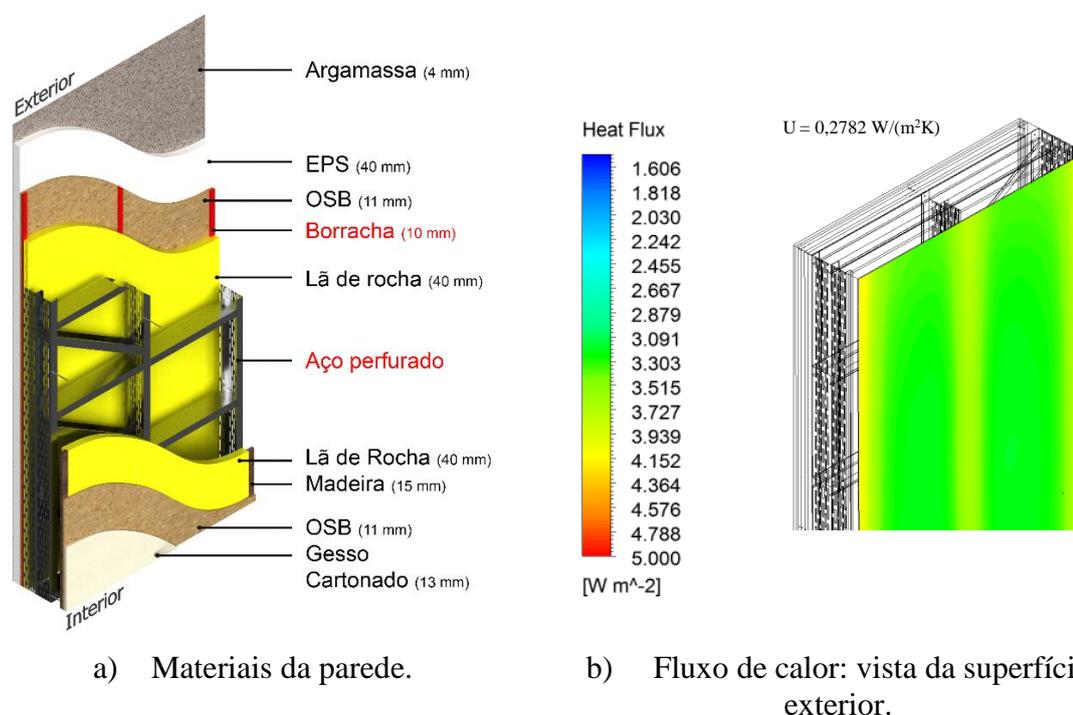


Figura 5.11 – Modelo L: tiras de borracha com 10 mm, perfis verticais de aço perfurados e 9 parafusos de fixação.

### 5.2.2.2 Combinação de: tiras de borracha, todos os perfis de aço perfurados e conexões aparafusadas.

Modelo M é semelhante ao modelo L mas com toda a estrutura de aço perfurada na alma (Figura 5.12a). Este modelo proporciona um melhor resultado, com o valor de U de 0,2762 W/(m<sup>2</sup>.K), o que corresponde a uma melhoria de 8,3%. A Figura 5.12b ilustra o fluxo de calor na superfície exterior da parede que é semelhante ao Modelo L.

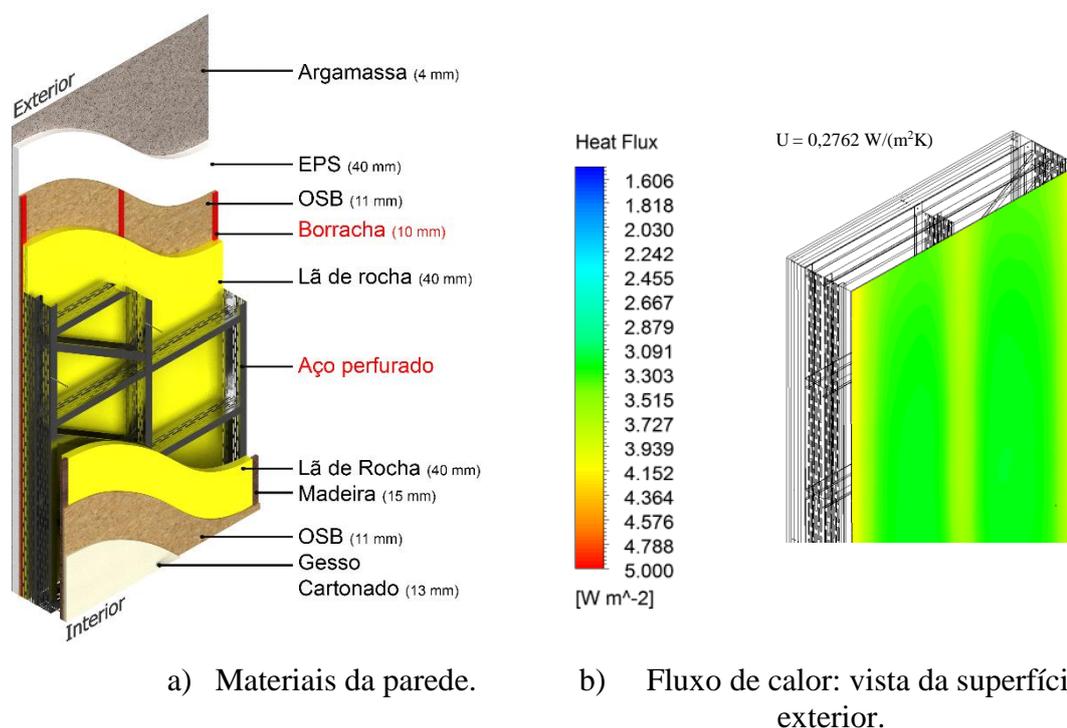


Figura 5.12 – Modelo M: tiras de borracha com 10 mm, perfis de aço perfurados e 9 parafusos de fixação.

### 5.2.3 Resultados: visão geral e discussão

O Quadro 5.2 apresenta uma visão geral dos valores do coeficiente de transmissão térmica, obtidos para todos os modelos e a diferença da transmissão térmica ( $\Delta U$ ) entre cada modelo e o modelo de referência (Modelo A). Todos os modelos têm condições adiabáticas na envolvente e são variações do Modelo A. São usadas quatro casas decimais na apresentação dos valores U, para aumentar a precisão na análise de comparação. A Figura 5.13 apresenta uma ilustração dos resultados para cada modelo da parede e mostra a percentagem de redução obtida no valor de U entre cada modelo e o modelo de referência (Modelo A).

Quadro 5.2 – Estudo paramétrico para a mitigação das pontes térmicas: resumo dos modelos e resultados.

Modelo	Descrição do modelo				U [W/(m <sup>2</sup> .K)] (ΔU)	
	Sem conexões de aço horizontais	Tiras de borracha	Perfis de aço macho/fêmea	Perfis de aço perfurados		
Estratégias isoladas	A				0,3011 (-----)	
	H <sub>1</sub>		✓ 5 mm		0,2954 (-1,9%)	
	H <sub>2</sub>		✓ 10 mm		0,2906 (-3,5%)	
	I <sub>1</sub>			✓ 15 mm	0,3021 (+0,4%)	
	I <sub>2</sub>			✓ 25 mm	0,3018 (+0,2%)	
	J <sub>1</sub>				✓ 14 % só vertical	0,2913 (-3,2%)
	J <sub>2</sub>				✓ 28 % só vertical	0,2904 (-3,5%)
	J <sub>3</sub>				✓ 28%	0,2874 (-4,5%)
	K	✓ 9 parafusos				0,2949 (-2,1%)
Estratégias combinadas	L	✓ 9 parafusos	✓ 10 mm	✓ 28 % só vertical	0,2782 (-7,6%)	
	M			✓ 28%	0,2762 (-8,3%)	

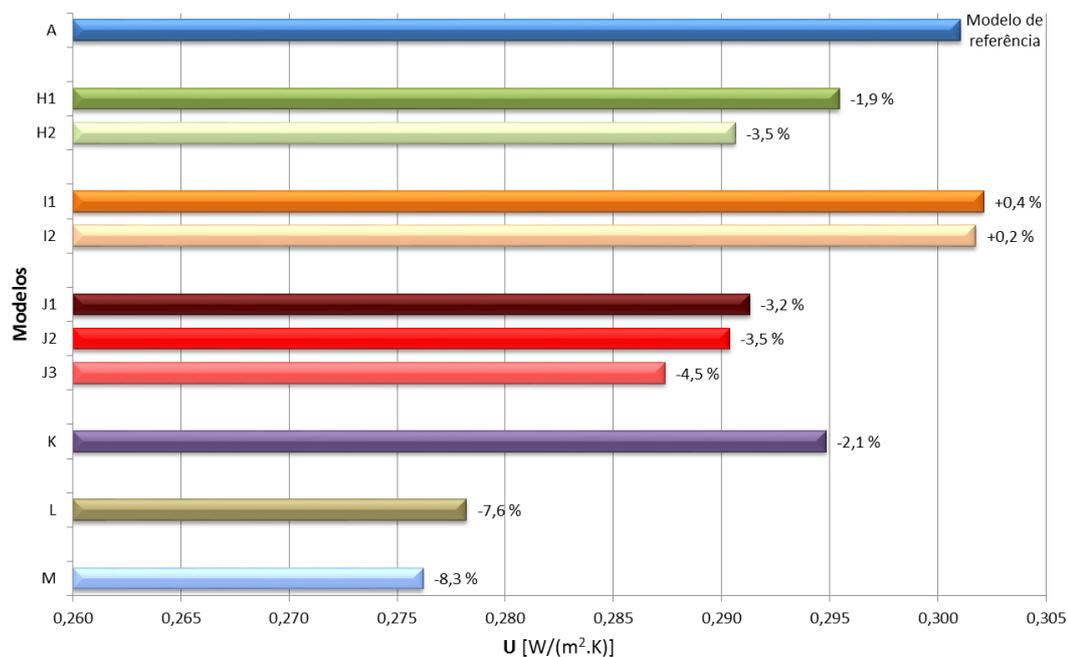


Figura 5.13 – Estudo paramétrico: Resumo dos resultados para os modelos de mitigação das pontes térmicas.

A melhor solução combina tiras de borracha (10 mm), perfis de aço perfurados e conexões aparafusadas, identificado como Modelo M. O valor de U foi reduzido de 0,3011 W/(m<sup>2</sup>.K), do modelo de referência A, para 0,2762 W/(m<sup>2</sup>.K), o que corresponde a uma redução de 8,3% no valor de U, o que representa uma boa melhoria do desempenho térmico do módulo de parede, tendo em conta que as espessuras e materiais de isolamento térmico são os mesmos. Note-se que a parede sem perfis de aço tem uma redução de 11,01% e as estratégias de atenuação para as pontes térmicas atingem uma redução de 75% do seu impacto.

A estratégia isolada mais eficiente de mitigação das pontes térmicas é a inclusão de perfis de aço perfurado em toda a estrutura, Modelo J<sub>3</sub>, o que permite obter uma redução da transmissão térmica de 4,54%. Isto pode ser considerado uma boa melhoria do desempenho térmico, uma vez que tem um pequeno impacto no custo. No entanto, deve ser tido em consideração a redução da resistência mecânica da estrutura de aço, principalmente, para paredes de suporte de carga (Salhab & Wang, 2008; Veljkovic & Johansson, 2007).

Com os estudos efetuados, pode-se concluir que o módulo de parede está otimizado a fim de minimizar as pontes térmicas. Se existir a necessidade de melhorar o valor de U, a estratégia deve ser o aumento do isolamento térmico. Com esse objetivo, diversos modelos adicionais foram analisados e vão ser apresentados na próxima subseção.

### **5.3 Medidas de melhoria do desempenho térmico**

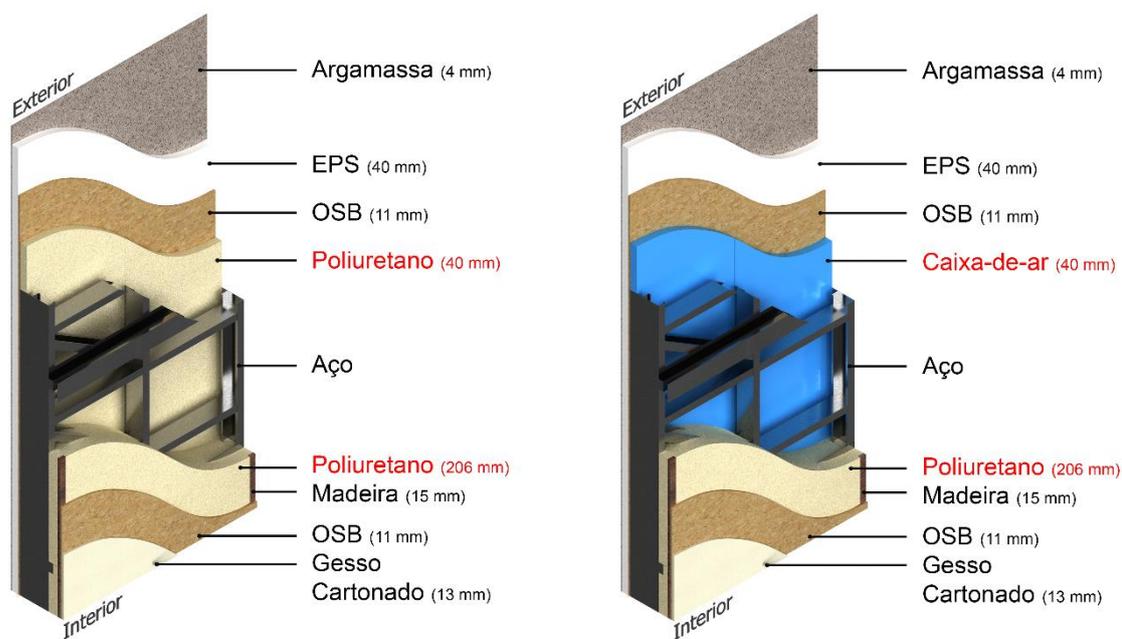
Para conseguir uma diminuição do valor de U da parede modular LSF, muitas alternativas podem ser consideradas, por exemplo: outros sistemas de isolamento, colocação de mais isolamento e materiais de isolamento com desempenho térmico superior. Neste estudo, foi decidido manter a espessura da parede. Foram considerados três sistemas de isolamento: espuma de poliuretano, com um  $\lambda$  de 0,028 W/(m.K); manta de isolamento de aerogel de sílica, com um  $\lambda$  de 0,015 W/(m.K); e painéis rígidos de isolamento a vácuo (VIPs), com um  $\lambda$  de 0,007 W/(m.K).

#### **5.3.1 Estratégias isoladas de melhoria**

##### **5.3.1.1 Espuma de poliuretano**

Como estratégias individuais para melhorar o valor de U, foram criados dois modelos com espuma de poliuretano. No Modelo N substitui-se a lã de rocha e preenche-se a caixa-de-ar existente no Modelo A por espuma de poliuretano, conforme ilustrado na Figura 5.14a. No Modelo O é colocada uma camada de poliuretano em substituição da caixa-de-ar e da camada

interior de lã de rocha do Modelo A. A camada de lã de rocha colocada no lado exterior, existente no modelo A, é substituída por uma caixa-de-ar, conforme se ilustra na Figura 5.14b.



a) Modelo N: substituição da caixa-de-ar e lã de rocha por espuma de poliuretano.

b) Modelo O: substituição da caixa-de-ar interior e da lã de rocha por espuma de poliuretano e substituição de lã de rocha exterior por uma caixa-de-ar.

Figura 5.14 – Modelos da parede com espuma de poliuretano.

O Modelo N alcançou uma melhoria significativa, reduzindo o valor de U em 46,4%, devido à substituição da caixa-de-ar e da camada de lã de rocha por poliuretano, o que corresponde a um valor U de  $0,1615 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Salienta-se que esta solução, de preencher a camada de ar existente por espuma de poliuretano, preenche todos os espaços internos da parede, inclusive os espaços internos entre perfis de aço. Existe assim uma diminuição no fluxo de calor na vizinhança da estrutura de aço, conforme está ilustrado na Figura 5.15a.

Embora esta permita uma boa melhoria do desempenho térmico, esta solução pode ter um inconveniente funcional relacionado com a falta de uma caixa-de-ar, se e sempre que se verifique uma infiltração de humidade ou condensação. Assim, o Modelo O apresenta uma caixa-de-ar com 40 mm, relativamente ao modelo anterior. Esta solução proporciona uma redução de 37,7% no valor de U, com  $0,1876 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , o que é 8,7% pior do que o modelo

anterior. A Figura 5.15b mostra que o decréscimo de fluxo de calor é um pouco menor do que no modelo N.

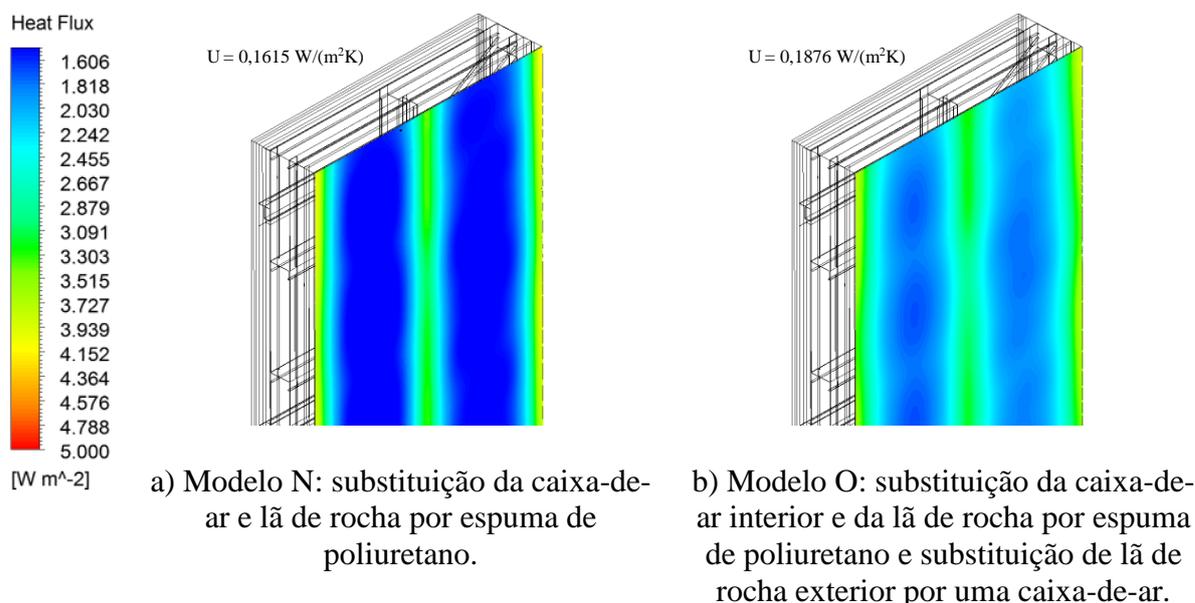


Figura 5.15 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

### 5.3.1.2 Manta isolante de aerogel de sílica

A manta isolante de aerogel de sílica tem uma dupla função (à semelhança da lã de rocha), melhorando tanto a proteção contra incêndio como o desempenho térmico. Nesta abordagem, foram usadas três soluções, com camadas de espessura de 30 mm. No primeiro modelo (Modelo P) o isolamento de aerogel foi colocado no lado interior, entre a lã de rocha interior e a caixa-de-ar. Na segunda abordagem (Modelo Q), o aerogel foi posicionado no lado exterior, entre a lã de rocha exterior e a caixa-de-ar. Na terceira abordagem (Modelo R), as mantas de aerogel foram posicionadas em ambos os lados, conforme se ilustra na Figura 5.16.

A principal diferença entre os dois primeiros modelos (Modelo P e Q), é a posição do isolamento na parede, sendo atingido o melhor valor de U na solução em que o aerogel é colocado no lado interior (Modelo Q), 0,2295 vs 0,2356 W/(m<sup>2</sup>.K). Como esperado, o Modelo R obtém o melhor valor de U, 0,1889 W/(m<sup>2</sup>.K), o que representa uma melhoria de 37,5%. Comparando a Figura 5.17a, b e c, é possível ver a influência da localização do isolamento. Na Figura 5.17c há um claro melhor desempenho, como resultado de se ter duas vezes mais isolamento de aerogel.



Figura 5.16 – Modelo R: com manta de isolamento de aerogel em ambos os lados.

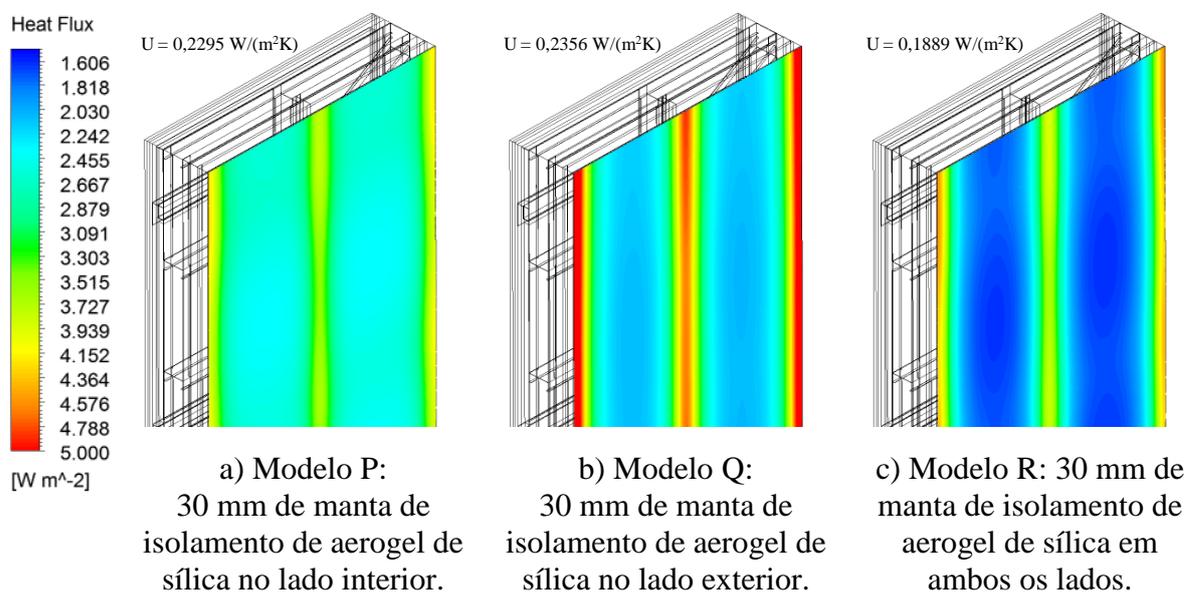


Figura 5.17 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

### 5.3.1.3 Painéis de isolamento a vácuo

Nesta abordagem utilizam-se painéis de isolamento a vácuo (VIPs do inglês *vacuum insulation panels*), com uma espessura de 30 mm e são utilizadas as mesmas estratégias realizadas para a

manta isolante de aerogel (modelos S, T e U). Todos os modelos numéricos com VIPs dão bons resultados para o desempenho térmico, devido à baixa condutibilidade térmica do material. Note-se que a condutibilidade térmica dos VIPs ( $0,007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) foi fornecido pelo fabricante de VIPs Kingspan UK (2013), e têm em conta o efeito de bordo das placas, sendo um valor ponderado. Além disso, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante é possível produzir VIPs com as dimensões adequadas para cada módulo de parede LSF.

A principal diferença entre os dois primeiros modelos (Modelo S e T) é a posição dos painéis na parede: posição do lado interior e exterior, respetivamente. O valor de U obtido é ligeiramente melhor para a solução na qual o painel é colocado no lado interior (Modelo S),  $0,2032$  vs  $0,2048 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

O Modelo O dá um bom valor U,  $0,1536 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , o que representa uma melhoria de 49% em relação ao modelo de referência. Comparando a Figura 5.18a, b e c, é possível ver a influência da localização dos painéis (lado interior, lado exterior e ambos os lados). Na Figura 5.18a, há uma distribuição mais uniforme do fluxo de calor, que ocorre porque o isolamento é posicionado antes da estrutura de aço (considerando-se o trajeto do fluxo de calor).

A Figura 5.18c mostra a diminuição do fluxo de calor e mostra que esta solução é melhor para alcançar um bom desempenho térmico em condições de inverno e verão, devido à estrutura de aço estar isolada em ambos os lados.

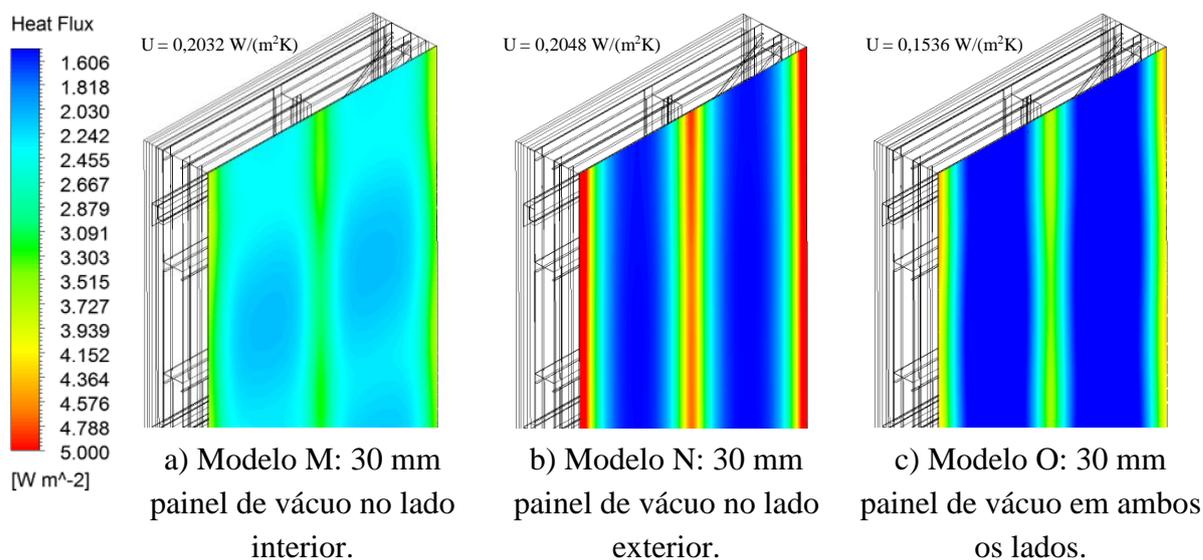


Figura 5.18 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

### 5.3.2 Estratégias de melhoria combinadas

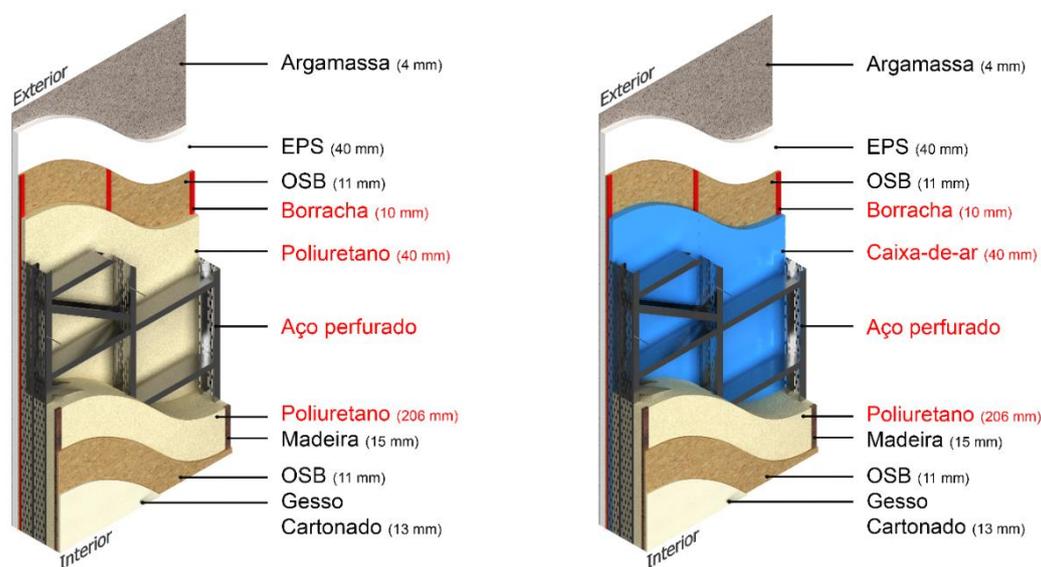
Combinando as estratégias de mitigação de pontes térmicas apresentadas, com as estratégias para melhorar o comportamento térmico é possível alcançar um melhor valor de U. Foram criados seis modelos numéricos que combinam as melhores soluções de mitigação apresentadas anteriormente.

O Modelo V combina as seguintes melhorias: Modelo H<sub>2</sub> com tiras de borracha; Modelo J<sub>2</sub> com perfis verticais de aço perfurados; Modelo K com ligações aparafusadas; e Modelo N, em que a caixa-de-ar e a lã de rocha é substituída por espuma de poliuretano (Figura 5.19a).

Modelo W é semelhante ao anterior, adotando a solução utilizada no Modelo O: uma camada de poliuretano e uma abertura de ar com 40 milímetros (Figura 5.19b).

Modelo V conduz a uma redução de 57,8% no valor de U, o que corresponde a 0,1271 W/(m<sup>2</sup>.K). É visível uma clara redução do fluxo de calor na Figura 5.20a.

Os resultados do Modelo W apresentam uma redução de 49,3% no valor de U, 0,1525 W/(m<sup>2</sup>.K). A Figura 5.20b mostra o fluxo de calor na face exterior, sendo visível um fluxo de calor mais elevado em relação ao modelo anterior. No entanto, o efeito da ponte térmica devido à presença dos perfis de aço verticais é também bem mitigado.



a) Modelo V: 9 parafusos+ 10 mm borrachas + perfis verticais de aço perfurados + substituição da caixa-de-ar e lã de rocha por espuma de poliuretano.

b) Modelo W: 9 parafusos+ 10 mm borrachas + perfis verticais de aço perfurados + substituição da caixa-de-ar interior e da lã de rocha por espuma de poliuretano e substituição de lã de rocha exterior por uma caixa-de-ar.

Figura 5.19 – Soluções combinadas de parede com espuma de poliuretano e perfis verticais de aço perfurados.

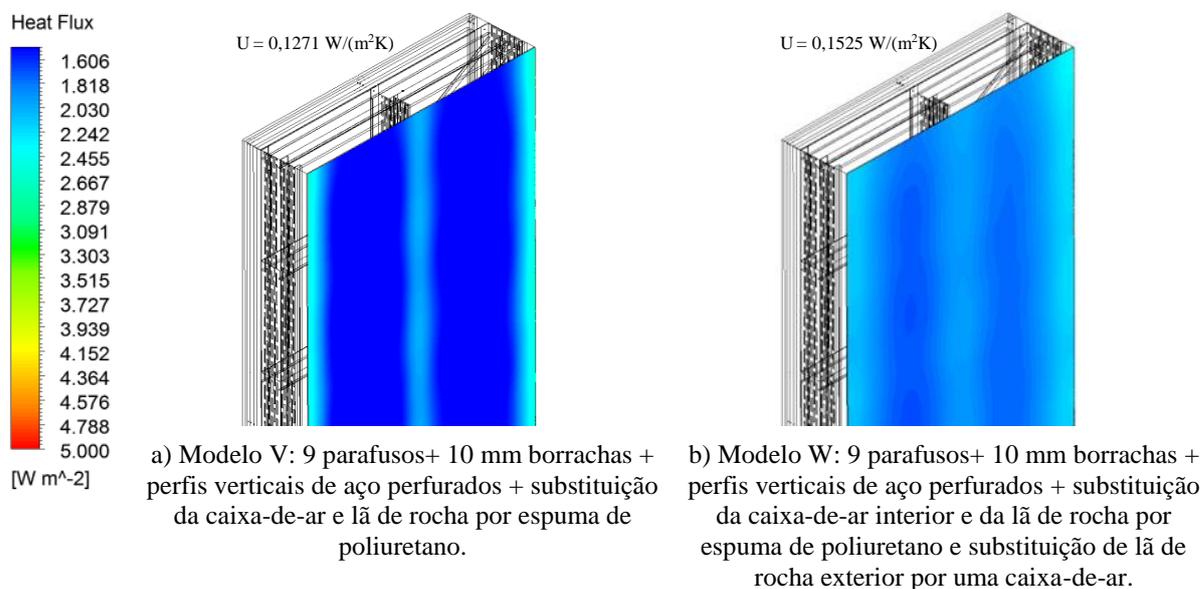


Figura 5.20 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

Duas abordagens semelhantes às anteriores foram realizadas nos modelos de X e Y. Estes modelos diferem do anterior no tipo de estrutura de aço. Nestas abordagens, toda a estrutura de aço é perfurada, a Figura 5.21a e b ilustram os modelos.

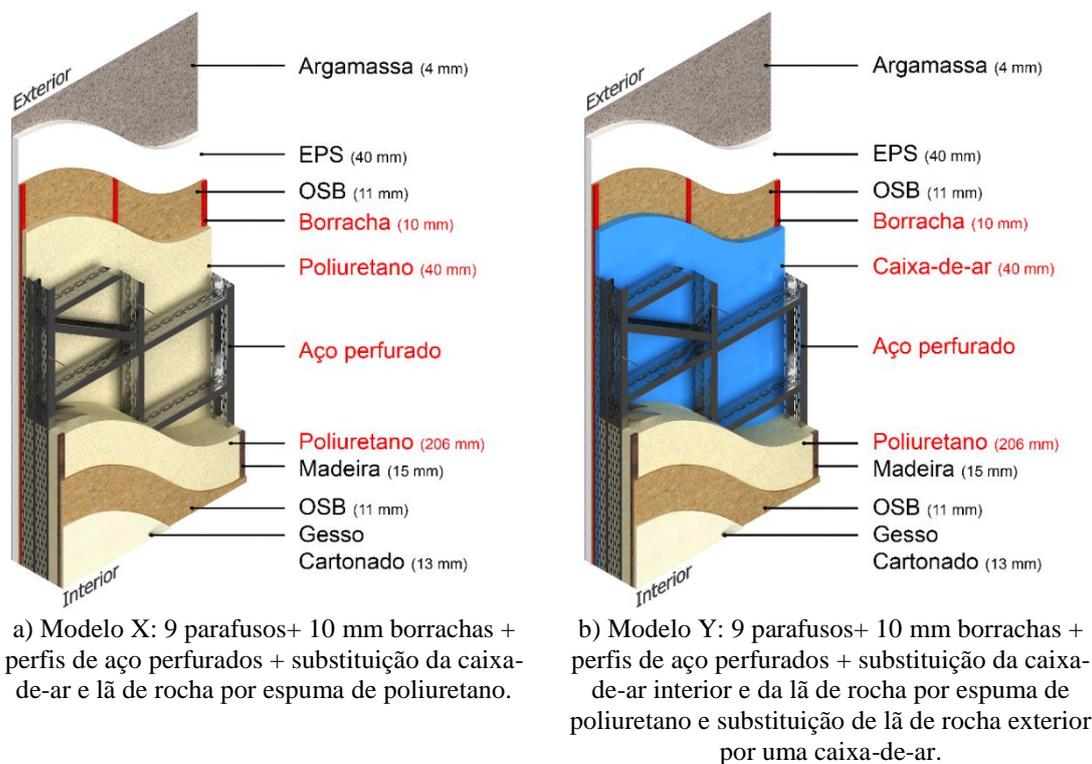


Figura 5.21 – Soluções combinadas de parede com espuma de poliuretano e perfis de aço perfurados.

Estes modelos proporcionam um bom desempenho térmico, sendo obtido o melhor valor de U no Modelo X, com um U de  $0,1173 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Este modelo melhora em 61,0% o valor de U relativamente ao modelo de referência (Modelo A). O Modelo S também apresenta um bom desempenho térmico, com  $0,1333 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  para o valor de U, o que corresponde a uma melhoria de 55,7% relativamente ao modelo de referência. A Figura 5.22 mostra o fluxo de calor nas faces exteriores.

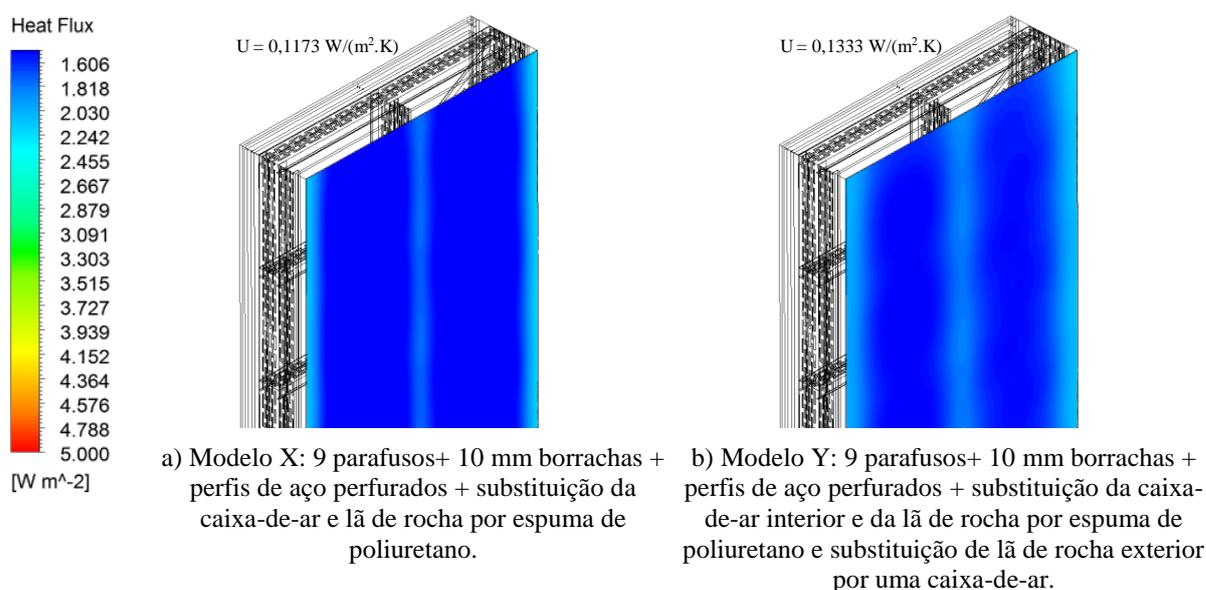
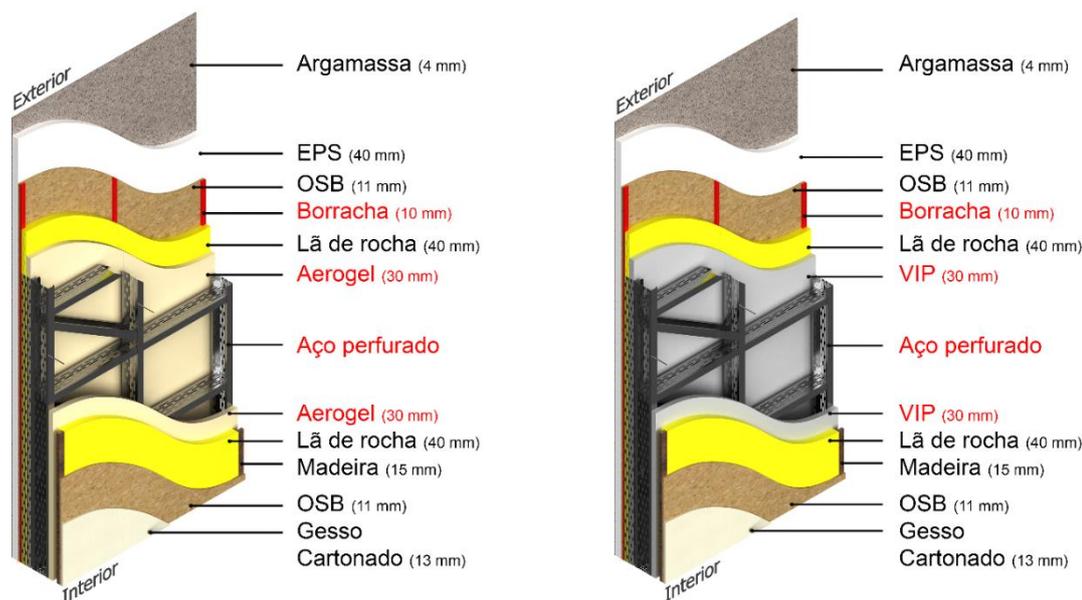


Figura 5.22 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

Os dois últimos modelos, Z e AA, combinam as melhorias introduzidas nos modelos anteriores. O Modelo Z combina o seguinte: Modelo H<sub>2</sub> com tiras de borracha; Modelo J<sub>3</sub> com perfis de aço perfurados; Modelo K com ligações aparafusadas; Modelo R no qual foi colocado 30 mm de isolamento de aerogel de sílica em ambos os lados. A Figura 5.23a mostra os detalhes. Da mesma forma, o Modelo AA é composto por: Modelo H<sub>2</sub>; Modelo J<sub>3</sub>; Modelo K; e o Modelo U em que se utiliza painéis de vácuo de 30 mm colocados em ambos os lados. A Figura 5.23b mostra detalhes.

Estes últimos modelos proporcionam bons resultados para o valor de U, sendo obtido o melhor para o Modelo AA, com um valor de transmissão térmica de  $0,0959 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Este modelo melhora em 68,2% o valor de U relativamente ao modelo de referência (Modelo A). O Modelo Z também apresenta um bom desempenho térmico, embora menor, ou seja, um valor de U igual a  $0,1406 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ , o que corresponde a uma melhoria de 53,3% comparativamente com o

modelo de referência. A Figura 5.24 mostra a distribuição do fluxo de calor ao longo da superfície exterior das paredes.



a) Modelo Z: 9 parafusos+ 10 mm borrachas + perfis de aço perfurados + 30 mm de mantas de isolamento de aerogel em ambos os lados.

b) Modelo AA: 9 parafusos+ 10 mm borrachas + perfis de aço perfurados + 30 mm de painéis de vácuo em ambos os lados.

Figura 5.23 – Soluções combinadas da parede com aerogel ou painéis de vácuo e perfis de aço perfurados.

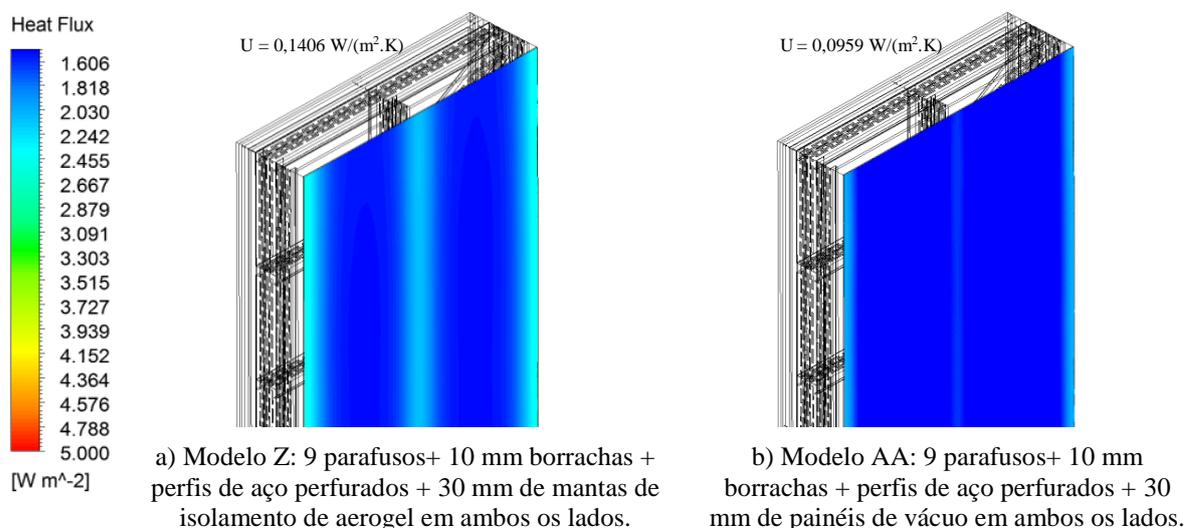


Figura 5.24 – Fluxo de calor: vista da superfície exterior.

### 5.3.3 Resultados: visão geral e discussão

O Quadro 5.3 apresenta um resumo dos valores do coeficiente de transmissão térmica para as melhorias das paredes modulares LSF e as diferenças de transmissão térmica ( $\Delta U$ ) entre cada modelo e o modelo de referência (Modelo A). A Figura 5.25 ilustra graficamente os resultados obtidos.

Quadro 5.3 – Estudo paramétrico para melhoramento do desempenho térmico: resumo dos modelos e resultados.

Modelo	Descrição do modelo							U [W/(m <sup>2</sup> .K)] ( $\Delta U$ )	
	Sem conexões de aço horizontais	Tiras de borracha	Perfis de aço perfurados	Espuma de poliuretano		Aerogel	VIPs		
				Sem caixa-de-ar e lã de rocha	Com 40 mm de caixa-de-ar e sem lã de rocha				
Estratégias isoladas	A							0,3011 (-----)	
	N				✓			0,1615 (-46,4%)	
	O					✓		0,1876 (-37,7%)	
	P						✓ só no lado interior	0,2295 (-23,8%)	
	Q						✓ só no lado exterior	0,2356 (-21,8%)	
	R						✓	0,1889 (-37,3%)	
	S							✓ só no lado interior	0,2032 (-32,5%)
	T							✓ só no lado exterior	0,2048 (-32,0%)
	U							✓	0,1536 (-49,0%)
Estratégias combinadas	V	✓	✓ 10 mm	✓ 28% só vertical	✓			0,1271 (-57,8%)	
	W				✓		0,1525 (-49,3%)		
	X				✓		0,1173 (-61,0%)		
	Y				✓	✓	0,1333 (-55,7%)		
	Z			✓ 28%		✓	0,1406 (-53,3%)		
	AA							✓	0,0959 (-68,2%)

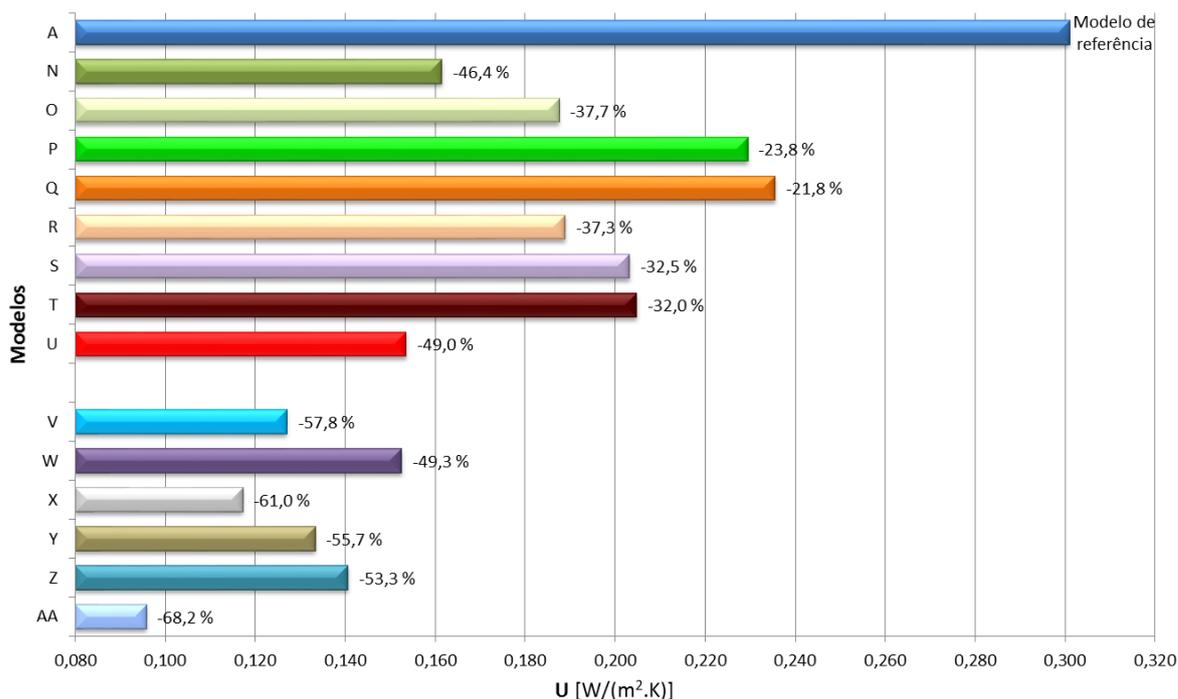


Figura 5.25 – Estudo paramétrico: Resumo dos resultados para os modelos de melhoramento do desempenho térmico.

A melhor estratégia individual para melhorar o valor de U é o Modelo U, em que são acrescentados VIPs em ambos os lados da estrutura de aço de parede. O valor de U é reduzido em 49%, o que representa uma boa melhoria do desempenho térmico do módulo de parede, tendo em conta que apenas foi adicionada uma camada de isolamento com 60 mm.

A partir das simulações numéricas, para as estratégias combinadas, conclui-se que a melhor solução é a que combina: tiras de borracha; perfis de aço perfurados; ligações aparafusadas; e VIPs em ambos os lados, identificado como o Modelo AA. O valor de U foi reduzido de 0,3011 W/(m<sup>2</sup>.K), do Modelo A de referência, para 0,0959 W/(m<sup>2</sup>.K).

O Modelo X também apresenta um bom desempenho. Neste modelo, são combinadas as seguintes soluções: tiras de borracha; perfis de aço perfurados; ligações aparafusadas; e poliuretano. O valor de U também foi significativamente reduzido de 0,3011 W/(m<sup>2</sup>.K), do Modelo A de referência, para 0,1173 W/(m<sup>2</sup>.K). Embora este modelo permita melhorar o modelo de referência em 61%, apresenta a desvantagem de não ter uma caixa-de-ar, o que, no caso de infiltração de água pode ser um problema. No entanto, esta desvantagem pode ser atenuada pelo uso de uma membrana resistente ao vento e impermeável à água, colocada entre o ETICS e o OSB.

O Modelo Y, que tem uma caixa-de-ar com 40 mm, apresenta-se também como uma boa alternativa. Este modelo aumenta o valor U de apenas 0,016 W/(m<sup>2</sup>.K) comparativamente ao modelo anterior (Modelo X).

Finalmente, o Modelo T diminui o valor de U em 53,3%. Embora este modelo não apresente os melhores resultados, é também, de facto, uma boa solução porque a colocação de mantas de isolamento de aerogel na parede não só diminui o valor de U, mas também aumenta a resistência da parede ao fogo.

O material mais eficiente adicionado à parede é o painel de vácuo (VIPs), melhorando em 68,2% o desempenho térmico. No entanto, devido à diferença de preços entre esta solução e a espuma de poliuretano, que permite uma redução no valor U de 61,0%, esta última solução pode também ser considerada uma boa opção.

## 6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi analisado o desempenho térmico de uma parede modular em LSF. Foi estudada a relevância das perdas de calor pela periferia da parede nos valores do coeficiente de transmissão térmica obtidos. Avaliaram-se várias estratégias de mitigação de pontes térmicas, com o objetivo de melhorar o módulo de parede LSF. Foi também realizada uma otimização das camadas de isolamento do módulo de parede, o que combinado com as abordagens de redução das pontes térmicas permite uma melhoria significativa do desempenho térmico da parede LSF. Os estudos da parede modular em LSF foram realizados utilizando modelos numéricos tridimensionais (FEM), derivados de um modelo de referência 3D FEM validado experimentalmente.

Foi realizada uma avaliação experimental em laboratório para a parede LSF, permitindo validar o modelo numérico, sendo também realizadas outras verificações adicionais (e.g., modelos simplificados e termografia de infravermelhos). Este modelo detalhado 3D FEM foi capaz de reproduzir de forma fiável, as condições experimentais existentes. Os estudos paramétricos da parede em LSF foram realizados usando este modelo previamente validado.

### 6.1 Importância das perdas térmicas pela envolvente da parede

Concluiu-se que, dependendo da superfície da parede (quente ou fria) na qual foram obtidos os valores de fluxo de calor, os valores do coeficiente de transmissão térmica podem variar de - 22% (superfície exterior) a + 50% (superfície interior), usando como referência uma parede com superfícies de envolvente periférica adiabática, isto é, com perdas térmicas nulas pela envolvente.

Adicionalmente ao lado da superfície de parede (quente ou fria) em que os valores de fluxo de calor foram obtidos, foram avaliados outros parâmetros, por exemplo, elementos de fixação, o perímetro de isolamento térmico, o pórtico de suporte, e o material do pórtico (aço ou madeira). Entre estes parâmetros, o mais relevante é a existência de elementos de fixação de aço em forma de "L", o que pode induzir uma variação do valor U de - 22% ou + 50%, dependendo do lado em que são obtidos os valores de fluxo de calor (exterior ou interior). A relevância destes elementos de fixação de aço é reduzida (- 12% e + 18%), quando o perímetro da superfície envolvente da parede é adiabático.

Outra conclusão interessante é que, quando não existem elementos de fixação em aço, o uso de 10 cm de isolamento de XPS no perímetro, é suficiente para reduzir as perdas térmicas que

ocorrem devido a ter-se um pórtico de aço, para valores próximos dos previstos para um pórtico de madeira. No entanto, em comparação com uma parede LSF com o perímetro adiabático, a relevância da perda térmica envolvente permanece elevada (- 19%; + 41%).

Este estudo quantifica o quanto as perdas térmicas pela envolvente periférica de uma parede podem mudar drasticamente a transmissão térmica global de um componente de um edifício (e.g., parede de fachada), mesmo em condições laboratoriais. Por isso, deve ser dada especial atenção a esta questão, principalmente em componentes de construção LSF com várias camadas de isolamento, para minimizar o fluxo de calor lateral. Caso contrário, o valor de U obtido poderá não ser real (fiável).

## 6.2 Mitigação de pontes térmicas

A mitigação de pontes térmicas causadas pela estrutura de aço é mais eficaz com a introdução de tiras de corte térmico e com a introdução de perfis de aço perfurados.

O estudo paramétrico mostra que o coeficiente de transmissão térmico da parede pode ser reduzido até 8,3%, o que corresponde a 75% do impacto total das pontes térmicas. Destaca-se que estes valores podem ser ainda maiores se não houver nenhuma camada de isolamento térmico contínuo, como por exemplo o ETICS aplicado (com 40 mm de EPS).

## 6.3 Medidas de melhoria do desempenho térmico

A partir deste trabalho várias observações podem ser destacadas. Além disso, salientam-se também algumas orientações de projeto que podem proporcionar melhorias, nomeadamente:

- Introduzir pelo menos um terço de isolamento térmico contínuo;
- Se a condição anterior se verificar, então algumas das estratégias de mitigação de pontes térmicas vão ter impacto reduzido ou mesmo irrelevantes (e.g., perfis com encaixes macho/fêmea, tiras finas de borracha, parafusos de fixação em vez de conexões de chapa de aço e perfis de aço perfurados);
- Ao selecionar/projetar perfis metálicos térmicos devem-se escolher aqueles com maior número de furações, uma vez que são mais eficientes do que os com menor área de furação;
- Sempre que possível e necessário, tentar usar duas camadas de perfis de aço perpendiculares, evitando atravessar toda a secção transversal da parede com perfis de aço paralelos.

Na avaliação feita ao módulo de parede, é evidente que a caixa-de-ar cruzada por aço, influência o seu desempenho térmico e quando se enche a caixa-de-ar com isolamento alcança-se uma grande melhoria. O estudo paramétrico mostra que o valor U da parede pode ser reduzido aproximadamente três vezes, utilizando soluções muito simples, o que corresponde a uma redução de 68%.

Do ponto de vista económico, a solução em que é adicionado espuma de poliuretano ao módulo de parede, em vez da caixa-de-ar, é a melhor solução dado o maior custo do aerogel e dos painéis de vácuo.

#### **6.4 Trabalhos futuros**

O comportamento térmico de paredes leves com estrutura em aço enformado a frio é complexo de analisar, devido às eventuais pontes térmicas originadas pelos perfis em aço e por serem elementos altamente heterogéneos no que respeita às suas propriedades térmicas. Existe também falta de informação sobre estes elementos, não existem valores tabelados, como os já existentes para a construção tradicional em betão e alvenaria de tijolo.

Pelas razões expostas, a avaliação experimental do desempenho térmico deste tipo de paredes pode ser aperfeiçoada, por exemplo através da minimização das perdas pela envolvente da parede. Outro aspeto a melhorar poderá ser a realização de medições globais em uma área de maior extensão do elemento parede, em vez das medições pontuais localizadas nos pontos onde foram aplicados os fluxímetros de calor e os sensores PT100. As medições pontuais podem ser uma boa solução apenas para a caracterização de paredes mais homogéneas. Conclui-se que o melhor método experimental para caracterizar este tipo de elementos construtivos é a utilização de uma *Hot Box*. Este equipamento permite a medição do fluxo de calor numa zona menos localizada, o que aumenta a fiabilidade dos resultados obtidos, que deixam de ser tão sensíveis às variações registadas ao longo da parede.

Com o propósito de melhor caracterizar as paredes LSF propõem-se como trabalho futuro a realização de ensaios experimentais numa *Hot Box*, projeto que já se encontra em desenvolvimento, estando a ser realizada a construção e desenvolvimento de uma *Guarded Hot Box Test Station*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, M., Singh, H., & Limbachiya, M. C. (2011). Vacuum insulation panels (vips) for building construction industry - a review of the contemporary developments and future directions. *Applied Energy*, 88(11), 3592–3602.
- ANSYS CFX. (2013). ANSYS, Inc. Canonsburg, USA. Retrieved from <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>.
- ASHRAE (1993). *ASHRAE Handbook of Fundamentals Refrigerating and Air-conditioning Engineers*. Atlanta, EUA: American Society of Heating (ASH)
- ASTM C1046-95. (2001). *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1060. (2011). *Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1155-95. (2001). *Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data*. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1363. (2011). *Standard Test Method for the Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials.
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761–769.
- Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147–172.
- Blomberg, T. R., & Claesson, J. (1998). Heat Transmission Through Walls with Slotted Steel Studs. In *Thermal Envelopes VII* (pp. 621–628).
- Cemintel. (2007). *Thermal Break requirement on Steel Framed Buildings* (Vol. F957). Australia: Cemintel Thermal™.

- Decreto-Lei n.º 80. (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). *Diário Da República, 1.ª Série - N.º 67 - 4 de Abril de 2006*, 46(2468–2513).
- Erhorn-Klutting, H., & Erhorn, H. (2009). ASIEPI - Impact of thermal bridges on the energy performance of buildings. *Fraunhofer Institute for Building Physics, Germany*.
- European Parliament. (2010). *European Directive 2010/31/EU - Energy Performance of Buildings (EPBD)*. Brussels, Belgium: European Commission.
- Gervásio, H., Santos, P., Simões da Silva, L., & Lopes, A. M. G. (2010). Influence of Thermal Insulation on the Energy Balance for Cold-Formed Buildings. *Advanced Steel Construction*, 6(2), 742–766.
- Gorgolewski, M. (2007). Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. *Building and Environment*, 42, 230–236.
- GOST 26602.1-99. (1999). *Windows and doors. Methods of determination of resistance of thermal transmission*. Interstate Standard of Russian Federation.
- Höglund, T., & Burstrandb, H. (1998). Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls. *Thin-Walled Structures*, 32, 81–109.
- ISO 10211. (2007). *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO 6946. (2007). *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO 8990. (1996). *Thermal insulation – Determination of steadystate thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO 9869. (1994). *Thermal insulation – Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kingspan UK. (2013). *OPTIM-R External Wall System - Next generation insulation solution for external masonry walls*. Kingspan, Low energy - Low Carbon Buildings, UK.
- Kosny, J., & Christian, J. E. (1995). Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls. *Energy and Buildings*, 22(2), 157–163.
-

- Kosny, J., Christian, J. E., Barbour, E., & Goodrow, J. (1994). *Thermal Performance of Steel-Framed Walls*.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2015). THERM - Finite Element Simulator.
- LSK. (2005). *European Lightweight Steel-framed Construction*. Arcelor.
- Martins, C., Santos, P., & da Silva, L. S. (2015). Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study. *Journal of Building Physics*.
- Murtinho, V., Ferreira, H., Correia, A., Silva, L. S. da, Rebelo, C., & Santos, P. (2010). Affordable houses: architectural concept of light steel residential house. In *ICSA2010 – International Conference on Structures and Architecture* (pp. 1291–1297).
- Portaria n.º 349-B. (2013). *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) — Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções*. Diário da República, 1.ª série — N.º 232 — 29 de novembro de 2013. Portugal: Imprensa Nacional e da Casa da Moeda.
- Salhab, B., & Wang, Y. C. (2008). Equivalent thickness of cold-formed thin-walled channel sections with perforated webs under compression. *Thin-Walled Structures*, 46(7-9), 823–838.
- Santos, P., Gervásio, H., Simões da Silva, L., & Gameiro, A. (2011). Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28, 325–352.
- Santos, P., Martins, C., & Simões da Silva, L. (2014). Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. *Metallurgical Research & Technology*, 111(6), 329–338.
- Santos, P., Martins, C., Simões da Silva, L., & Braganca, L. (2014). Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses. *Journal of Building Physics*, 38(1), 81–98.
- Santos, P., Simões da Silva, L., Gervásio, H., & Gameiro Lopes, A. (2011). Parametric analysis of the thermal performance of light steel residential buildings in Csb climatic regions. *Journal of Building Physics*, 35(1), 7–53.
- Santos, P., Simões da Silva, L., & Ungureanu, V. (2012). *Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings* (1st ed.). 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.
- Schöck. (2015). Innovative Buildings Solutions. Retrieved January 1, 2015, from [www.schoeck.co.uk/en\\_gb/solutions-uk/steel-to-steel-12](http://www.schoeck.co.uk/en_gb/solutions-uk/steel-to-steel-12)

- ThermaChannel. (2015). Energy-Efficient Steel Framing. Retrieved January 1, 2013, from [www.thermachannel.com](http://www.thermachannel.com)
- Tilmans, A., & Orshoven, D. Van. (2010). Software and atlases for evaluating thermal bridges. *Assessment and Improvement of the EPBD Impact, P198*.
- Veljkovic, M., & Johansson, B. (2007). Light steel framing for residential buildings. *Thin-Walled Structures, 44*(12), 1272–1279.
- Zalewski, L., Lassue, S., Rouse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Conversion and Management, 51*(12), 2869–2877.

## ANEXOS

## Anexo A Ficha do ensaio experimental E1

Ensaio n.º E1

Data de início 19-12-2011 17:38

Data de conclusão 20-12-2011 17:04

Características do provete: Parede sem ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 11

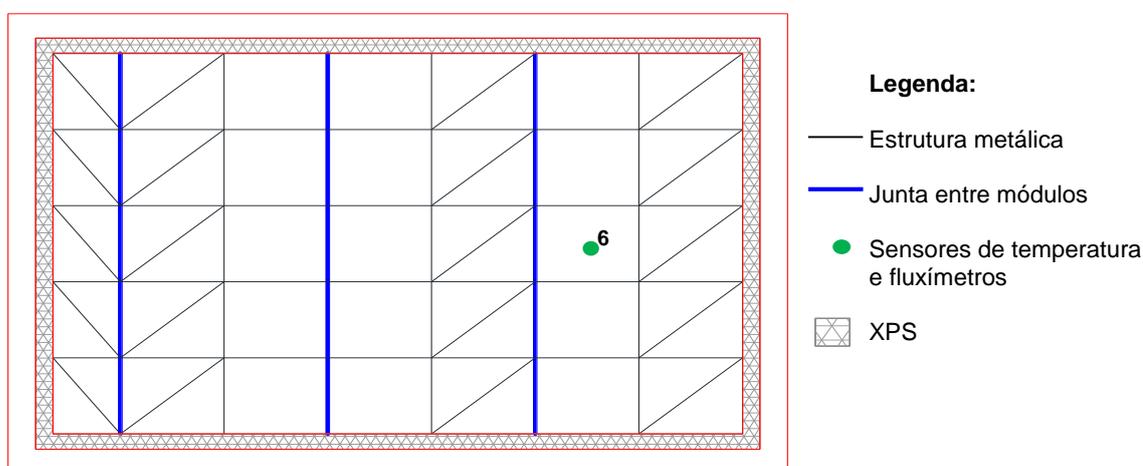


Figura A.1 – Localização do sensor do ensaio n.º E1.

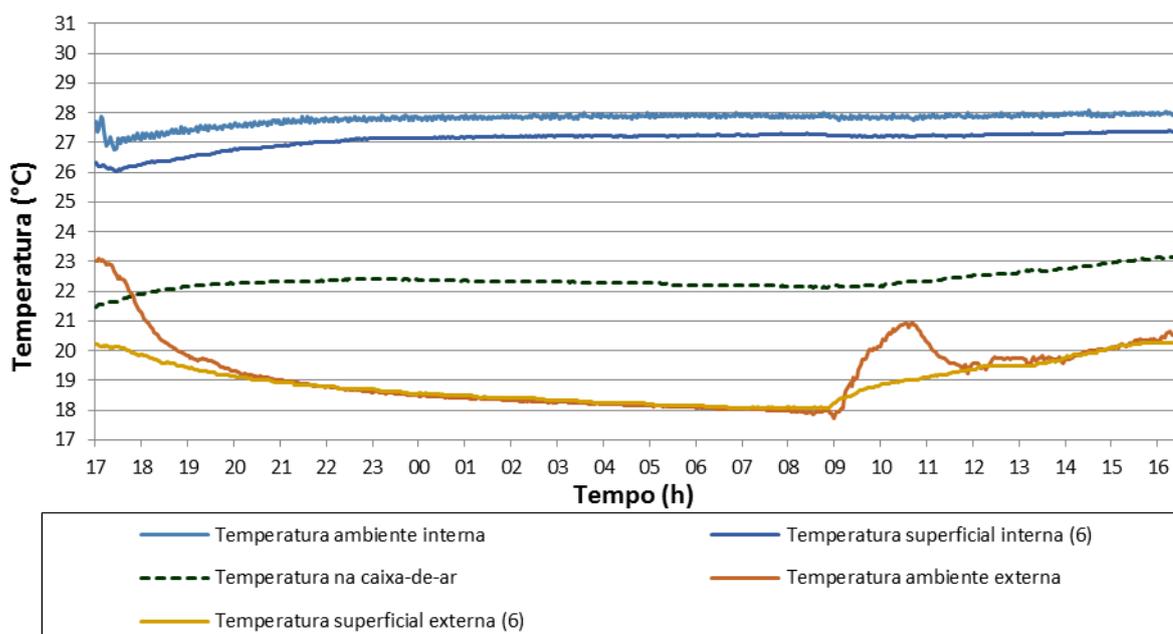


Figura A.2 – Temperaturas do ensaio n.º E1.

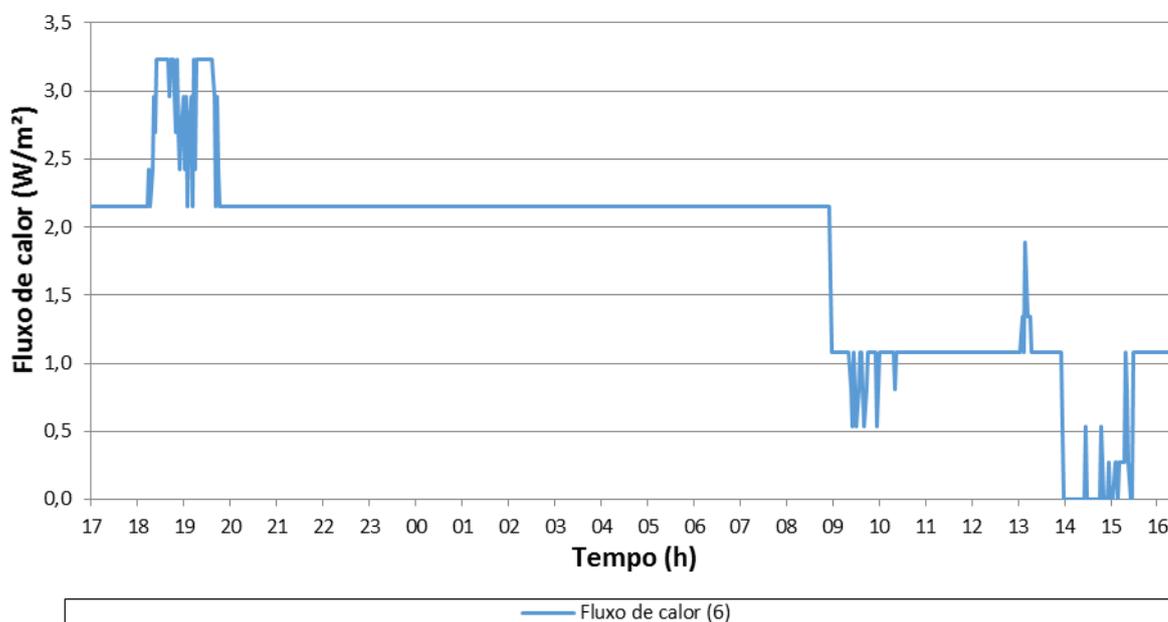


Figura A.3 – Fluxo de calor do ensaio n.º E1.

Quadro A.1 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E1.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]
	6
1	3,81
2	3,91
3	3,98
4	4,03
5	4,07
6	4,11
7	4,15
8	4,18
9	4,21
10	4,25
11	4,26

## Anexo B Ficha do ensaio experimental E2

Ensaio n.º E2

Data de início 20-12-2011 17:56

Data de conclusão 21-12-2011 09:52

Características do provete: Parede sem ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 7

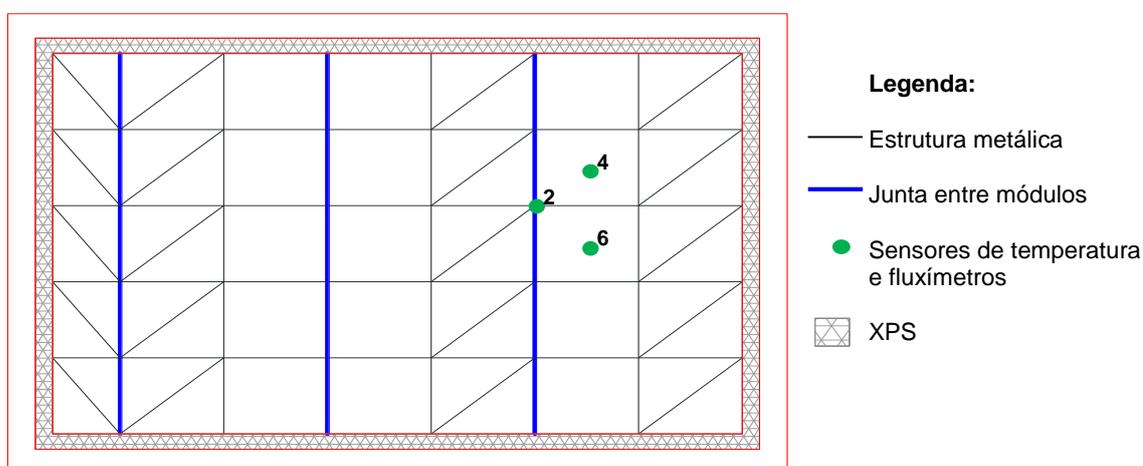


Figura B.4 – Localização do sensor do ensaio n.º E2.

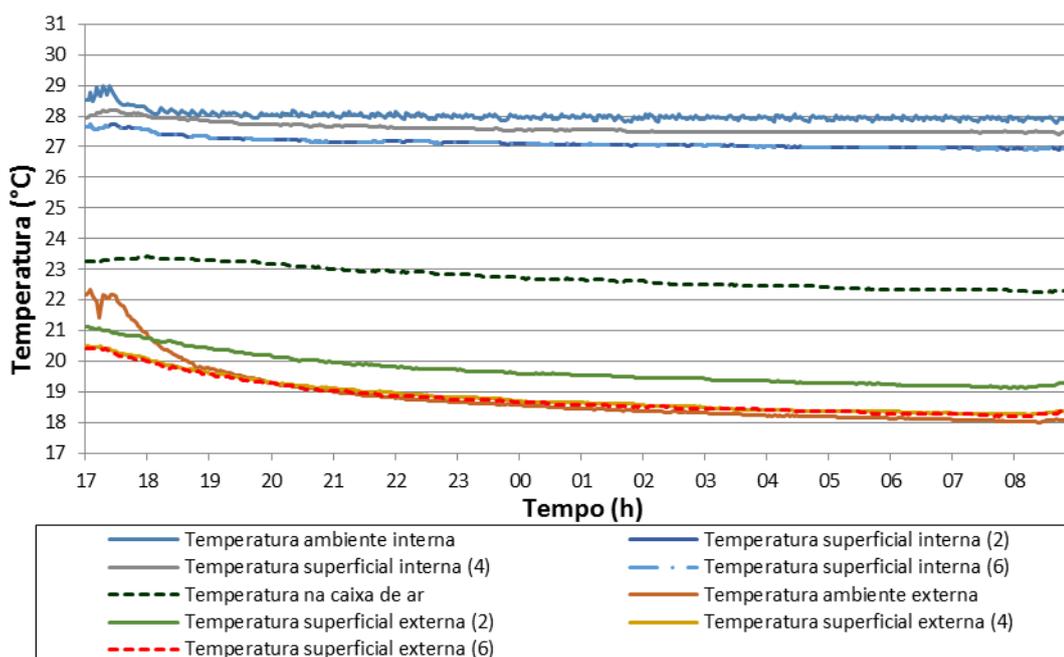


Figura B.5 – Temperaturas do ensaio n.º E2.

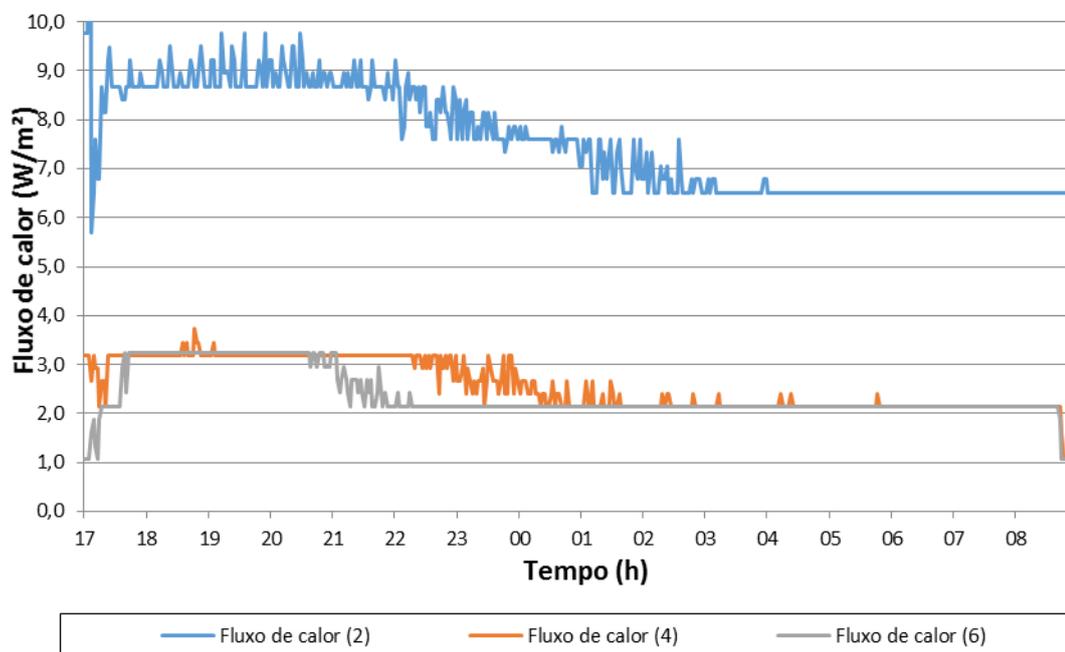


Figura B.6 – Fluxo de calor do ensaio n.º E2.

Quadro B.2 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E2.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]		
	2	4	6
1	1,08	4,05	4,11
2	1,14	4,15	4,12
3	1,17	4,23	4,13
4	1,18	4,24	4,15
5	1,19	4,27	4,17
6	1,20	4,31	4,18
7	1,20	4,33	4,19

## Anexo C Ficha do ensaio experimental E3

Ensaio n.º E3

Data de início 21-12-2011 12:38

Data de conclusão 22-12-2011 09:58

Características do provete: Parede sem ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 4

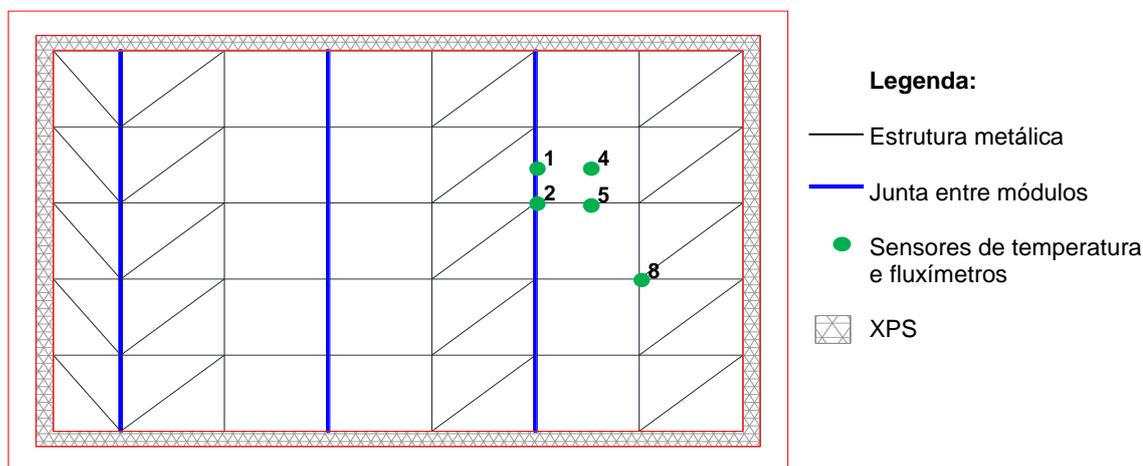


Figura C.7 – Localização do sensor do ensaio n.º E3.

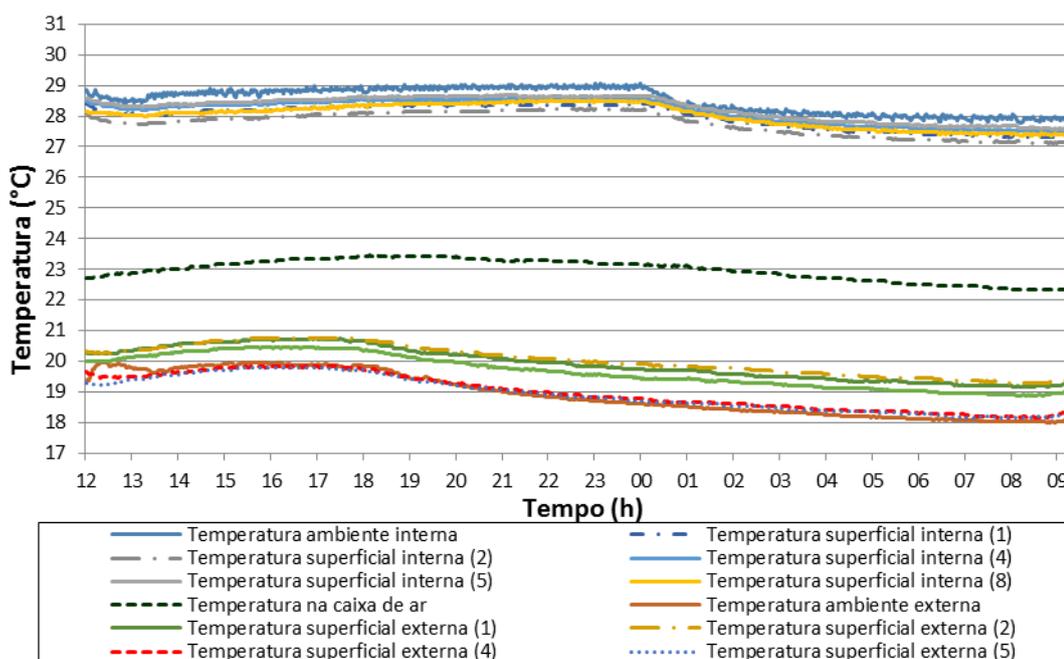


Figura C.8 – Temperaturas do ensaio n.º E3.

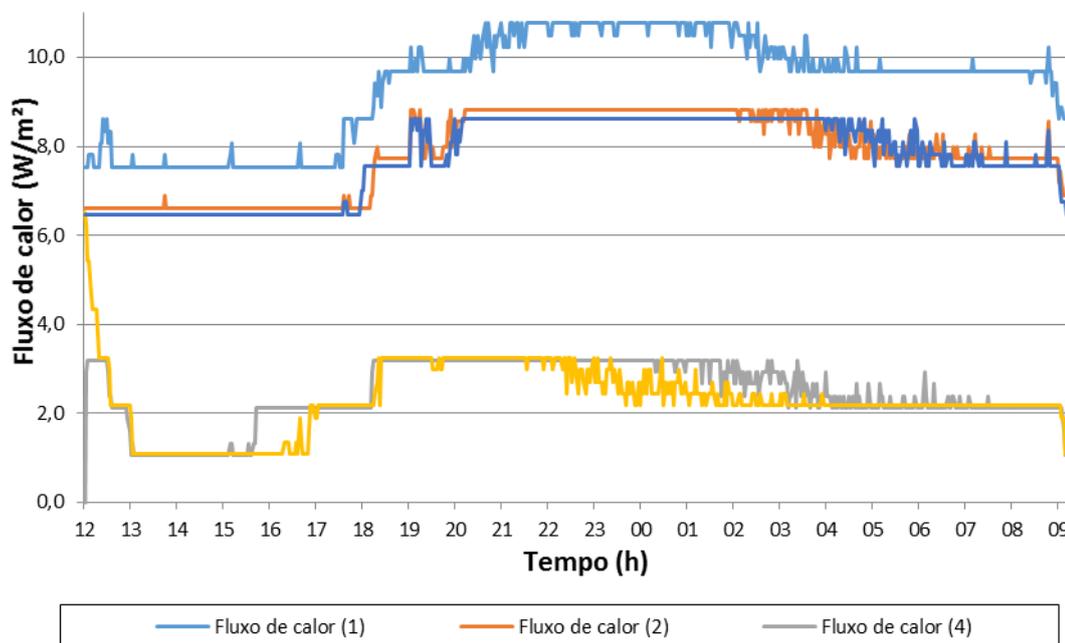


Figura C.9 – Fluxo de calor do ensaio n.º E3.

Quadro C.3 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E3.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]				
	1	2	4	5	8
1	0,84	0,98	4,16	4,35	1,03
2	0,84	1,00	4,20	4,35	1,08
3	0,84	1,00	4,29	4,37	1,10
4	0,84	1,02	4,37	4,37	1,13

## Anexo D Ficha do ensaio experimental E4

Ensaio n.º E4

Data de início 09-01-2012 14:38

Data de conclusão 10-01-2012 11:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 11

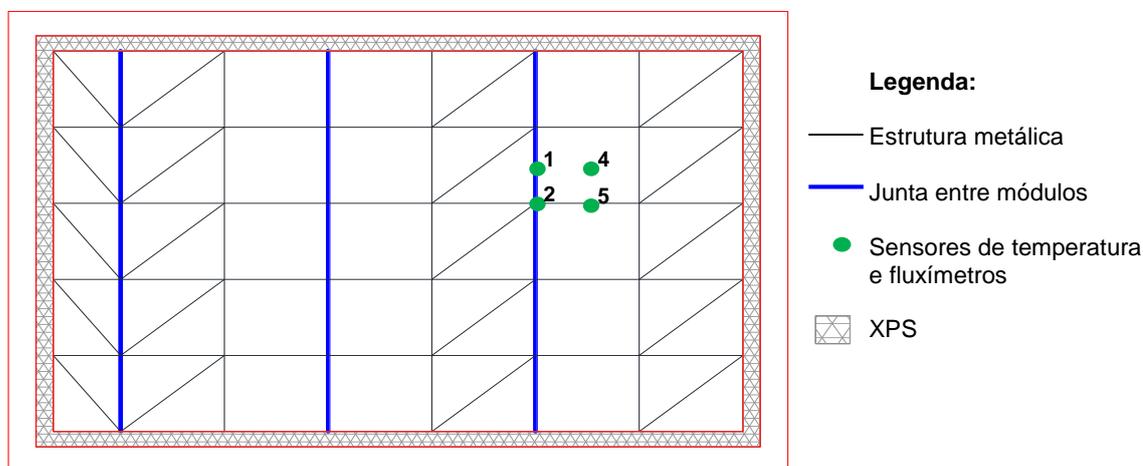


Figura D.10 – Localização do sensor do ensaio n.º E4.

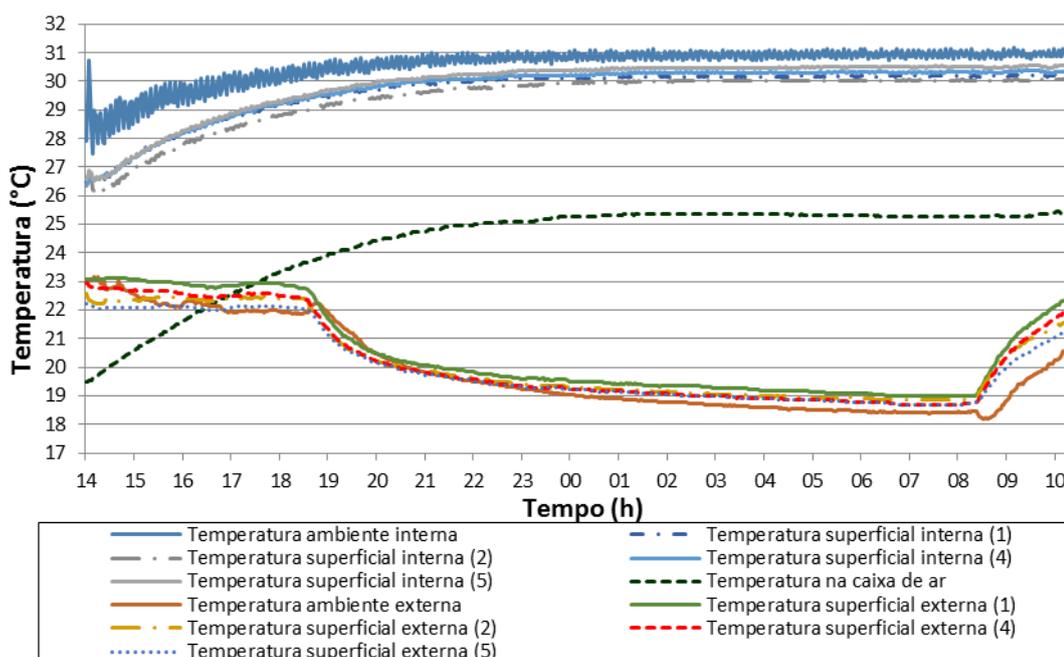


Figura D.11 – Temperaturas do ensaio n.º E4.

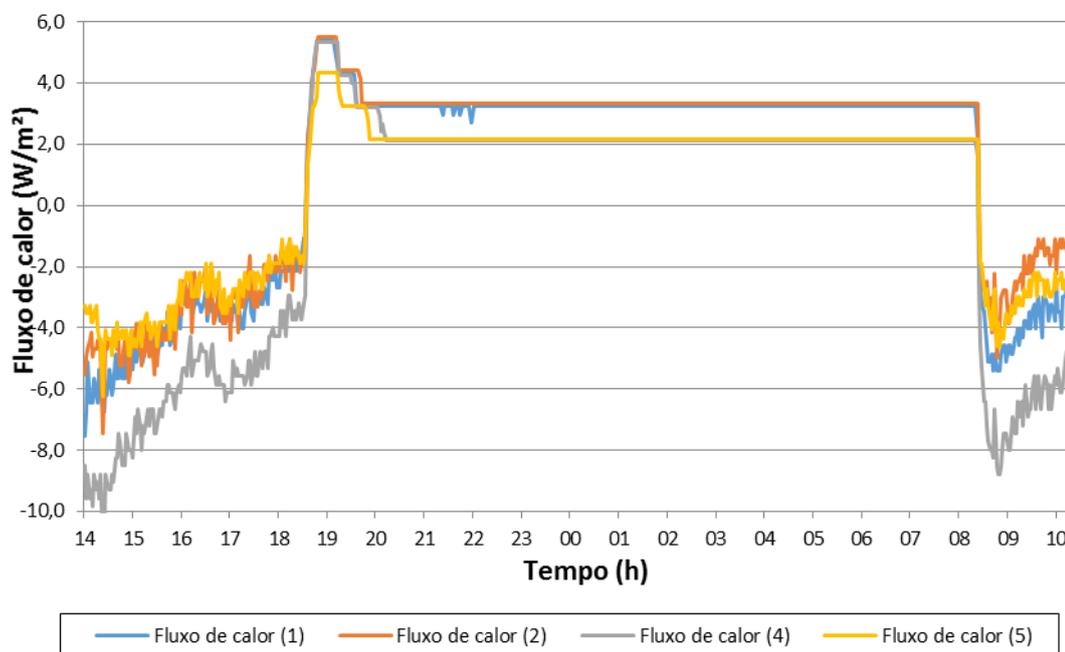


Figura D.12 – Fluxo de calor do ensaio n.º E4.

Quadro D.4 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E4.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]			
	1	2	4	5
1	3,20	3,05	4,93	4,92
2	3,24	3,14	5,07	5,06
3	3,28	3,20	5,14	5,12
4	3,31	3,25	5,22	5,20
5	3,35	3,28	5,28	5,26
6	3,36	3,30	5,31	5,29
7	3,39	3,32	5,35	5,33
8	3,41	3,34	5,38	5,37
9	3,44	3,35	5,42	5,41
10	3,46	3,38	5,45	5,44
11	3,46	3,38	5,46	5,45

## Anexo E Ficha do ensaio experimental E5

Ensaio n.º E5

Data de início 10-01-2012 12:22

Data de conclusão 11-01-2012 09:30

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 6

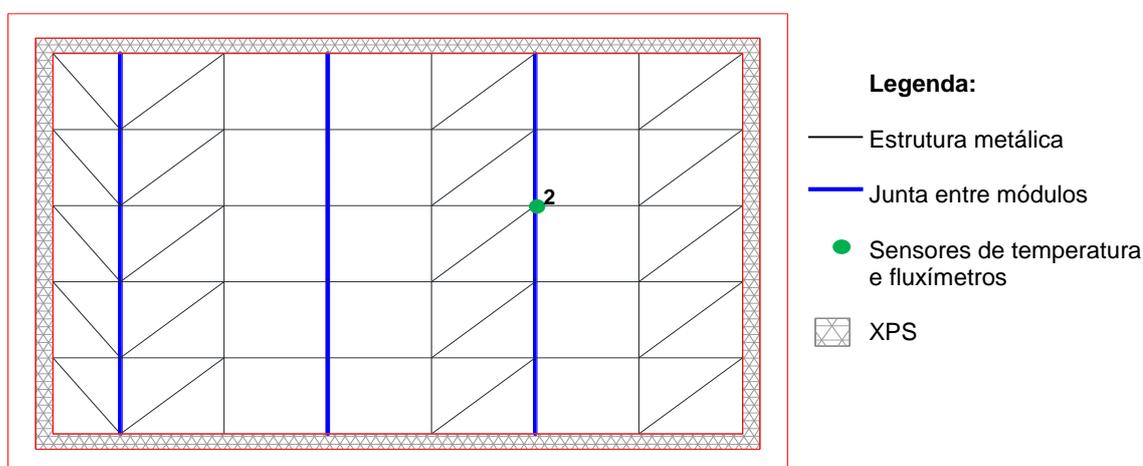


Figura E.13 – Localização do sensor do ensaio n.º E5.

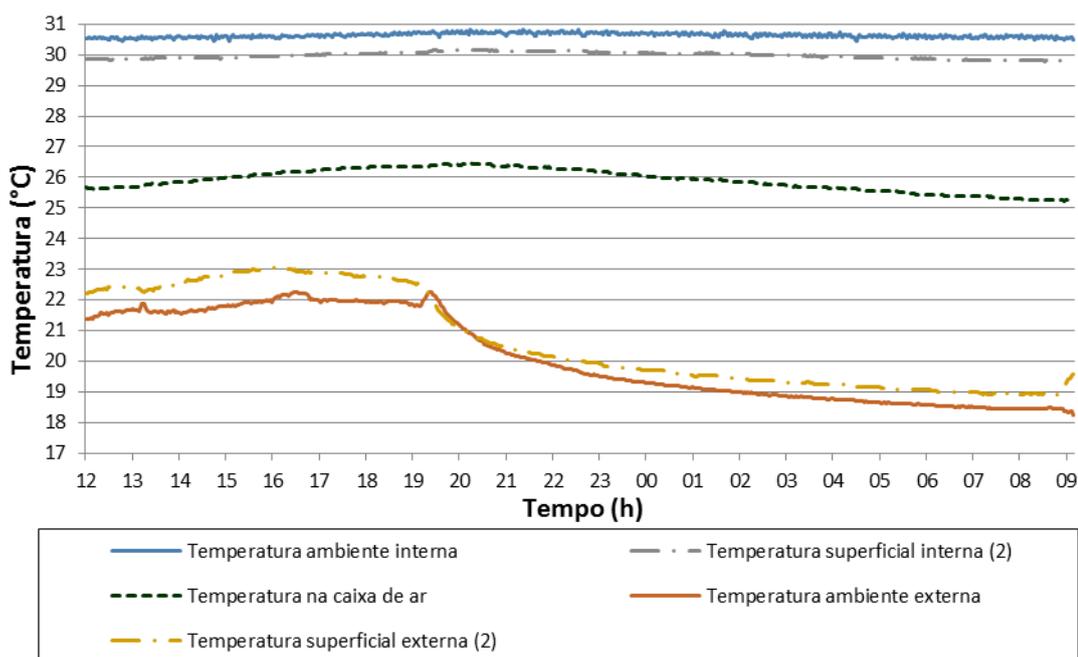


Figura E.14 – Temperaturas do ensaio n.º E5.

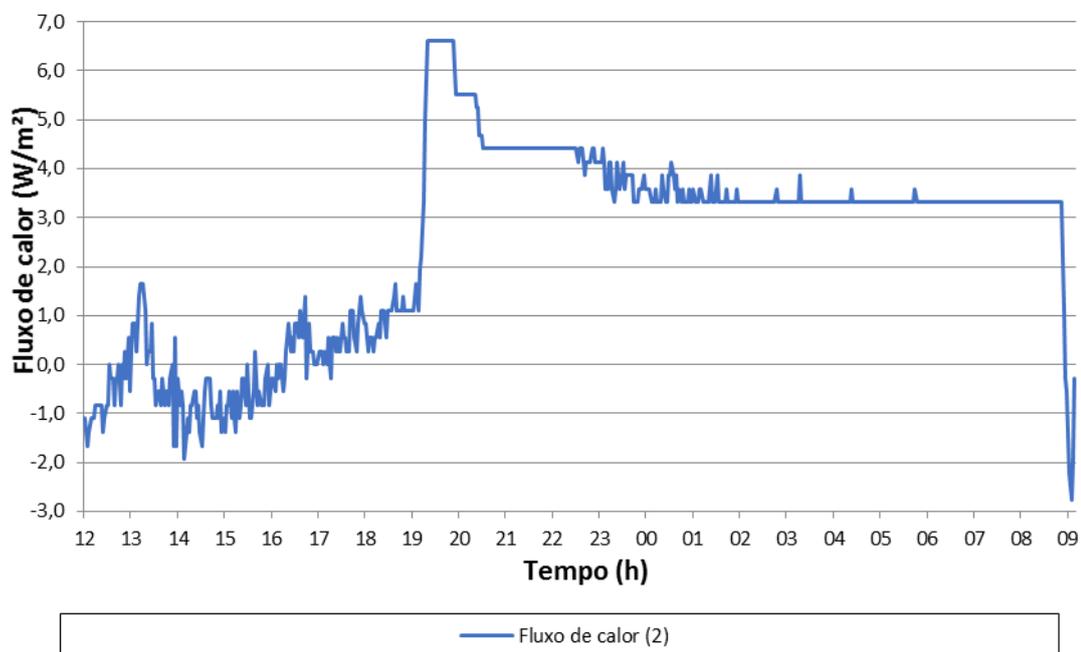


Figura E.15 – Fluxo de calor do ensaio n.º E5.

Quadro E.5 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E5.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]
	2
1	3,20
2	3,23
3	3,26
4	3,27
5	3,29
6	3,29

## Anexo F Ficha do ensaio experimental E6

Ensaio n.º E6

Data de início 11-01-2012 11:08

Data de conclusão 12-01-2012 09:54

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 5

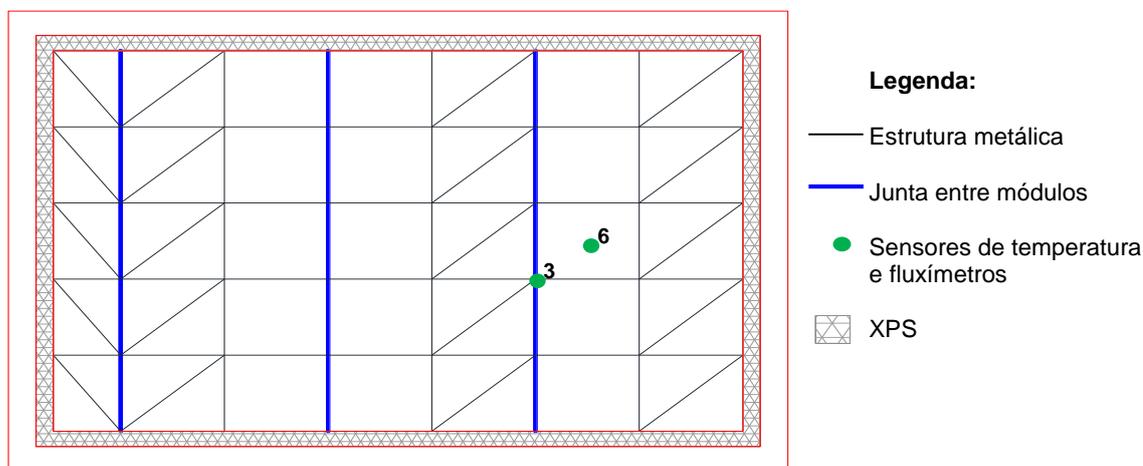


Figura F.16 – Localização do sensor do ensaio n.º E6.

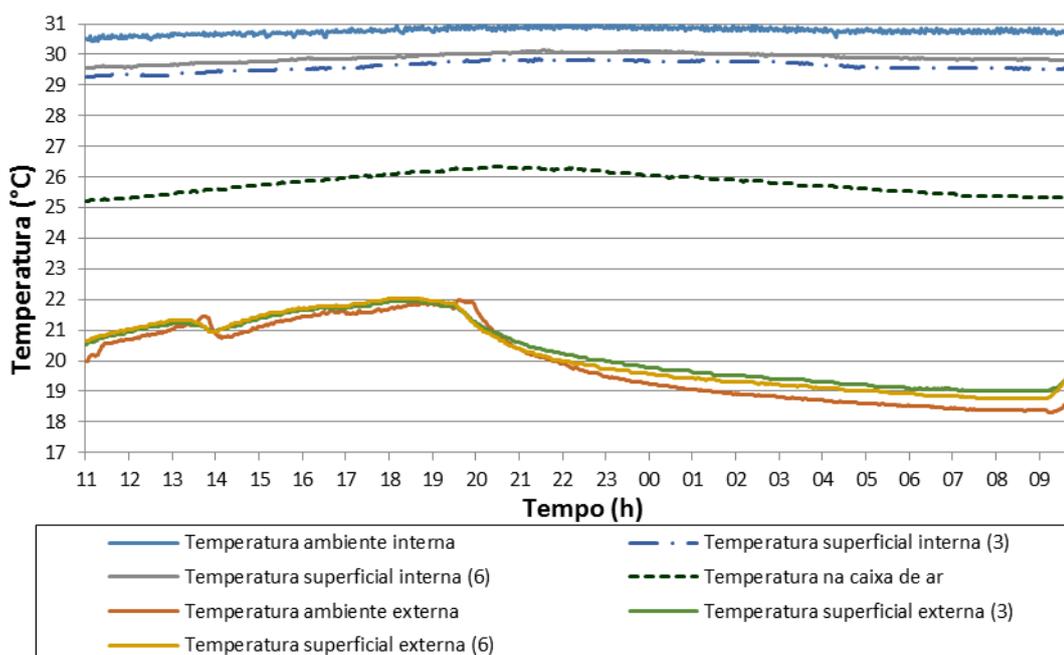


Figura F.17 – Temperaturas do ensaio n.º E6.

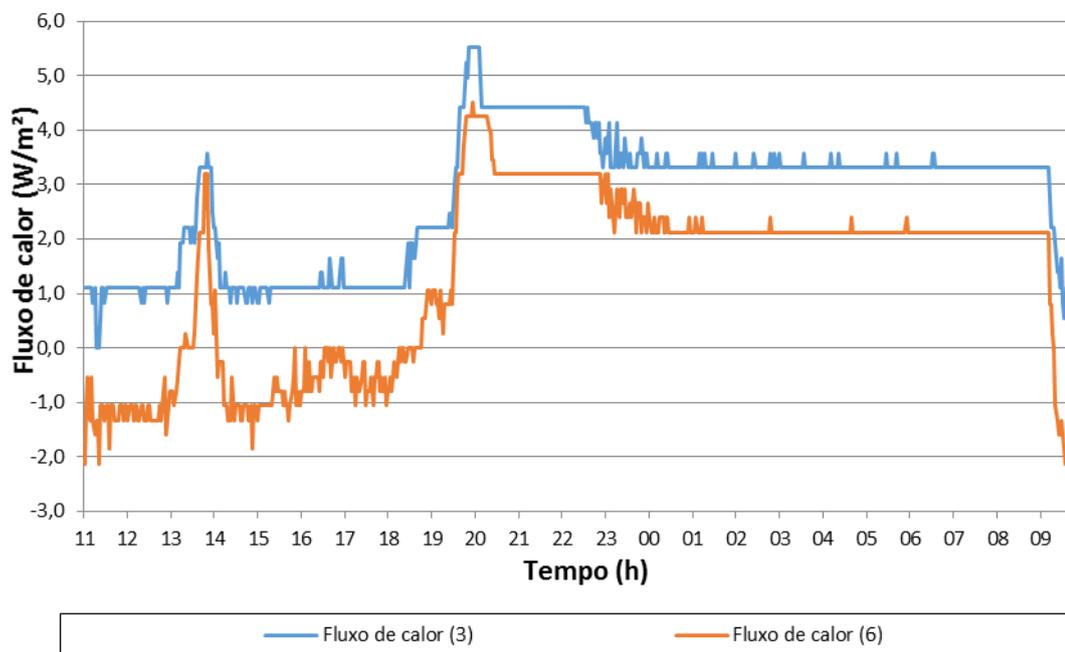


Figura F.18 – Fluxo de calor do ensaio n.º E6.

Quadro F.6 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E6.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]	
	3	6
1	3,11	5,09
2	3,13	5,13
3	3,15	5,14
4	3,18	5,18
5	3,18	5,20

## Anexo G Ficha do ensaio experimental E9

Ensaio n.º E9

Data de início 10-01-2012 12:22

Data de conclusão 20-12-2011 17:04

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 8

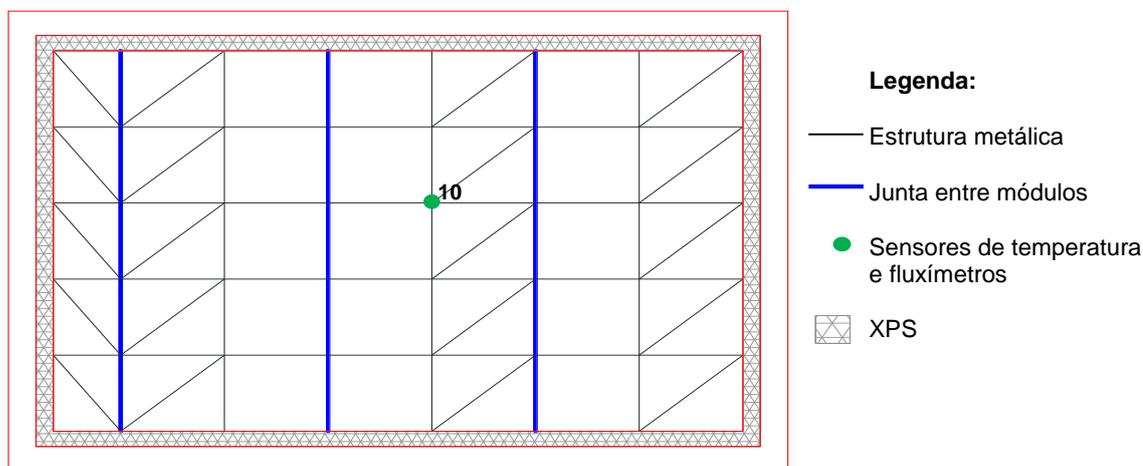


Figura G.19 – Localização do sensor do ensaio n.º E9.

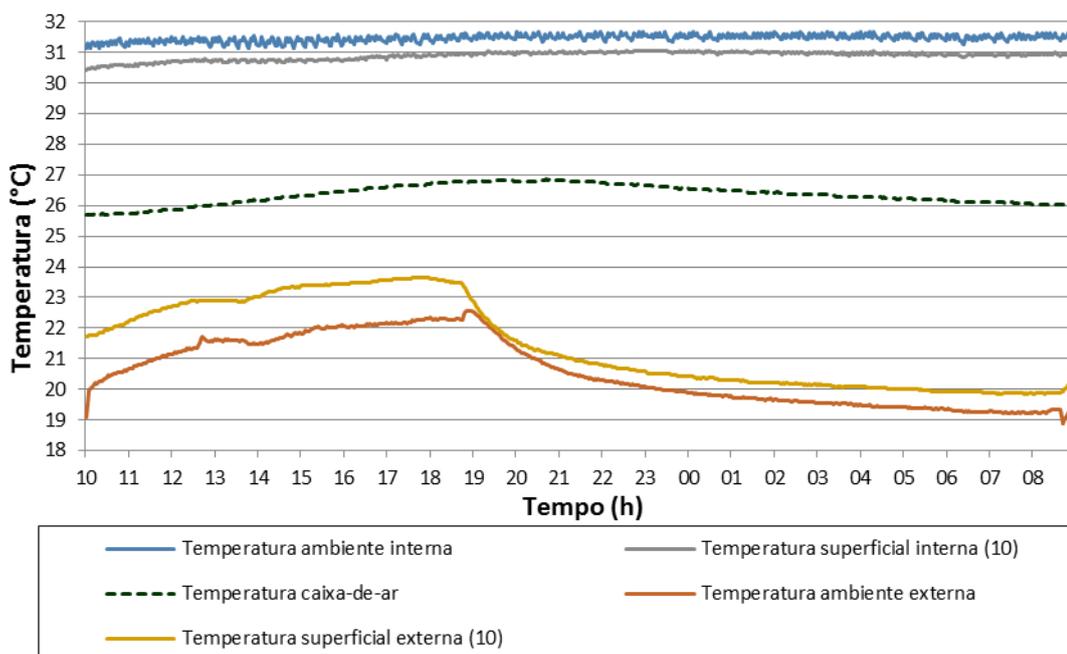


Figura G.20 – Temperaturas do ensaio n.º E9.

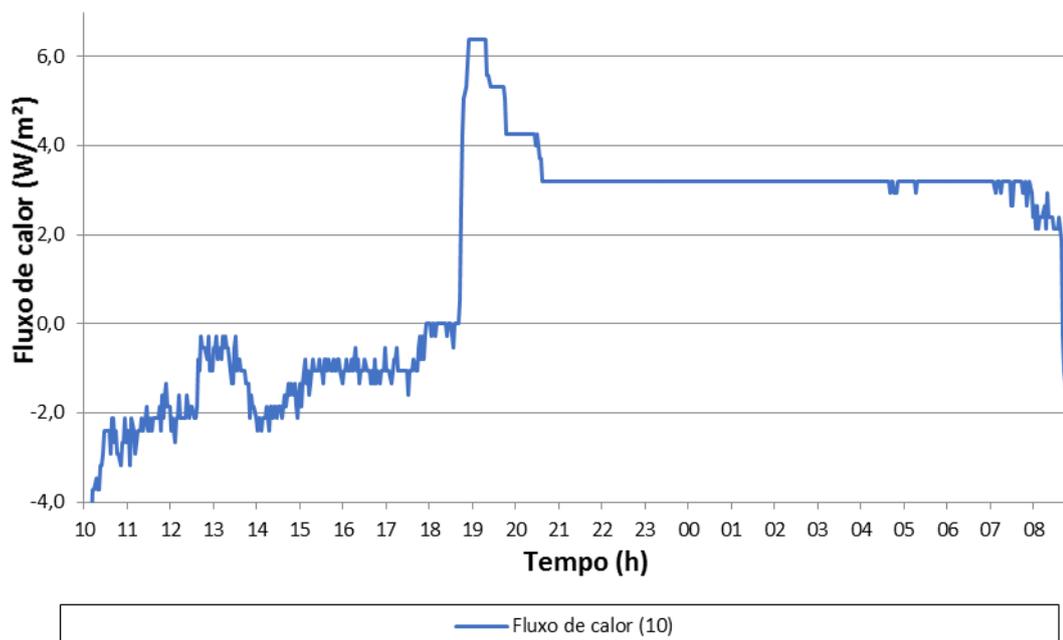


Figura G.21 – Fluxo de calor do ensaio n.º E9.

Quadro G.7 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E9.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]
	10
1	3,32
2	3,35
3	3,38
4	3,39
5	3,41
6	3,46
7	3,44
8	3,47

## Anexo H Ficha do ensaio experimental E10

Ensaio n.º E10

Data de início 30-01-2012 17:26

Data de conclusão 31-01-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 2

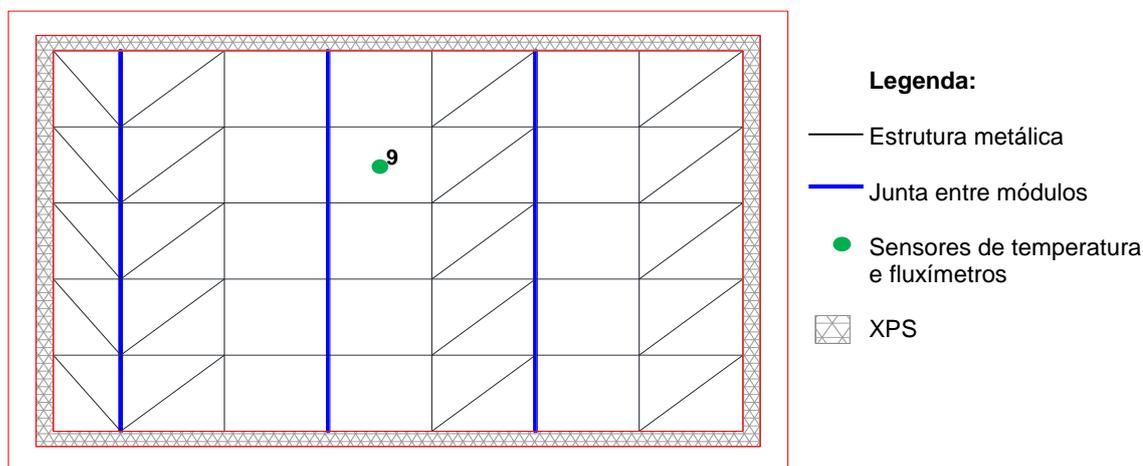


Figura H.22 – Localização do sensor do ensaio n.º E10.

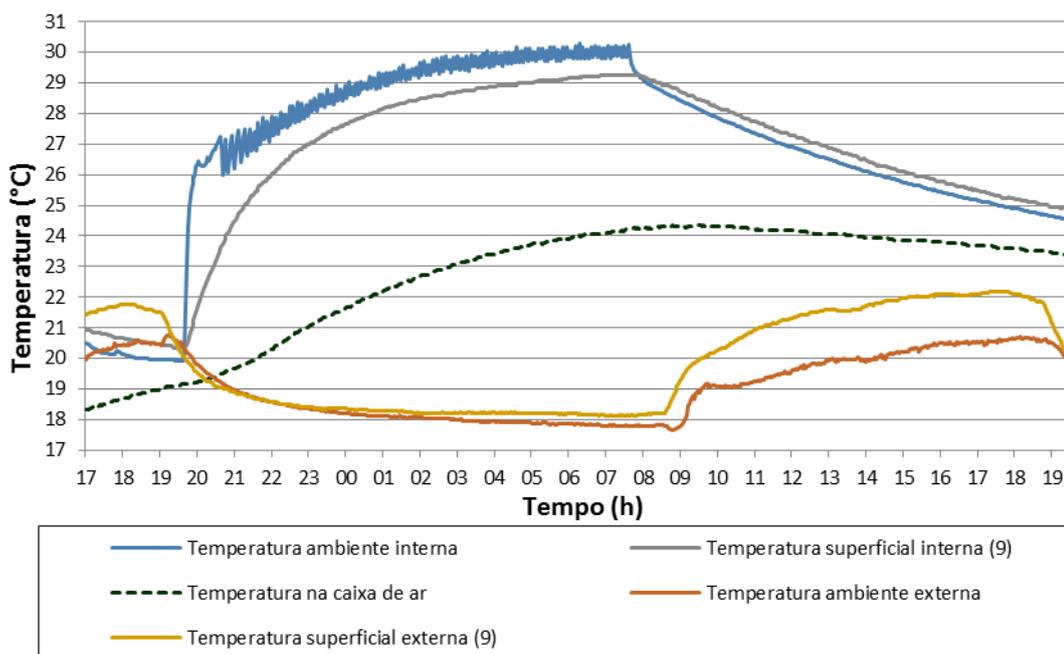


Figura H.23 – Temperaturas do ensaio n.º E10.

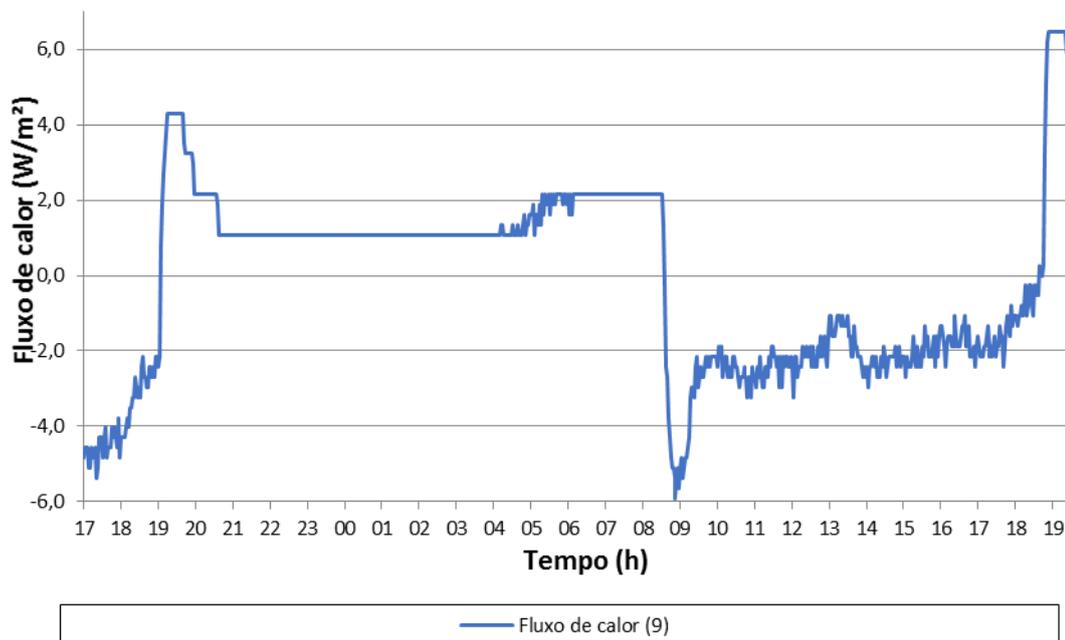


Figura H.24 – Fluxo de calor do ensaio n.º E10.

Quadro H.8 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E10.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]
	9
1	5,15
2	5,15

## Anexo I Ficha do ensaio experimental E11

Ensaio n.º E11

Data de início 31-01-2012 20:00

Data de conclusão 01-02-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 9

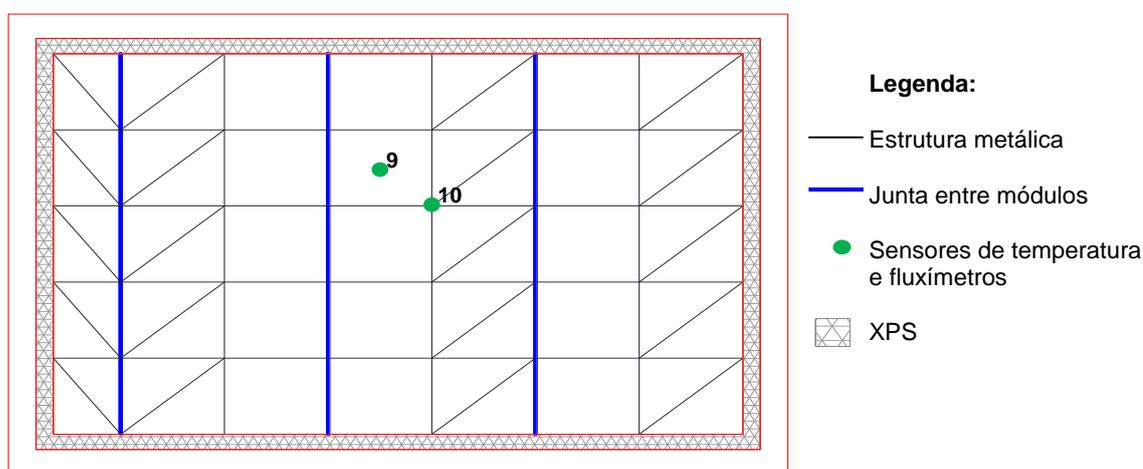


Figura I.25 – Localização do sensor do ensaio n.º E11.

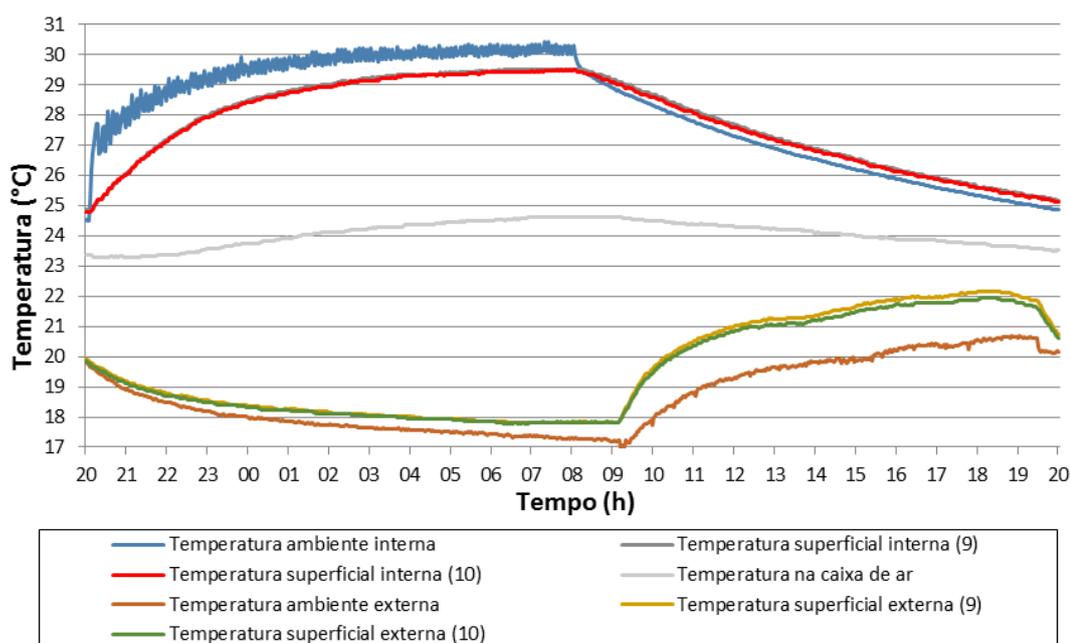


Figura I.26 – Temperaturas do ensaio n.º E11.

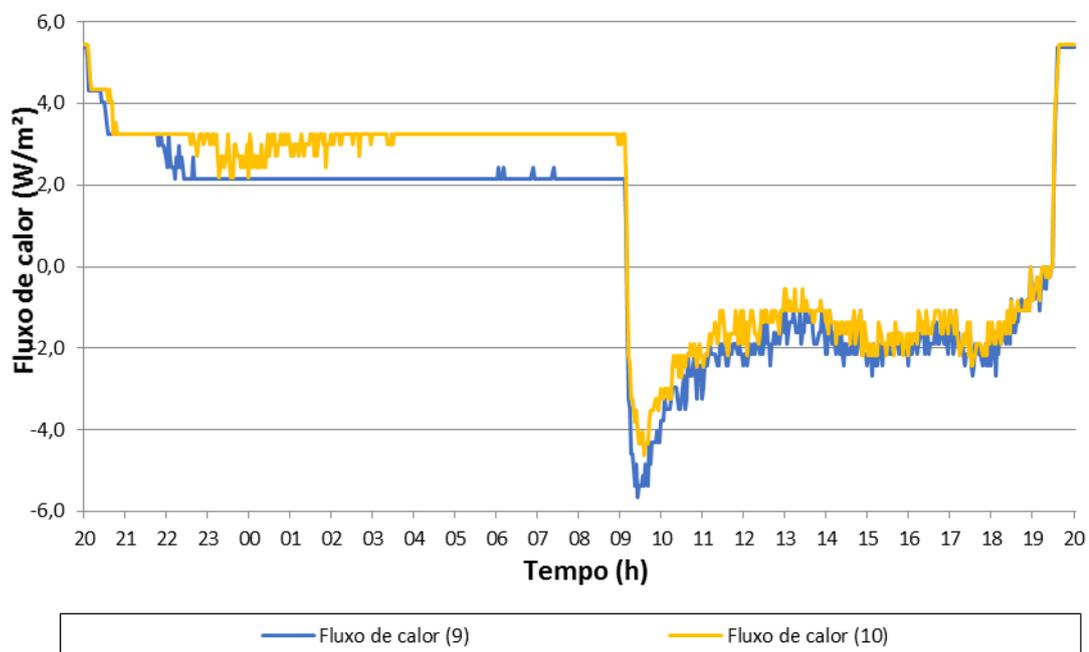


Figura I.27 – Fluxo de calor do ensaio n.º E11.

Quadro I.9 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E11.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]	
	9	10
1	4,80	3,58
2	4,96	3,56
3	5,12	3,45
4	5,23	3,47
5	5,29	3,49
6	5,35	3,53
7	5,34	3,57
8	5,40	3,57
9	5,37	3,54

## Anexo J Ficha do ensaio experimental E12

Ensaio n.º E12

Data de início 01-02-2012 20:00

Data de conclusão 02-02-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 3

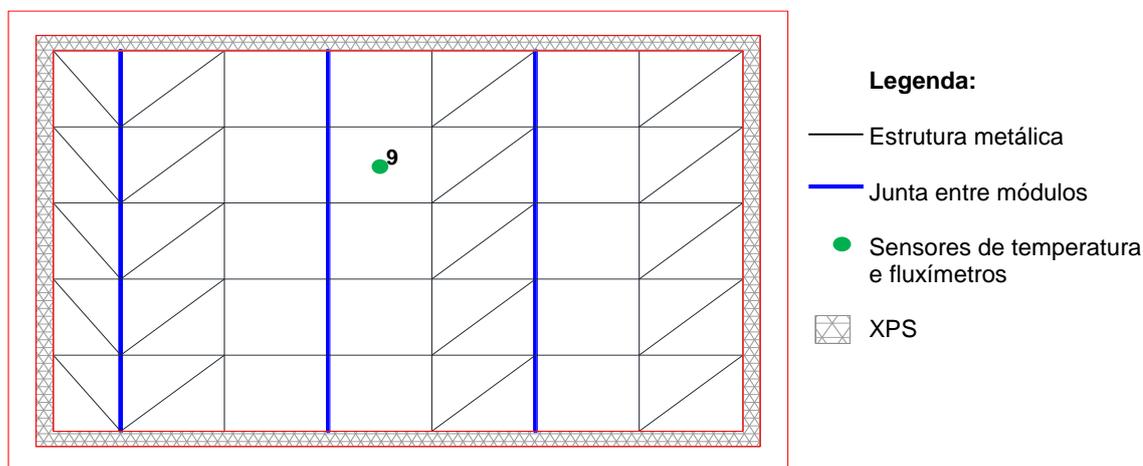


Figura J.28 – Localização do sensor do ensaio n.º E12.

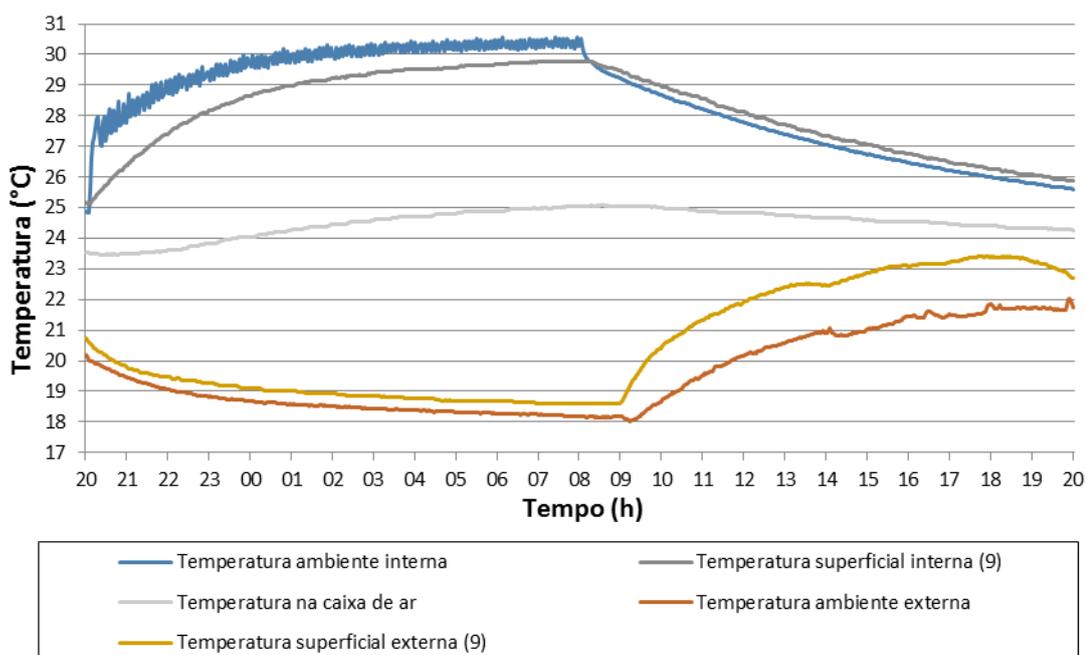


Figura J.29 – Temperaturas do ensaio n.º E12.

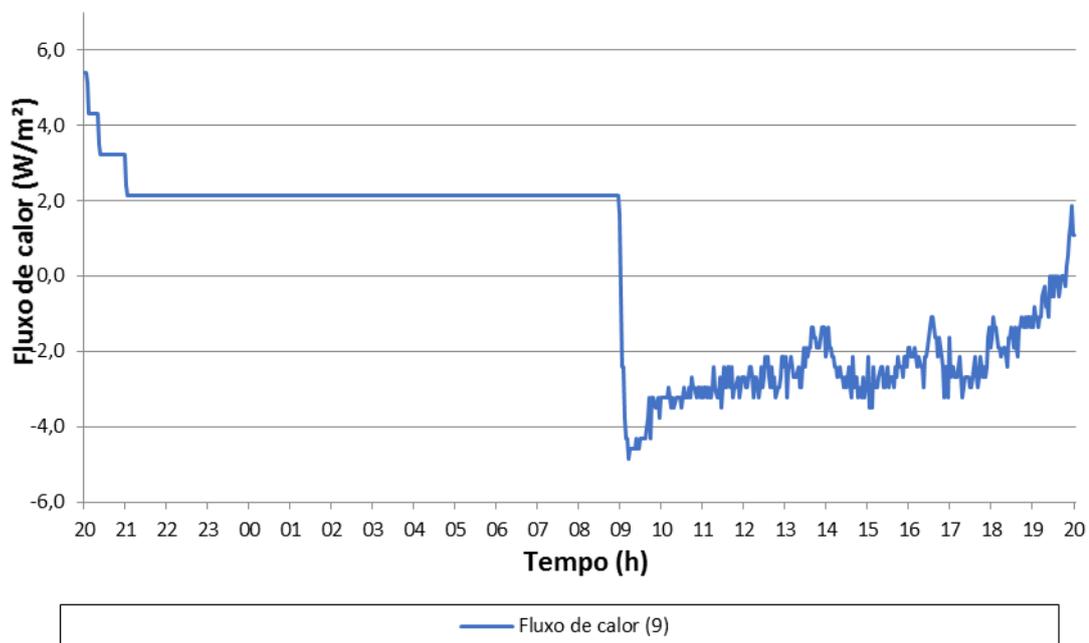


Figura J.30 – Fluxo de calor do ensaio n.º E12.

Quadro J.10 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E12.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]
	9
1	5,14
2	5,17
3	5,39

## Anexo K Ficha do ensaio experimental E13

Ensaio n.º E13

Data de início 02-02-2012 20:00

Data de conclusão 03-02-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 8

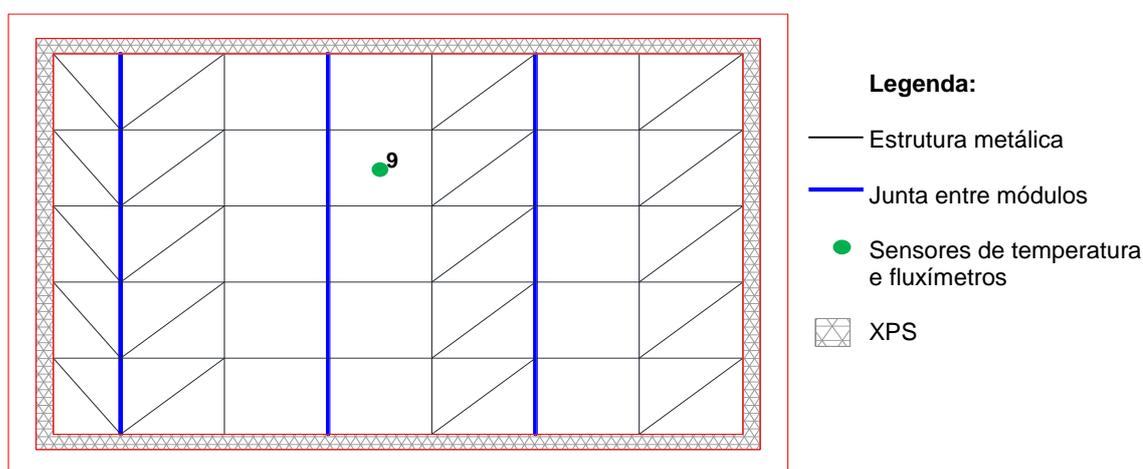


Figura K.31 – Localização do sensor do ensaio n.º E13.

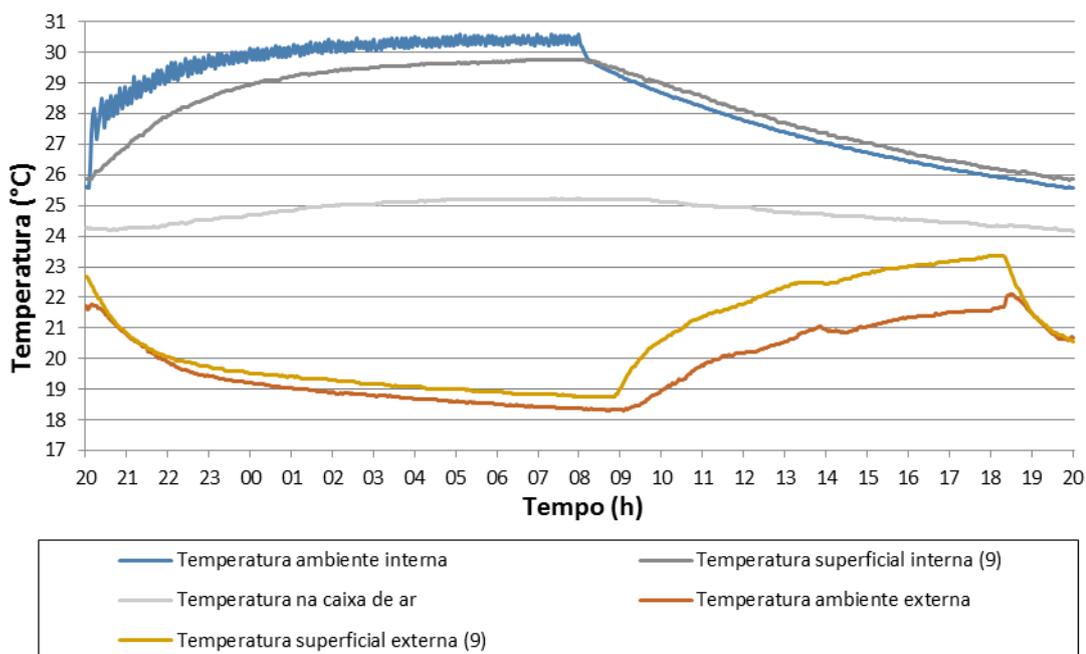


Figura K.32 – Temperaturas do ensaio n.º E13.

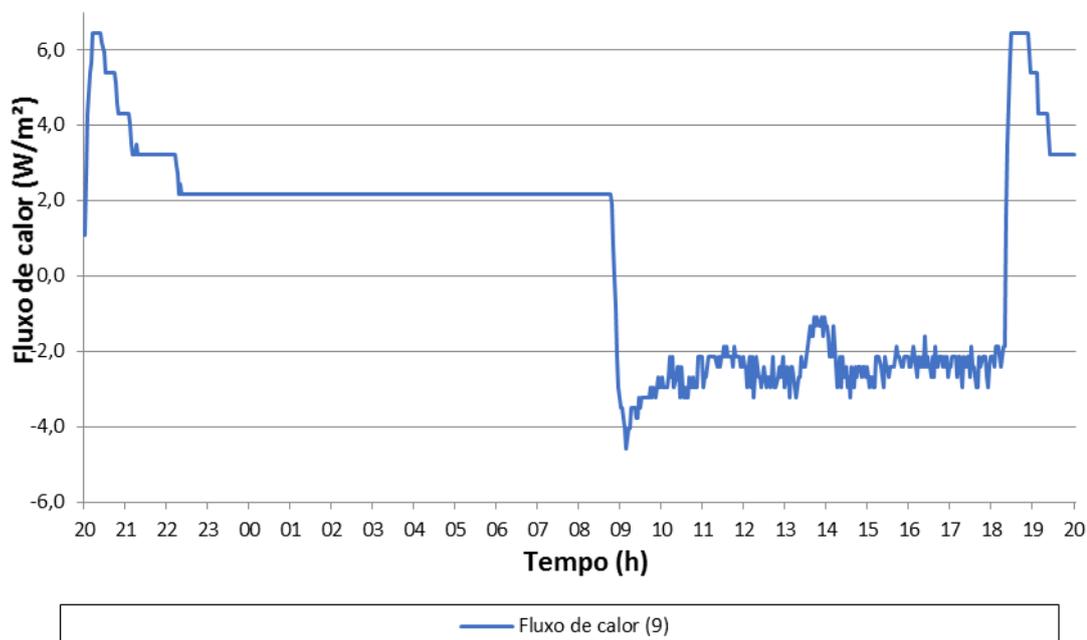


Figura K.33 – Fluxo de calor do ensaio n.º E13.

Quadro K.11 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E13.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [ $m^2.K/W$ ]
	9
1	4,47
2	4,62
3	4,75
4	4,85
5	4,93
6	4,98
7	5,04
8	5,08

## Anexo L Ficha do ensaio experimental E14

Ensaio n.º E14

Data de início 03-02-2012 20:00

Data de conclusão 04-02-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 3

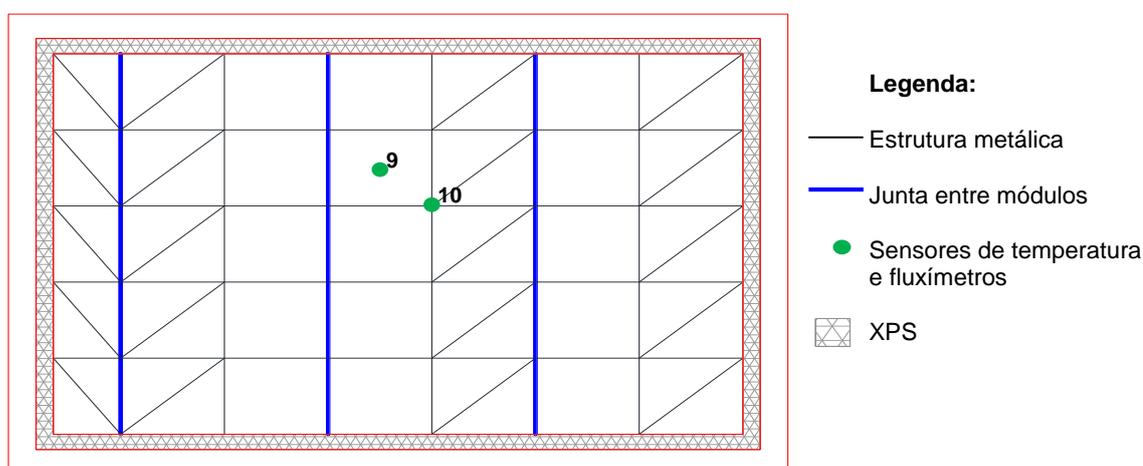


Figura L.34 – Localização do sensor do ensaio n.º E14.

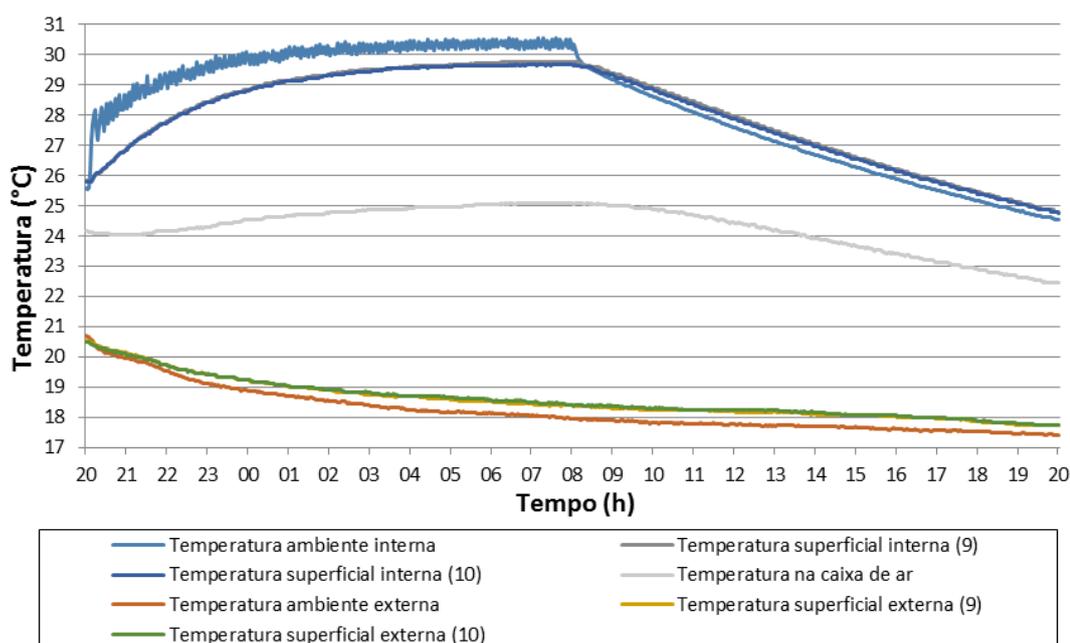


Figura L.35 – Temperaturas do ensaio n.º E14.

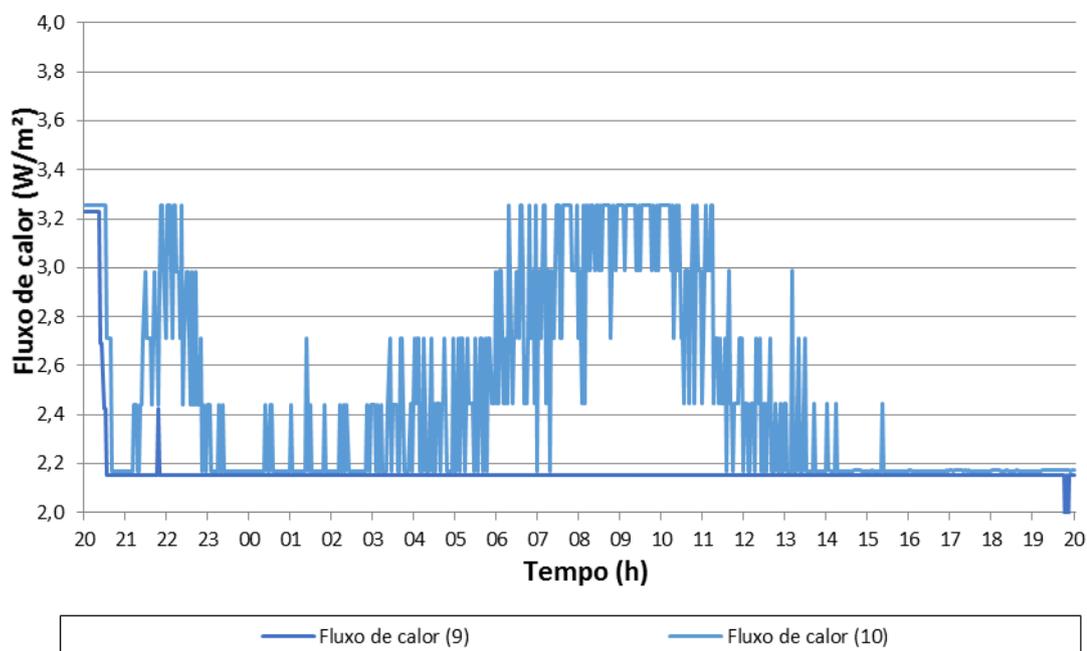


Figura L.36 – Fluxo de calor do ensaio n.º E14.

Quadro L.12 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E14.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]	
	9	10
1	5,27	3,72
2	5,23	3,60
3	5,06	3,37

## Anexo M Ficha do ensaio experimental E15

Ensaio n.º E15

Data de início 04-02-2012 20:00

Data de conclusão 05-02-2012 20:00

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 3

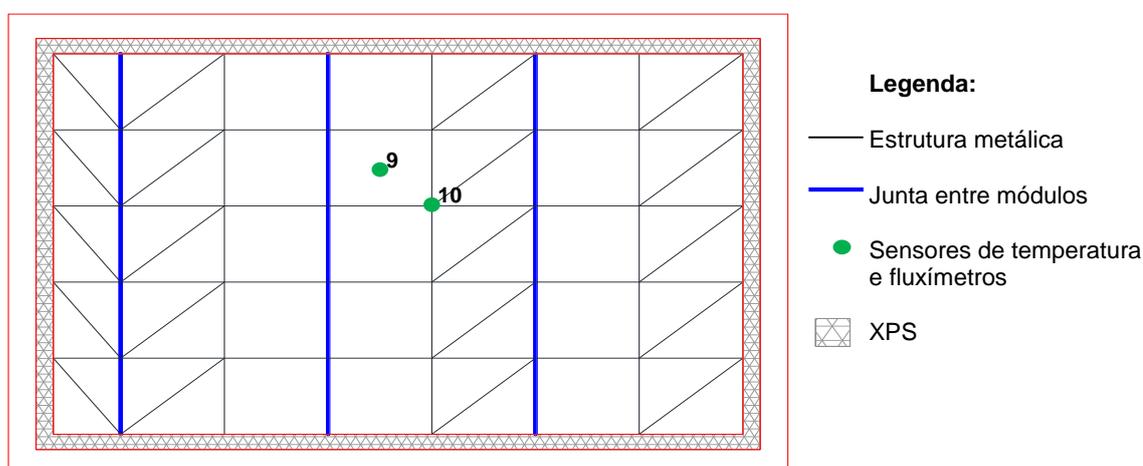


Figura M.37 – Localização do sensor do ensaio n.º E15.

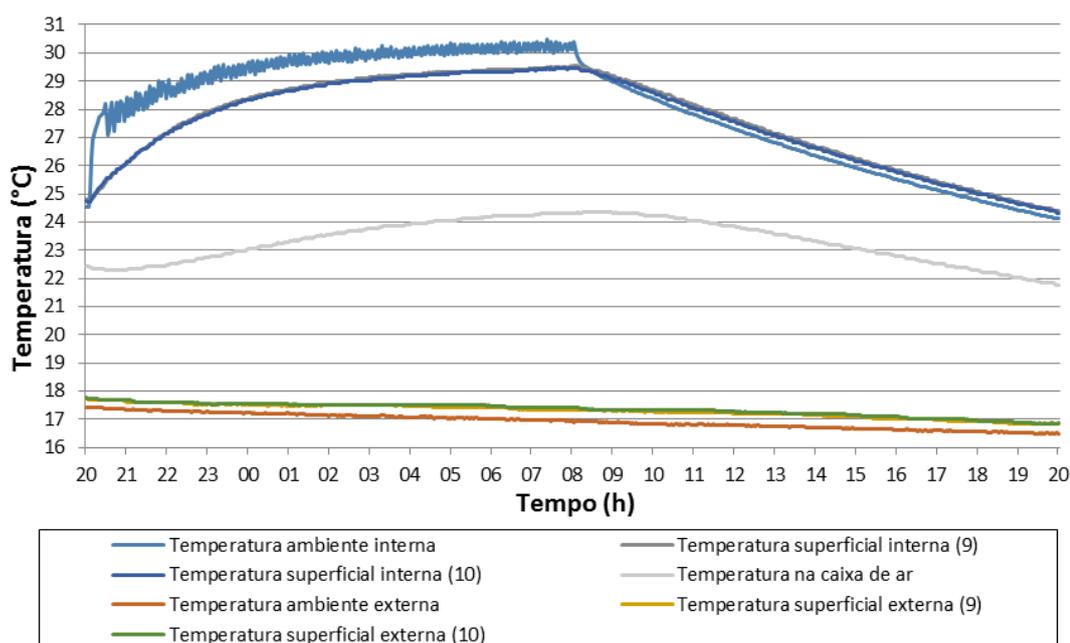


Figura M.38 – Temperaturas do ensaio n.º E15.

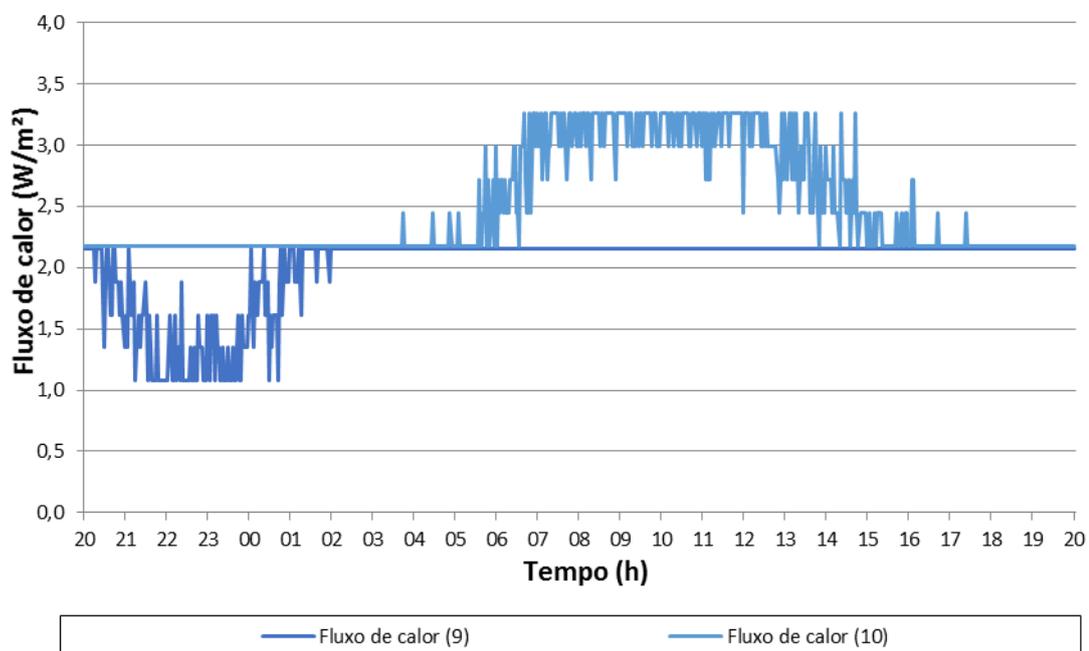


Figura M.39 – Fluxo de calor do ensaio n.º E15.

Quadro M.13 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E15.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]	
	9	10
1	5,60	3,76
2	5,41	3,62
3	5,18	3,44

## Anexo N Ficha do ensaio experimental E16

Ensaio n.º E16

Data de início 05-02-2012 20:00

Data de conclusão 06-02-2012 11:26

Características do provete: Parede com ETICS

Tempo entre leituras: 30 segundos

Tempo entre registos: 2 minutos

Duração de cada intervalo: 1 hora

Número de intervalos: 3

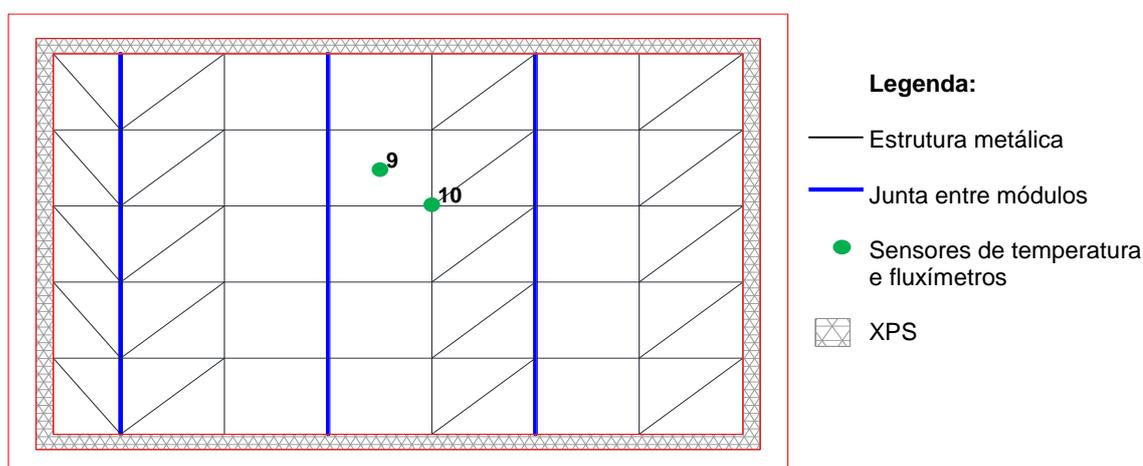


Figura N.40 – Localização do sensor do ensaio n.º E16.

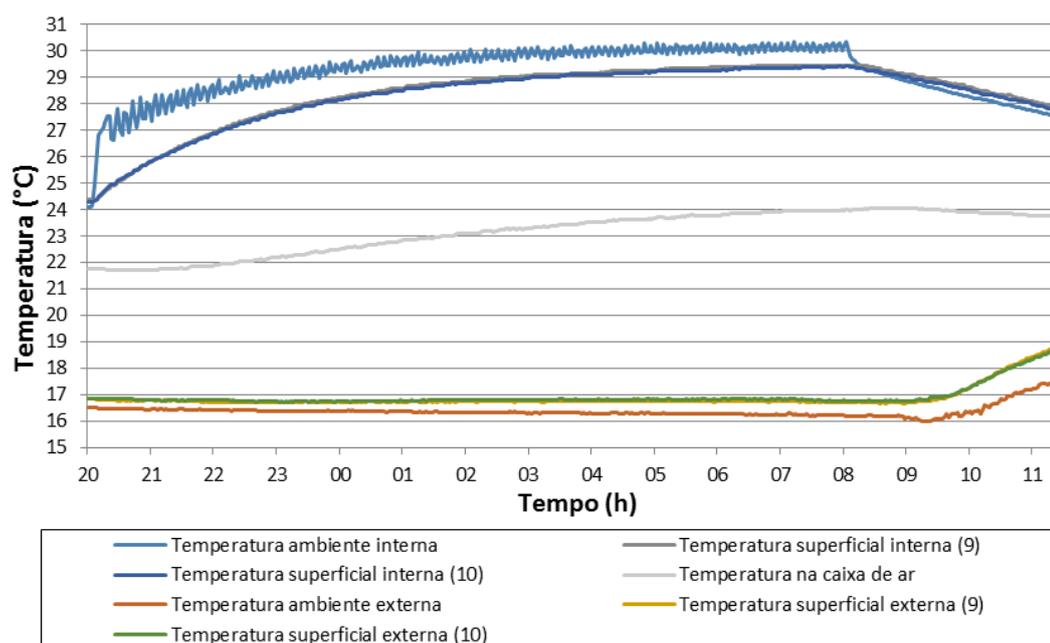


Figura N.41 – Temperaturas do ensaio n.º E16.

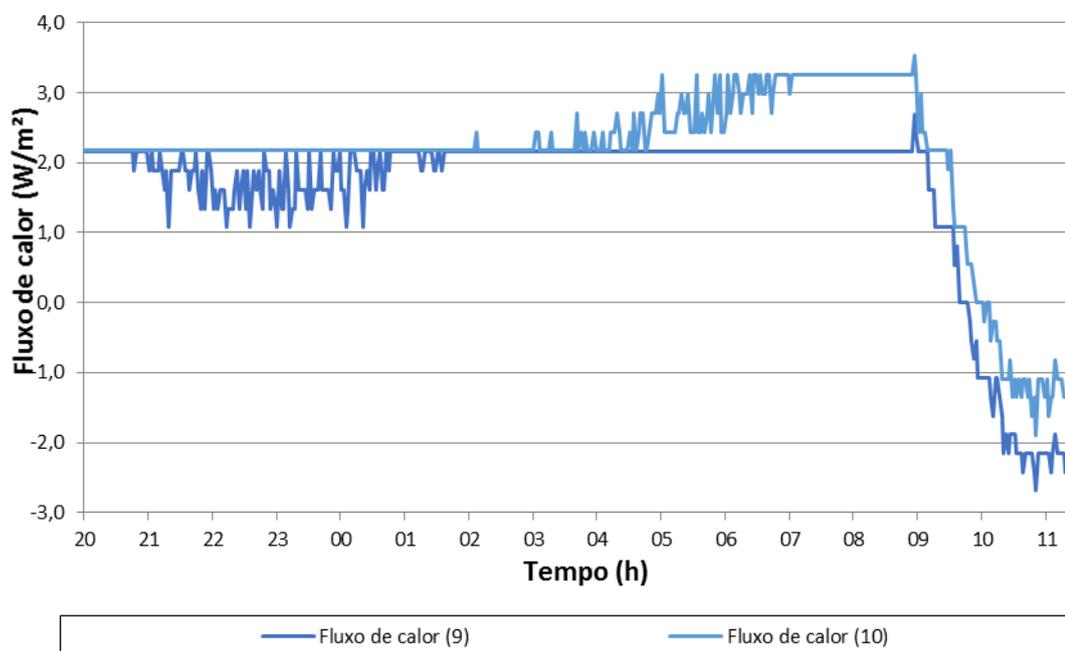


Figura N.42 – Fluxo de calor do ensaio n.º E16.

Quadro N.14 – Resistência térmica estimada ( $R_e$ ) por sensor do ensaio n.º E16.

Intervalo de dados	$R_e$ do sensor n.º: [m <sup>2</sup> .K/W]	
	9	10
1	5,88	4,05
2	5,90	3,88
3	5,79	3,82

## Anexo O Cálculos experimentais intermédios dos valores de U

Quadro O.15 – Cálculo do valor de U da parede com ETICS

Sensor .º		Zona com perfis metálicos				Zona entre perfis metálicos			
		1	2	3	10	4	5	6	9
Re [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Ensaio E4	3,355	3,272			5,274	5,259		
	Ensaio E5		3,257						
	Ensaio E6			3,150				5,148	
	Ensaio E9				3,403				
	Ensaio E10								5,150
	Ensaio E11				3,529				5,207
	Ensaio E12								5,233
	Ensaio E13								4,840
	Ensaio E14				3,563				5,187
	Ensaio E15				3,607				5,397
	Ensaio E16				3,917				5,857
<b>ReMédio</b> [(m <sup>2</sup> .K)/W]		3,45				5,26			
<b>S(Re)</b>		0,23				0,25			
<b>V(Re)</b>		6,7%				4,8%			
<b>Área</b> [m <sup>2</sup> ]		0,97				2,02			
<b>W</b> [m]						0,13			
<b>Rm</b> [(m <sup>2</sup> .K)/W]						4,67			
<b>U</b> [W/(m <sup>2</sup> .K)]						<b>0,21</b>			

Com valor W calculado através da Equação (1).

Quadro O.16 – Cálculo do valor de U da parede sem ETICS.

Sensor n.º		Zona com perfis metálicos			Zona entre perfis metálicos		
		1	2	8	4	5	6
<b>Re</b> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	<b>Ensaio E1</b>						4,26
	<b>Ensaio E2</b>		1,17		4,33		4,19
	<b>Ensaio E3</b>		1,00	1,09	4,37	4,37	
<b>ReMédio</b> [(m <sup>2</sup> .K)/W]		1,08			4,22		
<b>S(Re)</b>		0,08			0,10		
<b>V(Re)</b>		7,6%			2,5%		
<b>Área</b> [m <sup>2</sup> ]		0,90			2,09		
<b>W</b> [m]		0,12					
<b>R<sub>m</sub></b> [(m <sup>2</sup> .K)/W]		2,26					
<b>U</b> [W/(m <sup>2</sup> .K)]		<b>0,40</b>					

Com o valor de W retirado da imagem térmica da Figura 4.12b.